



[2017-12-WD-003]

풍력기상자원지도 산출방법에 따른 풍력자원 비교

서범근^{1,3)} · 김연희^{1)*} · 김지희²⁾ · 김백조¹⁾

Comparison of Wind Resource Characteristics in Korea According to Different Mapping Method

Beom-Keun Seo^{1,3)} · Yeon-Hee Kim^{1)*} · Ji-Hee Kim²⁾ · Baek-Jo Kim¹⁾

Received 7 February 2017 Revised 14 December 2017 Accepted 14 December 2017

ABSTRACT Two types of wind resource maps for Korea were developed. The first wind resource map was a TMY (Typical Meteorological Year) wind resource map based on the WRF (Weather Research and Forecasting) model using the NCEP FNL for the TMY period from 1998 to 2009. The second wind resource map was a KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) wind resource map based on the WRF model using the high resolution KLAPS reanalysis data of a continuous period from 2010 to 2013. A comparative verification was carried out using the observation data of the ASOS sites. The KLAPS wind resource map was improved by 17.9% (0.24 m s^{-1} , mean bias) and 10.6% (0.24 m s^{-1} , mean RMSE) compared to the TMY wind resource map. The wind speed verification at an 80 m height of the KLAPS wind resource map was conducted for the Gochang site (onshore) and HeMOSU-1 site (offshore). As a result, the bias was 0.5 m s^{-1} and -0.2 m s^{-1} , and the RMSE was 2.1 m s^{-1} and 2.0 m s^{-1} , respectively. The wind speed of the KLAPS wind resource map was strong in winter (onshore) and spring (offshore), and weak in summer. Moreover the wind speed during the daytime was stronger than that at night. The wind resource map depicted the average wind speed, maximum wind speed, prevailing wind direction, frequency of $3 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ wind speed, and Weibull distribution in major wind farms for the development of wind energy.

Key words Wind resource map(풍력기상자원지도), Typical meteorological year(대표기상년도), Korea local analysis prediction system(초단기예보모델), Automated synoptic observing system(종관자동기상관측장비)

1. 서론

풍력에너지는 온실가스 배출이 없는 청정에너지로서 기후 변화에 대응할 수 있는 신·재생에너지이다. 전 세계의 풍력

에너지 발전 설비용량은 17,400MW(2000년)에서 432,883 MW(2015년)로 매년 증가 추세이며 우리나라도 7.9MW(2001년)에서 835MW(2015년)로 매년 증가하고 있다^[1,2].

풍력발전단지 입지선정 시 사전에 고려할 사항은 풍황 정보, 환경보전지역, 생물보호지역, 인간활동지역 등이며, 이 중에서 풍황 정보는 필수 사항이다^[3]. 풍황 정보는 기상 관측탑을 이용하여 최소 1년 동안 바람을 측정하여 수집하지만 기상 관측탑 설치에 그 비용이 높고 설치 지점의 선정 시 고려해야 할 사항(식생 환경, 지형, 대표지점 선정) 등 많은 제약 조건들이 있다.

1) Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences

2) Forecast Division, Jeju Regional Office of Meteorology

3) Department of Environmental Engineering, Hanseo University

*Corresponding author: yeonheekim@korea.kr

Tel: +82-64-780-6784

Fax: +82-64-738-6515

풍력기상자원지도는 수치모델을 이용해서 산출된 격자 체계의 지도이므로 관측이 불가능한 지점이나 사용자가 원하는 지점들의 풍황 정보를 산출할 수 있는 장점이 있다. 풍력기상자원지도는 실제 관측과 차이가 적어야 하고 장기 간의 바람정보를 내포해야하므로 정확도 향상과 기후적 특성을 반영하기 위해서 지속적인 연구가 필요하다.

이에 대한 선행연구로는 김현구 등^[4,5]이 9km 해상도 풍력자원지도와 3km 해상도 풍력자원지도 연구를 시작으로 이순환 등^[6]과 김현구와 강용혁^[7]이 풍력기상자원지도를 개선하여 1km 해상도 자료를 생산하였다. 여기서, 이순환 등^[6]은 기상청 지역예보 모델인 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)를 초기 입력·경계 조건으로 중규모 수치예보모델인 MM5(Fifth generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)를 이용하여 남·서 해안에 대한 계절 별 풍력자원지도를 생산하고 정확도를 검증하였다. 김현구와 강용혁^[7]은 2010년에 대해 6시간 간격의 NCEP FNL(National Centers for Environmental Prediction Final)자료와 윈드프로파일러(wind profiler) 관측자료 등이 자료동화된 WRF(Weather Research and Forecasting)를 이용하여 1km 해상도의 10분 간격 자료를 산출하였다. 그 외에도 김현구 등^[8]은 2005~2007년 기간에 대해 RDAPS를 초기 입력·경계 자료로 Quick-SCAT 위성 자료를 자료동화한 MM5를 이용하여 3km 해상도 풍력자원 지도를 산출하였다. 그렇지만 NCEP FNL과 RDAPS는 각각 약 100km, 30km 해상도의 격자자료로서 1km 해상도로 내삽하여 산출하는 과정에서 풍속 오차가 발생할 수 있다.

그 외에도 변재영 등^[9]은 1998~2009년을 대표할 수 있는 TMY(Typical Meteorological Year) 기간을 선정하고 (Table 1)^[10], 수치예보(Numerical Weather Prediction; NWP)모델인 WRF 모델을 이용하여 NCEP FNL자료를 초기 입력·경계 자료로 활용하고 지표층, 고층, 해상 등 다양한 관측자료를 FDDA(Four Dimensional Data Assimilation) 기법으로 자료동화하여 풍력기상자원지도(이하 TMY 풍력

기상자원지도)를 산출하였다. TMY 풍력기상자원지도는 장기간의 기후 특성을 가장 잘 반영하는 1년 12달 중의 한 달을 선정하고 통계적 방법을 이용하여 각 달 별로 산출하므로 12년을 대표하지만 각 달간에 연속성이 없다는 한계를 가지고 있다.

Xue *et al.*^[11]은 입력자료를 고해상도의 재분석자료로 이용한 경우에 모델 성능이 저해상도의 자료를 적용할 때 보다 향상된다고 하였다. 따라서, 본 연구에서는 TMY 풍력기상자원지도의 산출기간을 개선하고 모의 성능을 향상시키기 위해서 WRF모델을 이용하여 기상청 초단기예보모델(Korea Local Analysis Prediction System; KLAPS)^[12]로부터 생산된 2010~2013년의 고해상도 재분석 자료를 적용한 풍력기상자원지도(이하 KLAPS 풍력기상자원지도)를 생산하였고 TMY 풍력기상자원지도와 비교분석해 보았다. 2장에서는 TMY와 KLAPS의 풍력기상자원지도 산출 방법과 검증방법을 제시하였으며 3장에서는 풍력기상자원 지도 별 관측 값과의 오차를 비교하고 KLAPS 풍력기상자원의 특성을 분석하였다. 마지막으로 풍력기상자원지도의 수치자료를 활용하여 우리나라 주요 풍력발전단지 풍황 특성을 살펴보았다.

2. 연구 방법

2.1 자원지도 별 풍력기상자원 산출 방법

TMY 풍력기상자원지도와 KLAPS 풍력기상자원지도의 산출 모델 설계와 산출방법은 Table 2와 같다. TMY 풍력기상자원지도를 산출하기 위한 수치모델은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 WRF이며, 중규모 이하의 기상현상을 모의하기에 적합하다^[13]. 초기 입력·경계 자료는 6시간 간격의 NCEP FNL 분석 자료이며 이 자료의 수평 해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ($\approx 100\text{km} \times 100\text{km}$)이다. 수치모델의 도메인은 Fig. 1a와 같이 동북아시아 지

Table 1. Typical meteorological year (TMY) from 1998 to 2009 in Korea

Mon.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Year of TMM ¹⁾	2008	2006	2004	2004	2005	2003	2005	2004	2006	2005	2005	2002

TMM¹⁾ : Typical Meteorological Month

역을 대상으로 27, 9, 3, 1km 간격의 동지 격자로 구성하였고 마지막 도메인은 1km 간격의 532(동서) × 652(남북) 개 격자로 구성된 남한 영역(울릉도, 독도 제외)을 선정하

Table 2. Configuration of wind mapping methods

Wind resource map	TMY	KLAPS
NWP model	WRF (Ver. 3.1.1)	WRF (Ver. 3.4.1)
Simulation period	TMY (1998 ~ 2009)	2010 ~ 2013
Initial·boundary data	NCEP FNL (1°, 6hour)	KLAPS (5 km, 1hour)
Domain (grid size)	Domain1 (27 km) Domain2 (9 km) Domain3 (3 km) Domain4 (1 km)	Domain1 (1 km)
Number of vertical layers	28 layers	37 layers
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta) scheme (Only Domain 1, 2)	-
Microphysics	WDM 6 class scheme	
PBL	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme	
Land surface model	RUC	Noah
LW radiation	RRTMg scheme	
SW radiation	Goddard short wave scheme	
Land-use data	MOLIT (1 s)	MODIS (30 s)
Topography data	SRTM (3 s)	USGS (30 s)
Data Assimilation	Multi FDDA (Grid·surface·observation nudging)	FDDA (Grid nudging)

였다. 연직 층은 지상으로부터 50hPa 고도까지 28개 층으로 구성하였다.

모델의 대기경계층, 지면모델, 구름물리과정 모수화 방안은 각각 MYJ(Mellor-Yamada-Janic)^[14], RUC(Rapid Update Cycle)^[15], WDM6(WRF Double-Moment 6 class)^[16]이다. 그 밖의 적운 모수화 방안, 장파복사와 단파복사 모수화 방안, 지형자료, 자료동화 방법 등은 Table 2에 제시하였다.

