

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.9.735>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 풍력단지개발 예비타당성 평가를 위한 WRF 모델의 풍황자원 예측 정확도 검증

허수영\* · 김범석\*\* · 허종철\*\*\*

\* 제주대학교 풍력특성화협동과정, \*\* 제주대학교 풍력공학부, \*\*\* 제주대학교 기계공학부

### Verification of the Validity of WRF Model for Wind Resource Assessment in Wind Farm Pre-feasibility Studies

Sooyoung Her\*, Bum Suk Kim\*\* and Jong Chul Huh\*\*\*

\*Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju Nat'l Univ.,

\*\*Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju Nat'l Univ.,

\*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Jeju Nat'l Univ.

(Received March 3, 2015 ; Revised June 10, 2015 ; Accepted June 19, 2015)

**Key Words:** Weather Research and Forecasting model(WRF 모델), Wind Resource(풍황자원), Wind Atlas Analysis and Application Program(WAsP), Meteorological Prediction Data(기상예측자료), Wind Farm Pre-feasibility Study(풍력단지개발 예비타당성 평가), Weibull Distribution(와이블분포)

**초록:** 본 논문에서는 국지적 기상현상의 모사가 가능하고 AWS, 기상탑, 또는 위성자료의 입력이 필요치 않은 WRF 기상수치모델을 이용하여, 풍력단지의 풍황자원 예측정확도 및 적용타당성을 비교·검증하고자 한다. 풍력단지개발 예비타당성단계에서 요구되는 풍황자원 예측을 위한 WRF 모델의 적용타당성검증을 위해, 기상탑 풍황측정자료와 WAsP에 의한 풍황자원 예측결과와의 비교·검증을 수행하였고 제주도 북서쪽에 위치한 평대와 우도사이트를 비교·검증용 사이트로 선정하였다. 연·월평균풍속, 와이블분포, 연간발전량 및 바람장미의 예측결과가 실측자료와 비교·검증되었고 WRF 모델의 풍황해석결과는 WAsP의 결과에 비해 높은 예측 정확도를 나타내었다. 풍력단지개발 예비타당성 평가를 위한 WRF 모델의 풍황자원 예측가능성이 최종적으로 확인되었다.

**Abstract:** In this paper, we compare and verify the prediction accuracy and feasibility for wind resources on a wind farm using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, which is a numerical weather-prediction model. This model is not only able to simulate local weather phenomena, but also does not require automatic weather station (AWS), satellite, or meteorological mast data. To verify the feasibility of WRF to predict the wind resources required from a wind farm pre-feasibility study, we compare and verify measured wind data and the results predicted by WAsP. To do this, we use the Pyeongdae and Udo sites, which are located on the northeastern part of Jeju island. Together with the measured data, we use the results of annual and monthly mean wind speed, the Weibull distribution, the annual energy production (AEP), and a wind rose. The WRF results are shown to have a higher accuracy than the WAsP results. We therefore confirmed that WRF wind resources can be used in wind farm pre-feasibility studies.

#### 1. 서론

높은 경제성을 갖는 풍력발전단지의 개발을 위

해서는 바람자원이 우수한 입지선정이 매우 중요하다. 이를 위해 다수의 후보 사이트(site)에 대한 풍황자원 조사 및 분석이 선행되며, 최종 선정된 사이트의 정확한 풍황자원평가를 위해 풍력터빈의 허브(hub) 높이에서 바람자원을 측정할 수 있는 기상탑

† Corresponding Author, [bkim@jejunu.ac.kr](mailto:bkim@jejunu.ac.kr)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

(meteorological mast)을 설치하여 장기간 운용을 통해 측정자료를 수집하게 된다. 사전풍황자원조사 단계에서도 허브높이에 해당하는 기상탑 설치 및 운용을 통해 신뢰성 높은 측정자료를 확보하는 것이 이상적이나, 다수의 후보지역에 대한 풍황측정은 많은 비용과 시간이 소요되므로 현실적으로 불가능하다. 따라서 대부분의 풍력발전단지개발 프로젝트는 예비타당성조사를 통해 선정된 최종 개발후보지에 대한 풍황자원 측정을 수행하는 것이 일반적이다. 예비타당성조사 단계에서는 후보지역에 인접한 위치의 기상청 AWS(Automatic Weather System), 기상탑 또는 위성자료를 이용하여 후보사이트들의 풍황자원 분석을 수행한다.

황윤석 등<sup>(1)</sup>은 AWS와 지면높이 40m에 설치된 기상탑으로부터 측정된 연평균풍속을 비교한 연구를 통해, 평균오차율이 10% 이내임을 밝힌 바 있다. AWS 자료는 기상청을 통해 비교적 쉽게 확보할 수 있지만, 표준 측정높이가 10m에 불과하여 풍력터빈의 허브높이까지 풍속보정이 필요하기 때문에 높이 차로 인한 풍속보정 불확도가 존재한다. 또한 우리나라는 전국적으로 471개소의 자동기상관측장비(AWS)를 운영하고 있으나, 풍력단지개발자가 원하는 특정지역의 풍황자원 분석에 적용하기에는 그 분포범위가 여전히 광범위한 상황이다.