KLAPS 풍력기상자원지도 산출 방법은 TMY 풍력기상자원지도 산출방법과 대부분 동일하지만 1시간 간격, 5km 공간 해상도의 KLAPS 재분석 자료를 초기 입력·경계 자료로 이용하고 연직 층은 37개 층으로 구성하여 시·공간적으로 고해상도화 하였다. 모델 도메인은 1km 간격의 682 × 682개 격자로 구성된 남한의 전 영역(울릉도, 독도 포함)으로 설정하였다(Fig. 1b).

TMY 풍력기상자원지도를 산출하는 모델에 반영한 지표이용도(land-use) 자료는 국토교통부(Ministry of Land, Infrastructure and Transport; MOLIT)에서 제공하고 1초(≒30m) 해상도를 가진다. 그러나 이 자료의 영역은 남한으로만 국한되어 있어 모델 내에서 이 자료와 북한의 지표이용도(USGS; United States Geological Survey, 30초해상도)는 서로 불연속적으로 나타나는 한계를 보인다. 이러한 불연속적인 지표이용도 조건은 열 환경 구조나 연직순환과 같은 국지기상 모의에 있어서 부정적인 영향을 줄 수 있다^[17]. 이를 개선하기 위해서 KLAPS 풍력기상자원지도를 생산하는 수치모델의 지표이용도는 30초(≒900m) 해상도의 MODIS(Moderate resolution imaging spectroradiometer)

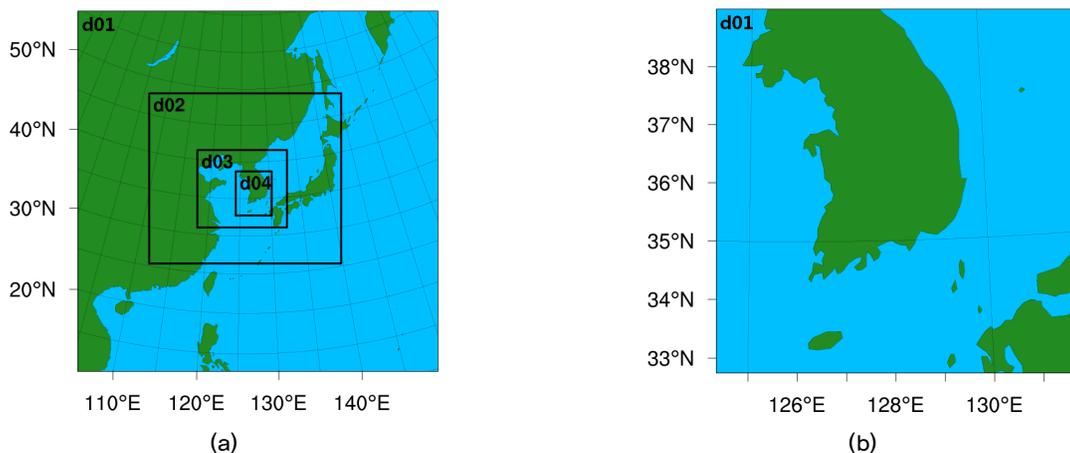


Fig. 1. Model domains for (a) TMY wind resource map, and (b) KLAPS wind resource map

자료를 활용하였다. MODIS는 WRF모델에 내장되어 있어 북한의 지표이용도와 연속적이며 우리나라의 수도권을 포함한 도시지역, 식생 정보 등이 잘 반영되어 있다. KLAPS 풍력기상자원지도 산출모델의 지면모델은 모델 내에서 MODIS와 호환되는 Noah^[18]로 적용하였다.

TMY와 KLAPS 풍력기상자원지도의 산출기간은 각각 1998~2009년의 TMY 기간과 2010~2013년이다. 풍력기상자원지도를 생산하기 위하여 수치모델에서 생산되는 1시간 간격의 U10, V10와 연직 층 별 U, V 성분 자료를 활용하여 지상 10, 50, 80, 100, 120m 고도의 풍속, 풍향 자료를 각각 산출하였다.

2.2 풍력기상자원지도 검증

2.2.1 검증자료

풍력기상자원지도는 풍력발전단지 입지선정을 위해 장기간의 기후적 특성을 갖는 풍황 정보이므로 검증은 최소 1년 이상의 실측한 자료를 이용해야 한다. 우리나라에서는 기상청에서 약 10km 간격의 ASOS(Automated Synoptic Observation System)를 운영하여 바람, 기온 등 기상요소를 관측하고 있다. 그러나 풍력발전고도(풍력발전기의 허브높이, 지상 80m)의 관측은 기상탑 설치 비용, 주변 환경의 제약 조건 등 고려할 사항들이 많아 특정 지점에서만 관측하고 있다.

따라서, 우리나라 전 영역에 대한 풍력기상자원지도의 검증은 ASOS의 관측 자료를 이용하였다. 풍력 발전 고도의 검증은 1년 이상 관측한 고창 풍력자원관측사이트와 서·남해상의 기상탑(Herald of Meteorological and Oceanographic Special Unit-1; HeMOSU-1, Oh *et al.*^[19], Lee *et al.*^[20], 이기남 등^[21])지점의 자료를 이용하였다. 고창 풍력자원관측사이트는 서·남해 해상 풍력발전단지 예정지의 인근 해안가 지점이며, 바람 관측을 목적으로 기상 관측탑(2012년 6월부터 관측 중)과 윈드라이더(Wind LIDAR; Wind Light Detection And Ranging, 2013년 10월부터 2016년 9월까지 관측)를 운영 중이다. HeMOSU-1은 서·남해상 풍력발전단지 예정지에 위치하며 2010년 10월부터 풍력발전고도에서 바람, 기온, 습도, 기압 등을 관측하고 있다^[19,20].

풍력기상자원지도는 1 시간 간격으로 생산된 자료이므로

검증을 위해 각 지점 별로 1 시간 간격으로 10분 평균된 관측자료를 이용하였다. 검증에 사용된 ASOS 관측자료는 ‘기상청 데이터 종합품질관리 지침’에 따라 QC(Quality Control)과정으로 실시간 품질관리(Real-time Quality Control)와 수동 품질관리(Manual Quality Control)가 되었다. 기상탑 자료와 윈드라이더 관측자료는 오프라인의 관측장비이므로 주기적인 현장품질관리와 자료 수집 후 비실시간 품질관리를 적용하였고 HeMOSU-1 자료는 수집 후 비실시간 품질관리를 적용하였다.

2.2.2 검증방법

검증은 각 ASOS 지점 별로 bias와 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하여 풍력자원지도의 오차를 분석하였다. Bias는 모델과 관측의 편차를 알 수 있으며 RMSE는 모델과 관측 간 오차의 절대값을 의미한다. Bias와 RMSE는 식 (1)과 식 (2)을 이용해서 산출하였다.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_M - V_O) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_M - V_O)^2} \quad (2)$$

여기서, V_M 은 관측지점의 풍력기상자원지도 풍속이며 V_O 는 관측지점의 실제 풍속이다. M_i 와 O_i 는 검증 지점의 i 시간의 자료를 의미하며 N 은 검증지점에 비교하는 총 자료 수를 의미한다. 수치모델의 격자지점과 관측지점의 위·경도가 다르기 때문에 각 관측지점을 기준으로 반경 0.013°(≈1.3km) 이내에 포함된 풍력기상자원지도 격자지점들의 풍속 값을 산출하고 이들의 평균된 값을 검증에 사용하였다.

두 풍력기상자원지도의 성능 비교를 위한 검증은 TMY 풍력기상자원지도와 KLAPS 풍력기상자원지도에 대해 TMY 기간과 2010~2013년의 ASOS 관측자료를 이용하여 각각 bias와 RMSE를 산출한 후 비교하였다. 고창 풍력자원관측 사이트에 대한 검증은 풍력기상자원지도 산출 기간과 관측 기간을 고려하여 2013년의 KLAPS 풍력기상자원지도에 대해서 수행하였고 HeMOSU-1지점에 대한 검증은 2011년~2013년의 KLAPS 풍력기상자원지도에 대해 수행하였다.

2.2.3 TMY기간과 2010~2013년의 관측 비교

풍력기상자원지도는 우리나라의 기후적 특징이 반영된 자료이다. 검증은 수행하기 전에, TMY와 KLAPS 풍력기상자원지도의 산출기간은 ‘2. 연구방법’에서 제시한 바와 같이 서로 상이하지만 기후적으로 유사하며 이를 확인하고자 72개의 ASOS 지점에서 실측한 자료를 이용하여 통계값을 각각 산출하여 비교하였다. 평균과 표준편차는 TMY 기간에 $2.11 \pm 1.58 \text{ m s}^{-1}$ 이며 2010~2013년에는 $2.22 \pm 1.56 \text{ m s}^{-1}$ 로서 두 시기는 서로 유사한 통계적(기후적) 특성을 갖는다. 따라서, 장기간의 관측자료를 활용한 풍력기상자원지도의 비교 검증이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 풍력기상자원지도 검증 비교

3.1.1 연, 계절, 주·야간별 검증

Fig. 2는 전체기간(연), 봄, 여름, 가을, 겨울, 주간, 야간

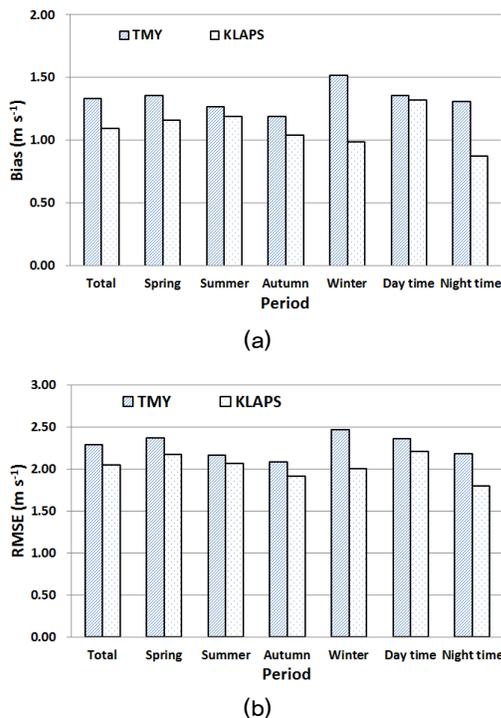


Fig. 2. Comparison of (a) bias and (b) RMSE of wind speed at 10 m height from two wind resource maps against ASOS observation

에 대해 풍력기상자원지도 별로 산출한 bias와 RMSE이다. KLAPS 풍력기상자원지도 오차는 모든 시기에 TMY 풍력기상자원지도에 비해 작게 나타나 지도별 전체기간에 대해 KLAPS 풍력기상자원지도의 bias와 RMSE는 TMY 풍력기상자원지도보다 각각 17.9%(0.24 m s^{-1}), 10.6%(0.24 m s^{-1})가 작았다. 이는 KLAPS 풍력기상자원지도 생산에 사용된 초기 입력 자료의 해상도와 모델 연직 해상도가 TMY 풍력기상자원지도에 적용된 것보다 상세화되어 오차가 감소한 것으로 보인다^[11].

계절별로 살펴보면 오차의 감소는 겨울 > 봄 > 가을 > 여름 순으로 겨울철이 다른 계절보다 오차 감소에 기여한 계절임을 알 수 있다. 겨울철의 bias와 RMSE 감소율은 각각 35.0%(0.53 m s^{-1}), 18.8%(0.46 m s^{-1})로 특히 겨울철 양의 편차가 상당히 감소하였다. 일변화에서는 야간(19~06 LST)에 KLAPS 풍력기상자원지도의 bias가 TMY 풍력기상자원지도보다 33.4%(0.44 m s^{-1}) 작고 RMSE도 17.7% (0.39 m s^{-1}) 작게 나타나 주간에 비하여 개선율이 높았다.

3.1.2 ASOS 지점 별 검증

Fig. 3과 Fig. 4는 TMY와 KLAPS 풍력기상자원지도에 대한 ASOS 지점 별 bias와 RMSE 분포이다. TMY 풍력기상자원지도의 지점 별 bias(Fig. 3a)와 RMSE(Fig. 4a)는 각각 $-1.0 \sim 2.5 \text{ m s}^{-1}$, $1.6 \sim 3.3 \text{ m s}^{-1}$ 이며 KLAPS 풍력기상자원지도의 지점 별 bias(Fig. 3b)와 RMSE(Fig. 4b)는 각각 $-1.2 \sim 2.2 \text{ m s}^{-1}$, $1.5 \sim 3.2 \text{ m s}^{-1}$ 였다.

두 풍력기상자원지도는 대부분의 지역에서 과대평가 되었지만(Figs. 3a~b), KLAPS 풍력기상자원지도는 TMY 풍력기상자원지도에 비해 관측과의 편차는 전반적으로 감소하여 우수한 성능을 나타내었다(Fig. 3c). 또한 RMSE의 경우에도 유사한 경향을 보이며 특히 내륙보다는 해안가 인근지역에서 향상되었음을 알 수 있다(Fig. 4c).

두 풍력기상자원지도 모두 거제와 태백 지점에서는 높은 bias와 RMSE 값을 가진다. 거제지점은 해발고도가 45.6m이며 남쪽방향에 계룡산이 있고 그 주변에는 리아스식 해안으로 둘러싸여 있다. 태백지점은 해발고도가 712.8m이며 주변에는 1000m이상의 높은 산들이 분포한다. 이 지점들은 해발고도와는 상관없이 주변 지형 구조가 복잡하다. 수치모델이 이렇게 복잡한 지형을 현실적으로 반영하지 못하

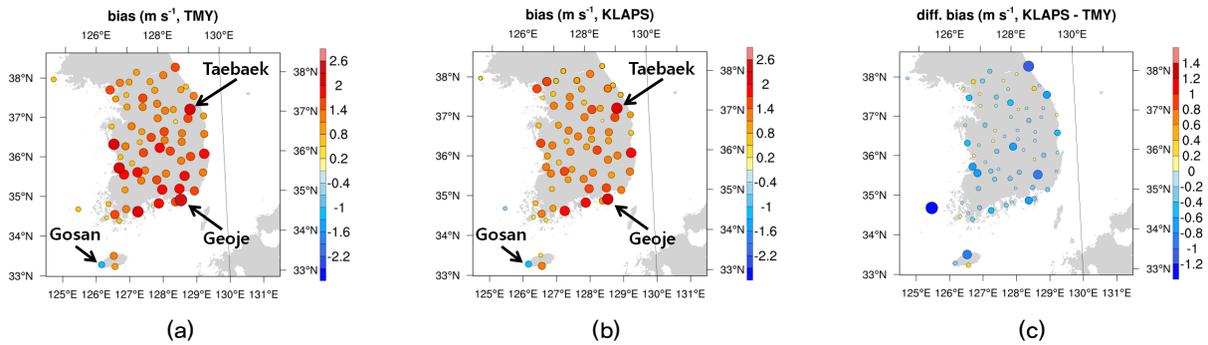


Fig. 3. Distributions bias against ASOS observation for (a) TMY wind resource map, (b) KLAPS wind resource map and (c) difference between two biases

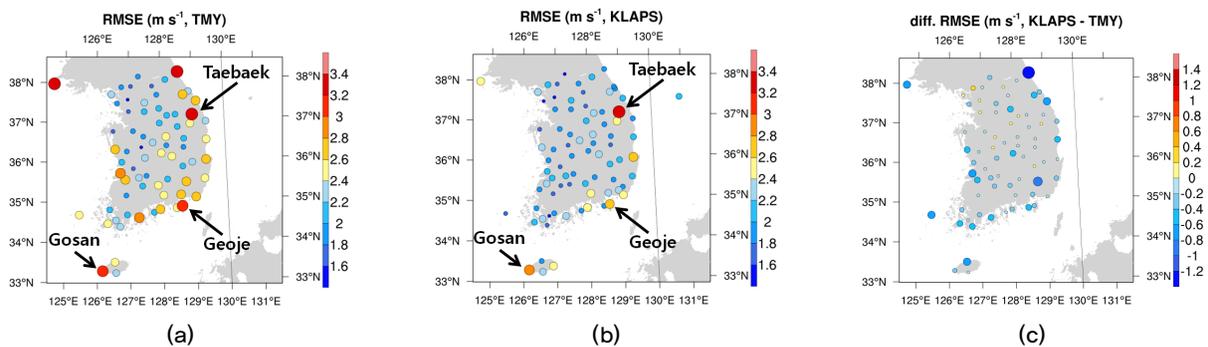


Fig. 4. Same as Fig. 3 but RMSE against ASOS observation

여 타 지점에 비하여 상대적으로 오차가 큰 것으로 판단된다. 하지만 두 풍력기상자원지도를 비교하면 거제와 태백 지점에서도 KLAPS 풍력기상자원지도가 TMY 풍력기상자원지도에 비해 각각 14.2%(0.36m s⁻¹), 2.6%(0.06m s⁻¹)의 bias 감소, 12.7%(0.39m s⁻¹), 2.7%(0.09m s⁻¹)의 RMSE 감소를 보인다.

대부분의 검증지점에서 풍력기상자원지도가 풍속을 과대모의하여 양의 편차를 보이지만 고산 지점은 음의 편차값을 갖는다. 고산 지점은 제주도 서쪽 끝에 폭이 좁은 언덕(수월봉) 위에 위치하며, 특히 서쪽 방향의 지형은 바다와 맞닿은 절벽이다. 해상에서 유입되는 바람이 절벽을 타고 상승되고 지형 정상 부근에서 형성된 수평 바람도 함께 유입되면서 고산 지점의 풍속은 보통 주변보다 강하지만, 수치모델에서 이러한 고산지점의 지형효과를 충분히 표현하지 못하여 풍속을 과소모의하는 것으로 판단된다.

3.1.3 풍력발전고도에서의 검증

Fig. 5는 고창 풍력자원관측사이트에 대한 KLAPS 풍력

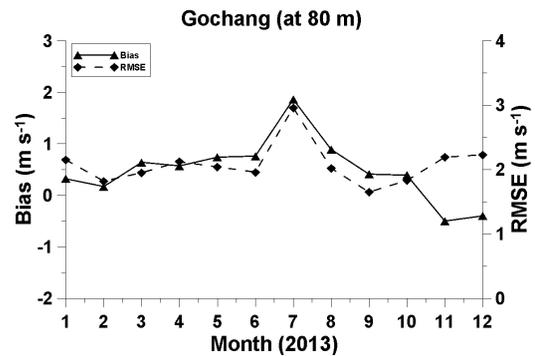


Fig. 5. Monthly averaged bias and RMSE at 80 m height for Gochang observation site obtained from KLAPS wind resource map

기상자원지도의 bias 및 RMSE의 월별 변화이다. Bias와 RMSE의 연평균 값은 각각 0.5m s⁻¹, 2.1m s⁻¹로 ASOS 지점에서의 검증값과 유사하며 국외에서 산출된 풍력자원지도의 오차범위와도 유사한 수준이다^[22,23].