오현석 등<sup>(2)</sup>에 의해 수행된 연구결과에서는 풍력발전단지 후보지역과 기상탑 사이의 거리가 10km 이상 떨어진 경우, 후보지역에서 예측된 풍황특성의 오차범위가 비교적 크게 나타난다고 밝히고 있다. 즉, 인근지역의 기상탑 측정자료를 보유하고 있더라도 후보지역에서 10km 이상 떨어져 있을 경우 다소 높은 예측오차가 발생할 가능성이 크다.

위성자료는 광범위한 지역에 대한 기상정보를 가지고 있기 때문에 기상탑을 설치하기 어려운 해상지역 등에 대한 자료 확보에 유리하다. 경남호 등<sup>(3)</sup>은 QuikSCAT(Quick Scatterometer) 자료 분석에 관한 연구를 수행하였으며, QuikSCAT의 측정주기가 하루 2회에 불과하여 종관적인(synoptic) 풍황특성만을 파악할 수 있는 단점이 있으며, diurnal scale보다 작은 scale 해석이 요구되는 풍력발전단지에 대한 풍황분석에는 적용한계를 갖는다고 보고하였다. 또한 김병민 등<sup>(4)</sup>은 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 재해석 자료를 이용하여 해상풍력자원 예측에 대한 연구를 수행했으며, AWS 자료와 비교했을 때 적용지역에 따라 평균풍속오차율이 1.01 ~

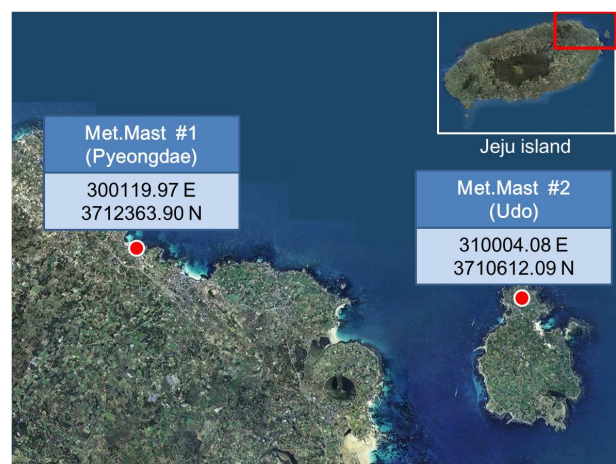
8.94%로 차이가 발생할 수 있음을 보고하였다.

국내에서는 풍력발전단지 후보지역의 풍황자원 예측을 위해 주로 WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program) 등과 같은 국소지역 풍황자원 해석소프트웨어에 의존하고 있다. 그러나 WAsP은 AWS 자료, 위성자료 또는 기상탑 자료 등과 같은 측정 자료의 입력이 필요하며, 국소지역의 산악지형, 표면 거칠기, 그리고 주변장애물에 대한 영향만을 고려하기 때문에 국지적인 기상현상에 대한 영향은 고려되지 않는다.<sup>(5,6)</sup> 또한 상기 기술한 바와 같이 기상탑과 후보지역과의 거리가 일정수준 이상일 경우, 다소 큰 예측 오차율이 발생할 수 있는 단점도 존재한다. 이에 반해 기상수치모델은 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 등의 기관에서 기상자료를 무료로 제공하고 있으며, 종관적인 기상현상을 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 국지적 기상현상의 모사가 가능하고 AWS 자료, 위성자료 또는 기상탑 자료의 입력이 필요치 않은 WRF (Weather Research and Forecasting) 기상수치모델을 이용하여, 풍력발전단지의 풍황자원 예측정확도 및 적용타당성을 비교·검증하고자 한다.

**Table 1** Coordinate system and location of Pyeongdae and Udo meteorological mast

Site	Coordinate system	Location
Pyeongdae	UTM WGS84 52zone	300119.97 E 3712363.90 N
Udo		310004.08 E 3710612.09 N



**Fig. 1** The position of Pyeongdae and Udo site

## 2. 풍황자원 해석

### 2.1 비교·검증 사이트 선정

본 연구에서는 제주도 북서쪽에 위치한 평대와 우도를 비교·검증용 사이트로 선정하였다. Fig. 1과 Table 1에 각 사이트 위치 및 좌표정보를 나타내었다. 평대와 우도사이트는 해안에 인접하고 있으며, 주변지역에 민가 등과 같은 장애물이 존재하지 않고, 평평한 지형을 이루고 있다. 두 지점의 거리는 약 10km로 인접해있지는 않지만 유사한 외부환경조건을 나타내고 있어<sup>(7)</sup> 정확도 높은 해석결과의 확보를 통한 신뢰성 있는 비교·검증이 가능 할 것으로 판단된다.