Bias와 RMSE는 뚜렷한 계절변화를 보이지 않지만, bias의 경우 11~12월을 제외하고 양의 값을 보이며 특히 여름철에 다른 계절에 비하여 그 값이 크고 이러한 특징은 7월

에 가장 두드러진다.

RMSE 역시 다른 달에 비하여 7월의 값이 두드러지게 크다. 일반적으로 여름철의 평균풍속이 가장 작다는 점을 고려하면, 풍력기상자원지도에서 나타나는 여름철의 풍속 과대모의 현상은 수치모델이 풍속의 연변동성을 충분히 모의하지 못함을 의미한다고 볼 수 있다.

7월의 강한 풍속 과대모의 경향의 원인을 파악하기 위하여 장마와 관련된 강수의 영향 여부를 분석하였다. 이를 위해 계절별로 강수일과 비강수일을 구분하여, 산포도(Fig. 6)와 Weibull 분포도(Fig. 7)를 통해 풍력기상자원지도의

풍속과 관측된 풍속 간의 상관성을 분석하였다.

Weibull 분포는 Weibull 확률밀도함수(probability density function; PDF, 식 (3))에 따라 산출되었다. 여기서, u 는 풍속을 의미하며, k 는 shape parameter를 A 는 scale parameter를 의미한다.

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (3)$$

총 사례 중 관측값에 비하여 풍력기상자원지도의 풍속이 더 강한 사례의 비율은 여름철에 약 73%, 봄철에 약 64%로

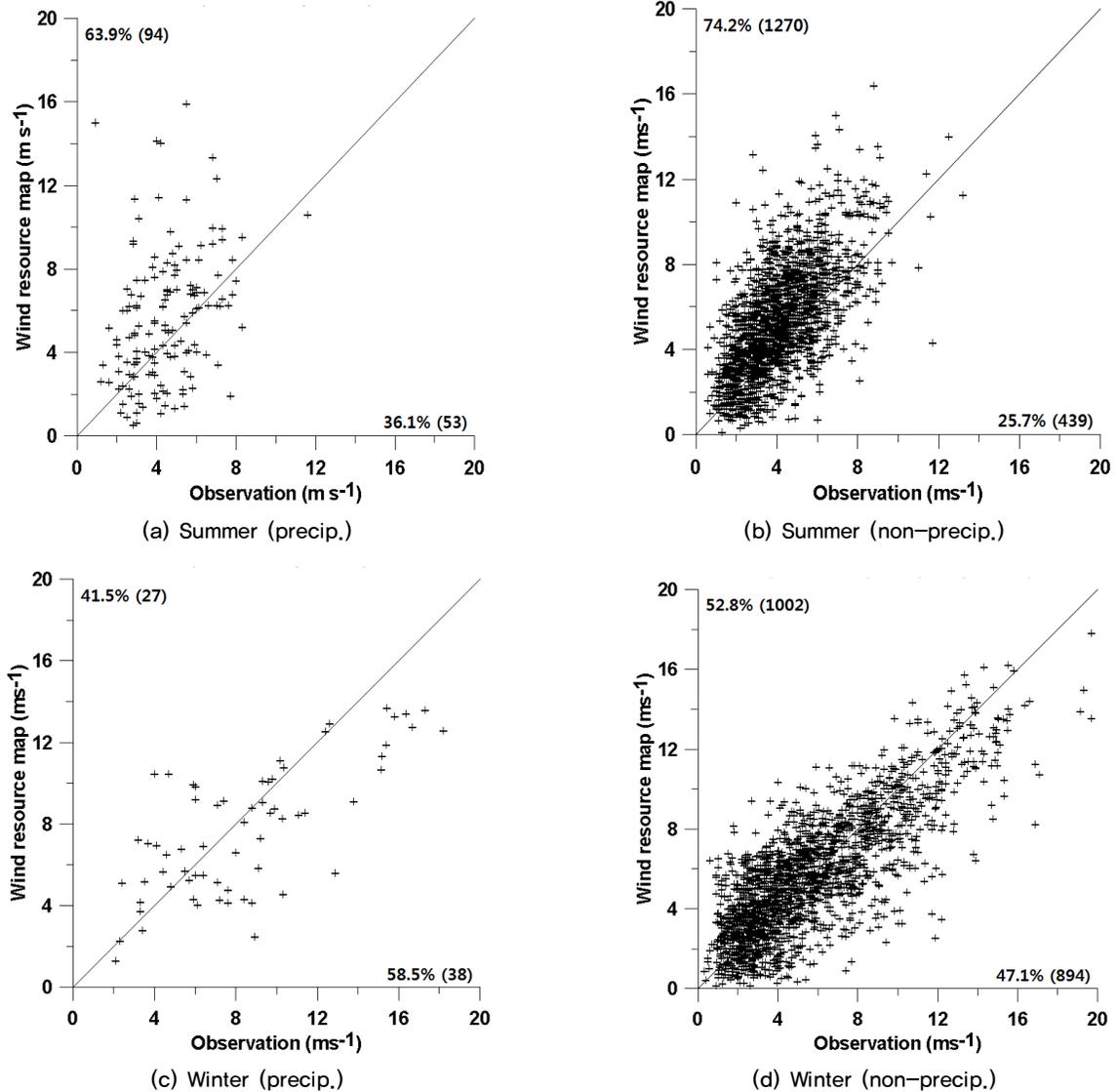


Fig. 6. Scatter plots of observed wind speed versus wind speed from KLAPS wind resource map at 80 m height for precipitation [left] and non-precipitation [right] cases in summer [top] and winter [bottom]

서 가을과 겨울에 비하여 높았다. 여름철의 경우 강수일과 비강수일을 비교하면 강수일의 풍속 과대모의 비율은 64% (Fig. 6a), 비강수일의 풍속 과대모의 비율은 74%(Fig. 6b)로 오히려 비강수일의 과대모의 경향이 더 크게 나타났으며, 따라서 7월의 강한 풍속 과대모의 경향은 강수와 관련이 없는 것으로 분석되었다. 7월 풍속의 오차요인에 대해서 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

강수일과 비강수일의 차이는 봄철에도 여름철과 유사하게 나타났으며(그림 생략), 가을과 겨울은 봄, 여름에 비하여 과대/과소모의 경향이 크지는 않았으나 강수가 있는 경우 과소모의 경향이 있는 것으로 분석되었다(Fig. 6c).

풍속의 Weibull 분포는 여름철과 겨울철이 매우 다른 형태를 보인다. 여름철의 경우 강수일과 비강수일 모두 4 m s^{-1} 안팎의 약한 풍속대의 비율이 가장 높아 양의 왜도(skewness)를 갖는 Weibull 분포를 보이는 반면(Fig. 7a, b), 겨울철의 경우 비강수일에는 여름철과 풍속 분포 형태가 유사하지만 강수일에는 $8\sim 10\text{ m s}^{-1}$ 풍속대의 비율이 커져 정규분포에 가까운 Weibull 분포를 보인다.

관측과 풍력기상자원지도 풍속의 Weibull 분포 간 차이는 다른 계절에 비하여 여름철에 두드러지는데 이는 여름철에 bias와 RMSE가 크게 나타나는 결과와 잘 일치한다. 강수일과 비강수일 모두 $2\sim 6\text{ m s}^{-1}$ 풍속대에서는 관측에 비

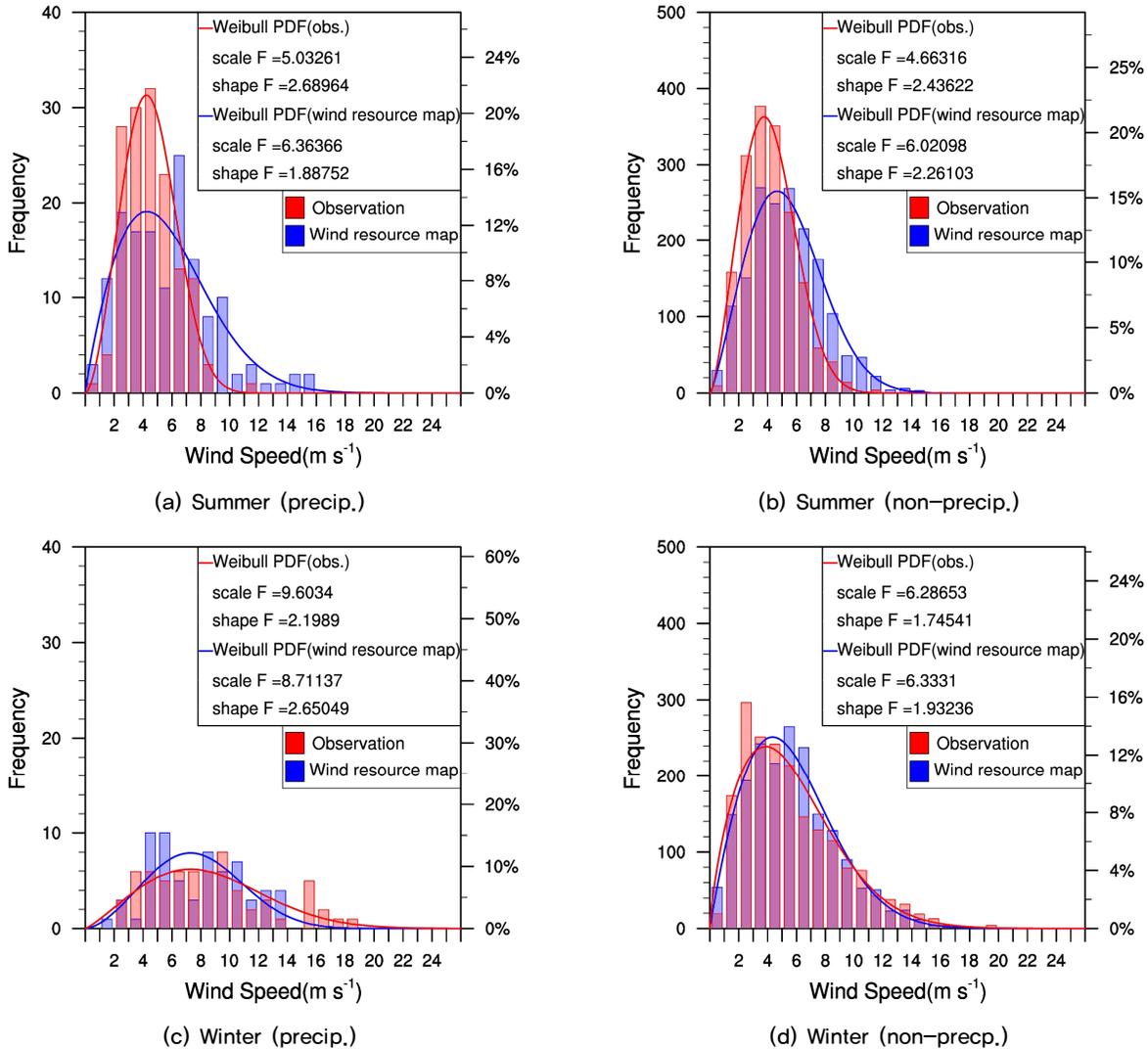


Fig. 7. Weibull distributions of observed wind speed [red] and wind speed from KLAPS wind resource map [blue] at 80 m height for precipitation [left] and non-precipitation cases [right] in summer [top] and winter [bottom]

해 풍력기상자원지도의 바람의 비율이 작고, 6m s^{-1} 이상의 강한 풍속대에서는 그 반대로 풍력기상자원지도 바람의 비율이 커서 관측에 비해 풍력기상자원지도 풍속이 더 낮은 첨도(kurtosis)를 갖는다. 다만 무강수 사례의 경우 풍속에 따라 그 비율이 증가하다가 감소하는 경향이 Weibull 함수로 잘 표현되지만, 강수일의 경우에는 그 사례 개수가 상대적으로 적어서 풍속에 따른 빈도 비율의 변화가 상대적으로 불규칙하며 Weibull 함수로 표현하기 힘들다. 따라서, 강수가 있는 경우의 바람 분석을 위해서는 보다 긴 기간에 대한 자료가 요구된다.

Fig. 8은 HeMOSU-1 지점에 대한 KLAPS 풍력기상자원지도의 bias와 RMSE의 월별 변화이다. Bias와 RMSE의 연평균 값은 각각 -0.2m s^{-1} , 2.0m s^{-1} 였다. HeMOSU-1 관측지점은 해상이므로 열용량이 육상보다 높아서 기온 변화가 적고 거칠기 길이가 0에 가깝다. 따라서, HeMOSU-1 지점의 Bias와 RMSE는 Fig. 5에 비하여 뚜렷한 계절 변동성을 보이지 않는다.

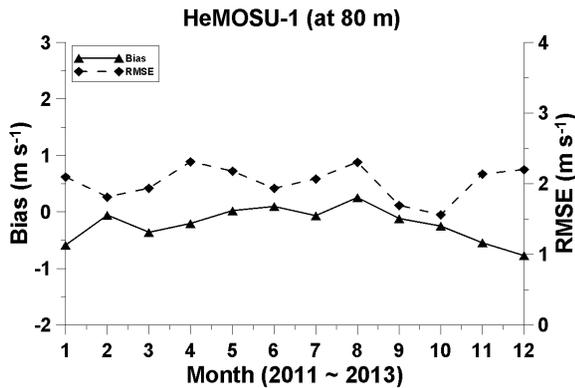


Fig. 8. Same as Fig. 5 but for HeMOSU-1 site located in the south-west sea

3.2 풍력기상자원 특성

3.2.1 연 풍력기상자원

3.1절에서 TMY 풍력기상자원지도에 비하여 KLAPS 풍력기상자원지도의 정확도가 향상되었음을 검증을 통하여 확인하였으며, 따라서 KLAPS 풍력기상자원지도를 이용하여 풍력기상자원의 공간적 분포 특성을 분석하였다.

Fig. 9는 풍력발전고도인 80m에 대한 평균풍속, 최대풍속, 주풍향, 주풍향 비율, $3\sim 25\text{m s}^{-1}$ (풍력발전기의 시동 및 종단풍속 구간) 풍속비율 분포이다. 평균풍속은 동해안과 포항 근해, 남해상, 제주도 해상, 태백산맥, 소백산맥의 정상부에서 7.5m s^{-1} 이상으로 타 지역에 비해 크게 나타났다(Fig. 9a). 해상은 장애물(지형)이 없어 풍속이 육지보다 높으며, 80m 고도의 연평균값을 기준으로 해상(7.0m s^{-1})이 육상(4.9m s^{-1})에 비하여 약 40% 큰 풍속을 보인다(Table 3). 육상의 경우 해발 고도가 높은 산맥의 정상부에서 상층 바람의 영향을 받아 풍속이 강하다.

최대풍속의 경우 서해상과 남해상에 태풍의 영향으로 31m s^{-1} 이상 지역이 분포하며, 육지에서는 전라도 해안지역과 태백산맥, 소백산맥을 따라 최대풍속이 28m s^{-1} 이상 지역이 분포한다(Fig. 9b). 지역 별 주풍향(Fig. 9c)을 분석한 결과 서해상은 북풍과 북북서풍이며, 남해상은 북북서풍과동풍이 주를 이룬다. 내륙지역의 주풍향은 평지, 산맥, 계곡 등의 지형특성에 따라 지역적으로 다양하지만 대체로 북서계열의 바람이 지배적이다. 주풍향의 비율(Fig. 9d)은 해상 5~20%, 육상 5~50%으로 나타났다. 가용한 풍력기상자원과 직접적으로 연관되는 $3\sim 25\text{m s}^{-1}$ 풍속 비율은 전 해상에서 80% 이상이고 해안가, 산맥 정상부는 60% 이상, 내륙은 30~50%로 분석되었다(Fig. 9e).

Table 3. Annual, seasonal, daytime, and nighttime mean wind speed of onshore (land) and offshore (sea) areas at each height (unit : m s^{-1})

Altitude (m, AGL)	Annual		Spring		Summer		Autumn		Winter		Daytime		Nighttime	
	Land	Sea	Land	Sea	Land	Sea								
10	3.7	5.8	4.1	5.7	3.5	4.6	3.4	6.0	3.7	7.0	4.2	5.8	3.1	5.8
50	4.4	6.7	4.9	6.9	4.1	5.8	4.1	6.6	4.6	7.6	4.7	6.7	4.2	6.7
80	4.9	7.0	5.4	7.3	4.6	6.2	4.6	6.8	5.0	7.8	5.0	7.0	4.7	7.0
100	5.1	7.2	5.6	7.5	4.8	6.4	4.8	6.9	5.3	7.8	5.2	7.1	5.0	7.2
120	5.3	7.3	5.9	7.7	5.0	6.6	5.0	7.0	5.5	7.9	5.4	7.2	5.3	7.3

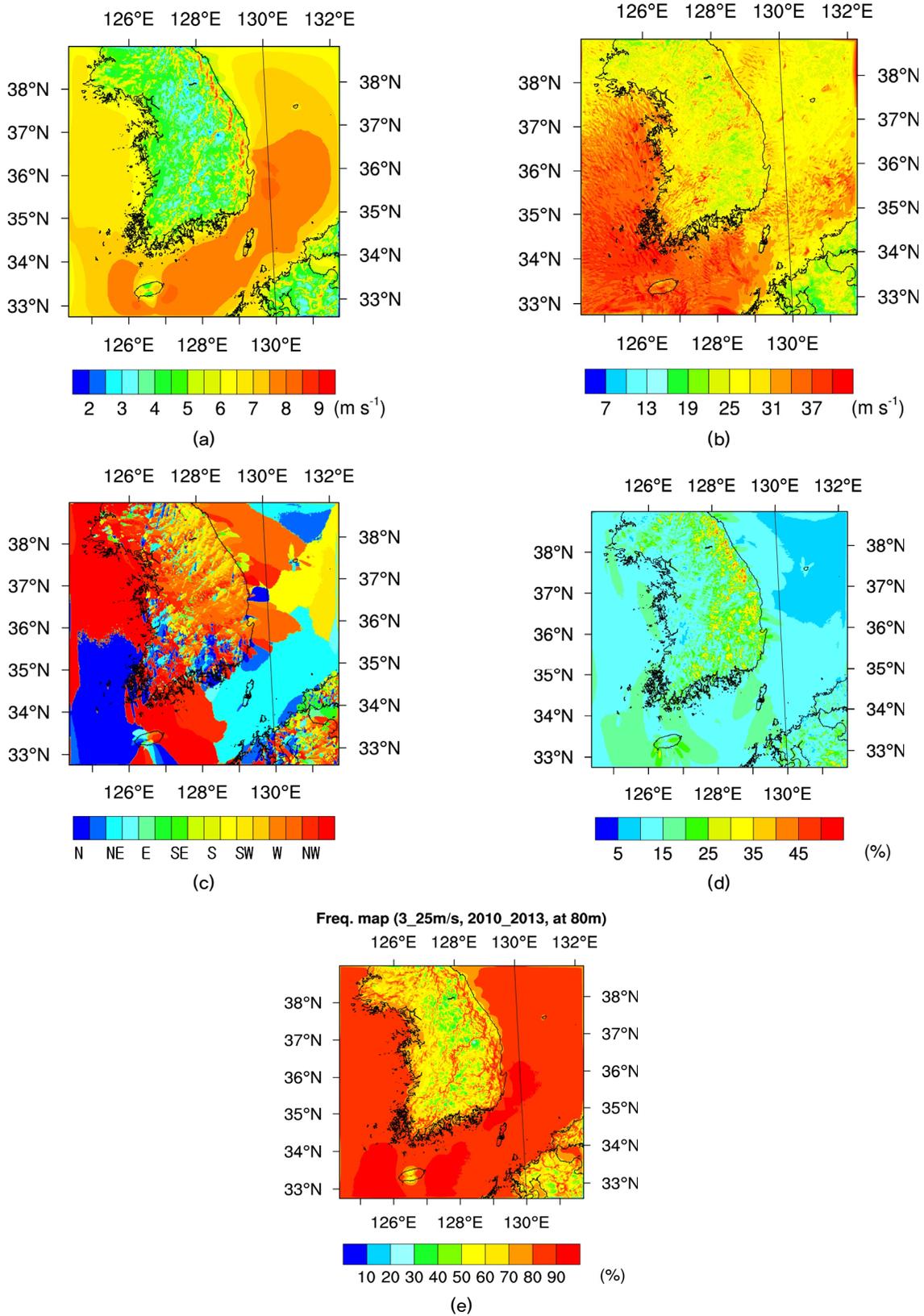


Fig. 9. (a) Mean wind speed, (b) maximum wind speed, (c) prevailing wind directions, (d) frequency of prevailing wind directions, and (e) 3~25 m/s⁻¹ wind speed frequency at 80 m height obtained from KLAPS wind resource map

3.2.2 계절별 풍력기상자원

80m 고도에 대한 계절별 KLAPS 풍력기상자원지도의 평균풍속과 주풍향은 Fig. 10과 Fig. 11과 같다. 우리나라는 계절풍의 영향을 받아 풍향과 풍속은 연중 뚜렷한 변화를 보인다. 계절별로 해상과 육상의 평균풍속을 비교하면 해상 풍속의 세기는 겨울 > 봄 > 가을 > 여름 순이며 육상 풍속은 봄 > 겨울 > 여름 ≒ 가을 순이다(Fig. 10, Table 3).

겨울철은 시베리아 고기압의 영향으로 북서풍이 불며 풍속은 사계절 중에 가장 강하다. 해상은 지형, 식생 등이 분포하지 않아 풍속이 높지만 육상은 지형이 복잡하고 산맥이 주로 남서-북동 방향으로 배치되어 북서풍의 흐름을 가로 막아 풍속은 내륙중심으로 갈수록 약해진다(Fig. 10d, Fig. 11d).

봄철에는 서쪽에서 발달하는 이동성 저기압이 우리나라에 주기적으로 영향을 주어 북서풍과 서풍계열의 바람이 형성되고 풍속은 강해진다. 해상은 북서풍 계열의 바람이 지배적이며 육상은 주로 서풍이 형성되어 지형에 의한 차폐 효과가 북서풍에 비해 약하여 내륙의 풍속은 겨울철보다 높게 나타난다(Fig. 10a, Fig. 11a).

여름철은 북태평양 고기압의 영향을 받아 풍속은 약화되고 육상과 해상의 주풍향은 남풍과 남서풍이 주로 분포한다(Fig. 10b, Fig. 11b). 가을철은 북태평양 고기압의 영향이 점차 감소하고 이동성 고기압의 영향을 받는다. 해상은 북동풍의 비율이 높아져 풍속이 여름철보다 강해지고 육상은 주로 북서풍이 분포하고 풍속이 산맥의 정상부에서 강한 반면에 내륙 중심일수록 약해진다(Fig. 10c, Fig. 11c).

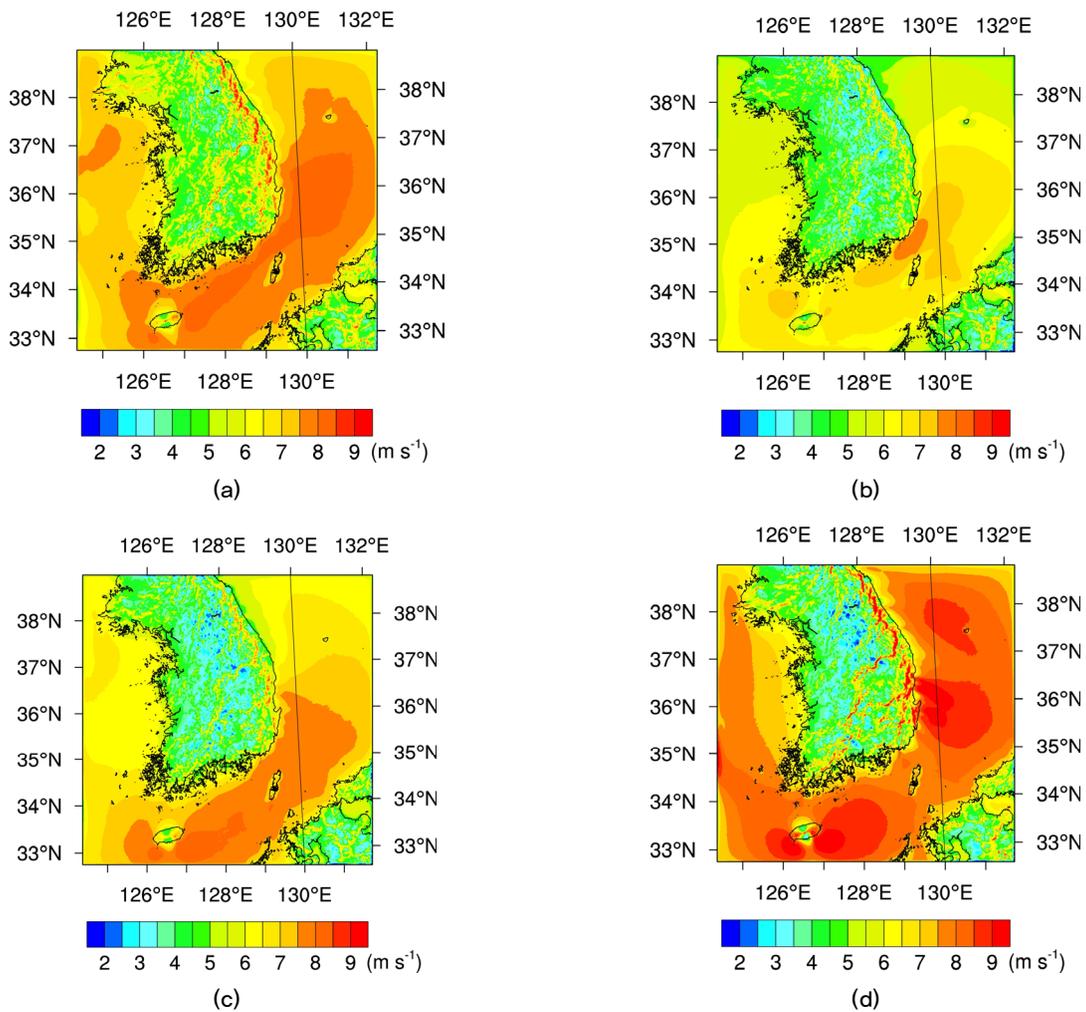


Fig. 10. Seasonal mean wind speed at 80 m height for (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter obtained from KLAPS wind resource map

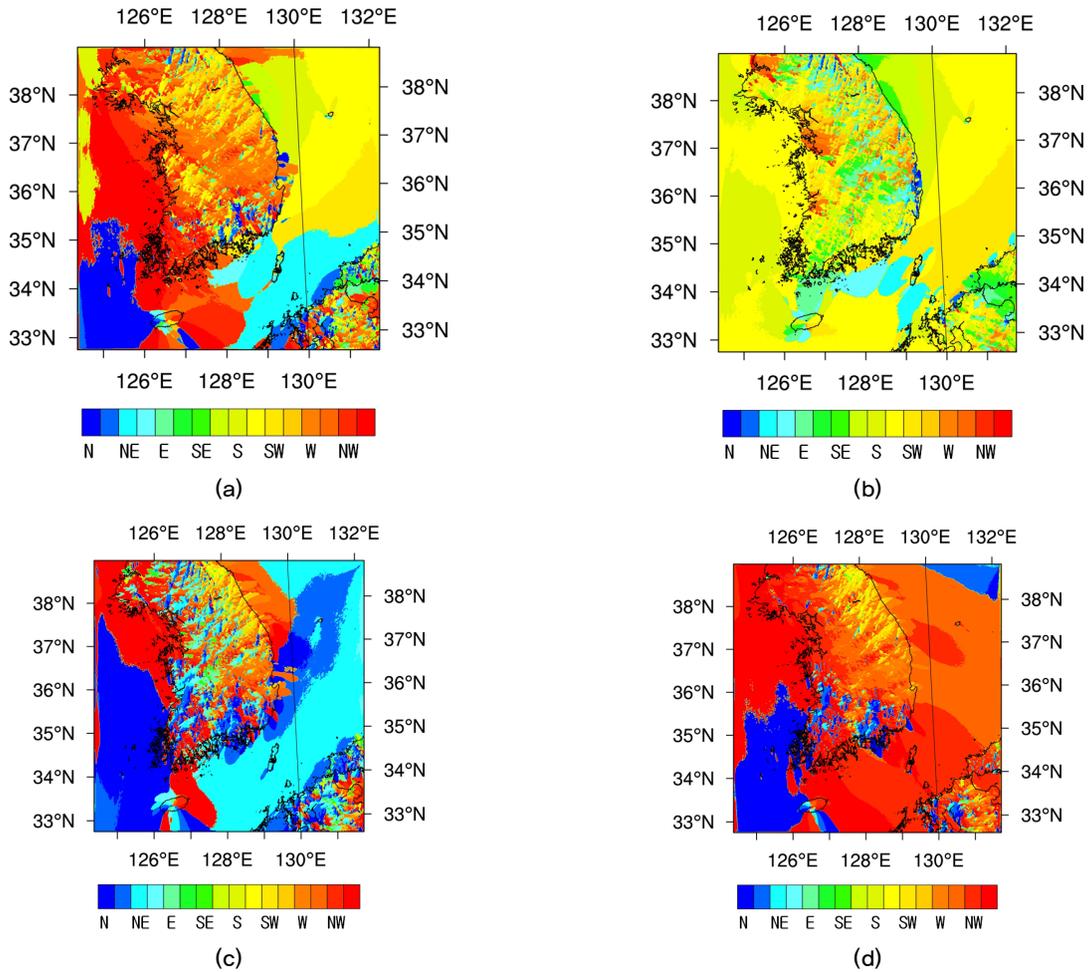


Fig. 11. Same as Fig. 10 but for seasonal mean prevailing wind direction

이러한 결과로 가을철은 여름철보다 풍속이 강한 지역들이 분포하지만 지역간의 풍속 편차가 여름보다 크므로 여름철과 가을철의 육상 평균 풍속은 매우 유사해진다.

3.2.3 주간과 야간의 풍력기상자원

Fig. 12는 지상 10, 80, 120m 고도에 대한 주간(07~18 LST)과 야간(19~06 LST)의 평균 풍속 분포이다. 10m 풍력기상자원지도의 평균 풍속 분포는 지형, 식생 등 장애물에 의해서 저감되고 야간에는 대기가 안정화되면서 풍속이 더욱 감소되므로 10m 고도의 야간 풍속은 대부분 지역에서 주간보다 낮다(Fig. 12a, b). 80, 120m의 풍력기상자원지도는 상층 바람의 영향을 받는 해발고도가 높은 태백산맥 정상부와 해상에서 야간이 주간보다 높다(Fig. 12c, d, e, f). 즉, 야간은 주간보다 내륙 중심의 풍속이 약화되지만 해

발고도가 높은 지역일수록 야간의 풍속이 강해지며 해상에 서도 8.0 m s^{-1} 이상의 강한 풍속 지역이 야간에 더 넓게 분포한다.

Table 3의 육상 전체 평균 풍속에서도 10m 고도 풍속은 야간보다 주간에 높으며 50, 80, 100, 120m 고도의 육상 풍속은 여전히 주간에 높지만 육상에서 거칠기의 영향이 가장 큰 10m를 제외하고 주간과 야간의 풍속 차이는 고도가 높아질수록 감소하였다. 해상에서는 주간과 야간의 풍속이 유의한 차이를 보이지 않는다.

일반적으로 주간에는 태양 복사에 의해 지표면 근처에서 열플럭스가 증가되어 대기층이 불안정해지고 혼합층이 형성되어 고도 간의 풍속차이가 적어진다^[24]. 반면에 야간에는 복사 냉각으로 지표층에 가까운 공기가 냉각되어 대기가 안정화되면서 층류가 형성되므로 고도 간의 풍속 차이가

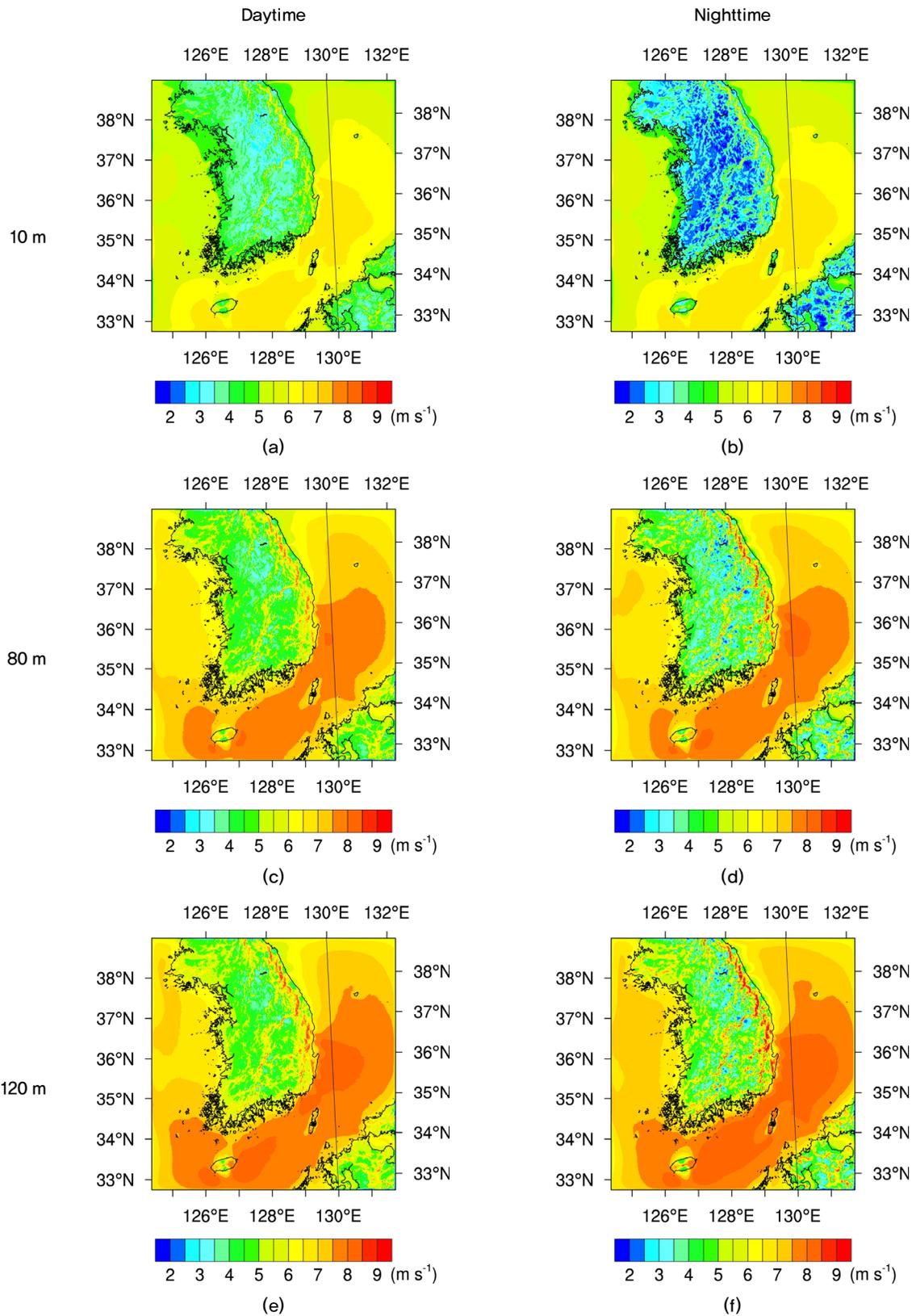


Fig. 12. Mean wind speed at 10 [top], 80 [middle], 120 m [bottom] height during daytime [left] and nighttime [right] obtained from KLAPS wind resource map

커진다. 야간에는 열용량이 적은 육상이 냉각효과가 더 활발히 진행되어 고도 간의 풍속차이는 해상보다 크다. 또한 야간에는 모든 고도에서 고도가 증가할수록 육상과 해상의 풍속차이가 감소한다.

3.3 주요 풍력발전단지의 풍향

Table 4는 KLAPS 풍력기상자원지도의 평균풍속이 가장 높은 10개의 풍력발전단지를 보여준다. 이 풍력발전단지의 평균풍속은 7.8~8.7m s⁻¹ 범위에 분포한다. Archer and Jacobson^[25]는 80m 고도의 풍속으로 바람 등급(wind class)를 구분하였으며(Table 5), class 7이면 풍력자원이 가장 풍부하고 class 1이면 풍력자원이 가장 낮아 풍력발전단지로서 적합하지 않다고 하였다. 이 바람 등급을 참고하여 풍력발전단지의 바람 등급을 살펴보면 모든 단지가 class 4 이상이다.

이 지점들 중 5곳이 1,000m 이상 고도에 위치하고 있어 해발고도가 높은 곳에 위치한 풍력발전단지들의 풍력자원이 풍부한 것을 알 수 있다. 최대풍속은 26.3~33.5m s⁻¹로 풍력발전기의 중단속도인 25m s⁻¹이상이므로 풍력발전 운영 중에는 중단 속도 이상의 바람에 대한 모니터링이 필요할 것으로 판단된다. 상위 10개 풍력발전단지들의 주풍향은 서풍계열이다. 주풍향의 비율은 연 24~44%이므로 주풍향의 바람이 연간 3개월 이상 형성되는 것을 알 수 있다. 전체 기간에 대한 풍속의 분포로서 Weibull PDF의 shape

parameter(형상계수)는 1,476~2,223이고, scale parameter(척도계수)는 8,909~9,567m s⁻¹로 분석되었다. 이는 풍력발전기 가동이 가능한 풍속 구간인 3~25m s⁻¹의 풍속 분포 비율은 연 80~91%으로 이는 연간 최소 9~11개월 동안에 풍력에너지를 생산할 수 있는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 수치모델을 기반으로 풍력기상자원지도를 생산하고, 두 가지 상이한 방법을 통하여 생산된 풍력기상자원지도의 정확도를 ASOS 관측자료를 이용하여 비교 검증하였다. KLAPS 풍력기상자원지도는 TMY 풍력기상자원지도에 비하여 고해상도의 입력자료를 사용하여 ASOS 지점의 평균 bias와 RMSE가 각각 17.9%(0.24m s⁻¹),

Table 5. Classification of wind energy at 80 m^[25]

Wind class at 80 m	Criteria
Class 1	0 ~ V < 5.9 ms ⁻¹
Class 2	5.9 ≤ V < 6.9 ms ⁻¹
Class 3	6.9 ≤ V < 7.5 ms ⁻¹
Class 4	7.5 ≤ V < 8.1 ms ⁻¹
Class 5	8.1 ≤ V < 8.6 ms ⁻¹
Class 6	8.6 ≤ V < 9.4 ms ⁻¹
Class 7	9.4 ms ⁻¹ ≤ V

Table 4. Wind data at 80 m height estimated by KLAPS wind resource map for top 10 wind farms

Wind farm	Tae baek	Mae bong san	Yeong deok	Yeong yang	Chang Juk	Dae gwal lyeong	Yang Yang	Gang won	Ha jang	Gyeong ju
Altitude (m)	1022	1239	153	725	1132	832	924	1094	1199	537
Mean WS (m s ⁻¹)	8.7	8.5	8.5	8.5	8.4	8.4	8.1	8.1	8.0	7.8
Maximum WS (m s ⁻¹)	33.5	30.4	26.3	26.6	31.6	32.2	29.8	31.3	27.7	27.9
Prevailing WD ¹⁾	W	W	W	W	W	W	W	WSW	W	WNW
Frequency (Prev. WD ¹⁾ , %)	44	24	31	34	26	36	34	33	42	25
Frequency (3 ~ 25 m s ⁻¹ , %)	80	84	91	88	81	81	80	82	89	91
Weibull ²⁾ shape parameter	1,498	1,629	2,120	2,045	1,563	1,566	1,476	1,567	1,994	2,223
Weibull scale parameter (m s ⁻¹)	9,500	9,399	9,567	9,501	9,278	9,233	8,909	8,948	8,980	8,910
Wind class	class 6	class 5	class 5	class 5	class 5	class 5	class 5	class 5	class 4	class 4

Prevailing WD¹⁾ : Wind classes were defined by for 16 direction sectors (N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW)

Weibull²⁾ : Weibull probability density function

10.6%(0.24m s⁻¹) 감소하는 개선효과를 보였다. 특히, bias와 RMSE의 감소폭은 겨울철과 야간에 높았다. 고창 풍력자원관측사이트에서의 풍력발전고도(80m)에서 KLAPS 풍력기상자원지도를 검증한 결과 bias 및 RMSE는 각각 0.5 m s⁻¹, 2.1m s⁻¹로 국외에서 산출된 풍력자원지도와 유사한 수준으로 분석되었다. HeMOSU-1 지점은 bias와 RMSE가 각각 -0.2m s⁻¹, 2.0m s⁻¹로 나타났다.

산출된 풍력기상자원의 공간분포 특성을 분석한 결과 육상에서는 해발고도가 높은 지역, 그리고 육상보다는 해상에서 평균 풍속, 최대 풍속이 평균적으로 높게 분포하였다. 내륙의 주풍향은 남서풍과 서풍이며, 서해와 남해에서는 북풍계열의 바람이 주를 이루었다. 계절별로는 육상의 경우 계절풍과 지형의 영향으로 봄 > 겨울 > 봄 ≒ 가을 순으로 평균풍속이 강하며 해상에서는 겨울 > 봄 > 가을 > 여름 순으로 풍속이 강하게 나타났다. 평균적으로 육상에서는 주간의 풍속이 야간보다 높게 분포하였는데 주야간의 풍속 차이는 고도에 따라 감소하였다. 또한 해상에서는 주야간의 풍속 차이가 거의 존재하지 않는 특징을 보인다.

풍력기상자원지도로부터 풍력발전단지 지점들에 대한 풍향 정보를 산출하고 평균 풍속이 높은 10개 지점의 특성을 분석하였다. 10곳 모두 바람 등급이 class 4 이상으로 분류되었으며, 그 중 5개 지점은 해발고도는 1,000m 이상의 고지대로 주로 서풍이 부는 지점이었다. 풍력발전단지에서 풍력에너지 생산이 가능한 3~25m s⁻¹ 풍속 비율은 80~91% 범위에 분포하였다.

이처럼 풍력기상자원지도를 활용하면 풍력발전단지 뿐만 아니라 풍력발전단지 예정지 및 가능지역에 대한 풍향 정보들을 손쉽게 수집할 수 있다. 이러한 풍향 정보는 풍력발전단지 개발을 위한 사전조사에 활용할 수 있을 것이다. 그 외에도 토목, 건설, 환경, 항공 등 다양한 분야에 풍향 자료를 참고자료로서 이용할 수 있기 때문에 그 활용 가치를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 연구개발 사업 “기상업무지원 기술개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] GWEC, 2016, “Global Wind Report : Annual market update 2015”, Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2015-annual-market-update/>.
- [2] GWEC, 2007, “Global Wind 2006 Report”, Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-2006-report/>.
- [3] Kim, T. Y., Park J.-I., and Maeng J. H., 2016, “Offshore wind farm site selection study around Jeju island, South Korea”, *Renew. Energy*, **94**, 619-628.
- [4] 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 김동혁, 최현정, 2006, “수치바람모의에 의한 저해상도 국가바람지도의 구축”, *한국태양에너지학회논문집*, **26(4)**, 31-38.
- [5] 김현구, 2008, “남한 풍력자원 잠재량의 예비적 산정”, *한국태양에너지학회 논문집*, **28(6)**, 1-7.
- [6] 이순환, 이화운, 김동혁, 김민정, 김현구, 2009, “한반도 풍력자원지도의 공간해상도가 풍력자원 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구”, *한국환경과학지*, **18(8)**, 885-898.
- [7] 김현구, 강용혁, 2012, “한반도 풍력자원지도-2010년판”, *한국풍공학학회논문집*, **16(4)**, 167-172.
- [8] 김현구, 강용혁, 윤창열, 2015, “상업용 남한 풍력자원지도의 비교분석”, *한국풍공학회지*, **19(1)**, 11-16.
- [9] 변재영, 최영진, 서범근, 2010, “중규모 모델 WRF로부터 모의된 한반도 풍력-기상자원 특성”, *대기지*, **20(2)**, 195-210.
- [10] 김혜중, 김현식, 최영진, 변재영, 2010, “통계적 바람장 모형에 의한 고해상도 (1km×1km) 풍력에너지지도 작성에 관한 연구”, *응용통계연구*, **23(6)**, 1157-1167.
- [11] Xue, Y., Janjic, Z., Dudhia, J., Vasic, R., and Sales, F. D., 2014, “A review on regional dynamical downscaling in intraseasonal to seasonal simulation/prediction and major factors that affect downscaling ability”, *Atmos. Sci.*, **147-148**, 68-85.
- [12] 김용상, 박옥란, 황승언, 2002, “기상연구소의 국지규모 기상 분석 및 예측시스템(KLAPS)의 실시간 운영”, *한국기상학회지*, **38(1)**, 1-10.
- [13] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W. and Powers, J. G., 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 pp.
- [14] Mellor, G. and L., Yamada, T., 1974, “A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers”, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- [15] Smirnova, T. G., Brown, J. M., Benjamin, S. G., and Kim, D. S., 2000, “Parameterization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme”, *J. Geophysic. Res.*, **105(D3)**, 4077-4086.
- [16] Lim, K.-S. and Hong, S.-Y., 2010, “Development of effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models”, *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1578-1612.
- [17] Avissar, R., and Pielke, R. A., 1989, “A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology”, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2113-2136.
- [18] Chen, F., and Dudhia, J., 2001, “Coupling an advanced land surface-hydrology model with Penn State –NCAR MM5 modeling system. Part I: Model Implementation and Sensitivity”, *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- [19] Oh, K.-Y., Kim, J.-Y., Lee, J.-S., and Ryu, K.-W., 2012, “Wind resource assessment around Korean Peninsula for feasibility study on 100MW class offshore wind farm”, *Renew. Energy*, **42**, 217-226.
- [20] Lee, M. E., Kim, G. W., Jeong, S.-T., Ko, D. H., and Kang, K. S., 2013, “Assessment of offshore wind energy at Younggwang in Korea”, *Renew. and Sustainable Energy Rev.*, **21**, 131-141.
- [21] 이기남, 김동현, 권오순, 2014, “HeMOSU-1호 관측풍속의 불확실성을 고려한 서남해안의 풍력 발전량 예측”, *신재생에너지*, **10(2)**, 19-28.
- [22] Kotroni, V., Lagouvardos, K., and Lykoudis, S., 2014, “High-resolution model-based wind atlas for Greece”, *Renew. and Sustainable Energy Rev.*, **33**, 479-489.
- [23] Carvalho, D., Rocha, A., Gomez-Gesteira, M., and Santos, C. S., 2014, “WRF wind simulation and wind energy production estimated forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal”, *Appl. Energy*, **117**, 116-126.
- [24] Gualtieri, G., 2016, “Atmospheric stability varying wind shear coefficients to improve wind resource extrapolation: A temporal analysis”, *Renew. Energy*, **87**, 376-390.
- [25] Archer, C. L. and Jacobson, M. Z., 2005 “Evaluation of global wind power”, *J. Geophysic. Res.*, **110**, D1211D, doi10.1029/2004JD005462.