우도 및 평대에 설치된 기상탑의 60m, 58m, 50m, 40m, 30m 높이에 NRG #40 컵형 풍속계가 설치되었고, 60m, 40m 지점에 NRG #200P 풍향계가 설치되었다. 우도지점의 풍황자료 측정기간은 2010. 4. 30 ~ 2012. 1. 1이고, 평대지점은 2010. 2. 6 ~ 2012. 4. 1 이다. 풍황특성은 측정된 기간에 따라 달라질 수 있기 때문에 동일한 측정기간의 비교가 타당하며, 본 연구에서는 두 지점 모두에서 2010. 8. 1 ~ 2011. 7. 31의 기간 동안 측정된 자료를 이용하였다.

### 2.2 WRF 모델에 의한 풍황자원 예측

중규모급 기상수치모델인 WRF는 국립해양대기청(NOAA), 국립대기연구센터(NCAR), 그리고 150 곳 이상의 미국 및 해외대학 컨소시엄을 통해 개발된 수치모델이다.<sup>(8)</sup> 또한 Munoz-Esprza 등<sup>(9)</sup>은 기상탑을 이용한 측정가능높이의 한계를 보완하기 위해 WRF 모델의 planetary boundary layer 조건에 따른 해상풍속 수직분포 예측정확도에 관한 연구를 진행한 바 있다. WRF 모델은 이상과 같은 연구결과를 통해 기상탑의 측정높이한계 등의 단점을 보완할 수 있기 때문에 본 연구에서의 중규모 기상수치모델로 선정되었다.

수치해석 영역(domain)은 Fig. 2와 같이 총 4개로 구성되었으며, 1번 영역은 한반도 전체의 기상현상을 모사할 수 있도록 설정되었다. 해석영역 1번으로부터 얻어진 결과는 nesting 법<sup>(10)</sup>을 이용하여 하위영역(2번~4번)에 반영되도록 하였으며, 최종적으로 4번 영역에 해당하는 제주도 전 지역에 대한 기상예측을 수행하였다. WRF 모델은 해석격자 크기의 상위영역과 하위영역 비율을 1:3으로 추천하고 있고,<sup>(8)</sup> 한반도에서 발생하는

Table 2 Simulation condition of WRF model

Variable	Physics scheme
Microphysics	WSM6 (WRF Single-Moment 6-class)
Longwave Radiation	RRTM scheme (Rapid Radiative Transfer Model)
Shortwave Radiation	Dudhia
Planetary Boundary layer	YSU PBL (Yonsei University PBL)
Surface Layer	MM5 Monin-Obukhov scheme
Land Surface	5-layer thermal diffusion

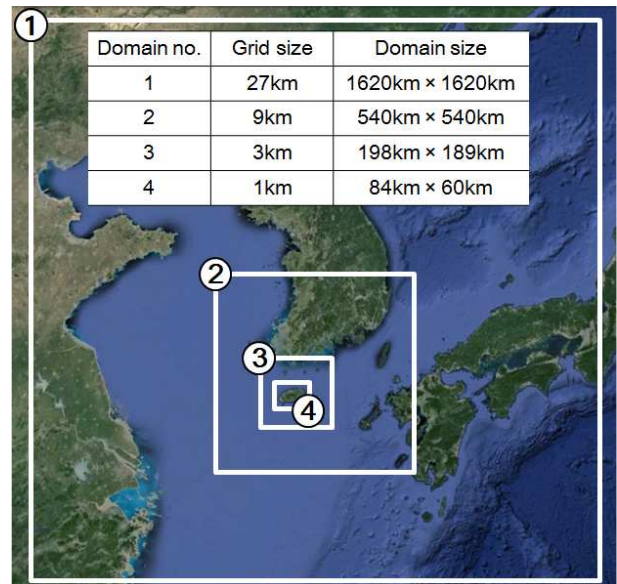


Fig. 2 Configuration of analysis domain

큰 규모의 기상현상을 상위영역에서 구현하여 하위영역에 그 영향력을 전달하기 위해서 격자 해상도를 27km, 9km, 3km, 1km로 구성하였다.

WRF 모델에 의한 예측결과는 physics scheme에 의해 많은 영향을 받기 때문에 신중하게 적용되어야 한다. 본 연구에서는 ㈜에코브레인<sup>(11)</sup>에서 제시한 제주도 지역에 최적화된 WRF 모델의 physics scheme을 적용하였으며, Table 2에 나타내었다.

초기조건 및 경계조건으로써 NCEP에서 제공하는 위·경도 격자간격이 1°×1°의 해상도로 구성된 GFS(Global Forecast System) 자료를 이용하였다. 이는 10mb ~ 1,000mb까지 수직방향으로 26층으로 구성되어 온도, 풍속, 상대습도 등의 기상정보를 보유하고 있다.

WRF 모델에 의한 기상예측기간은 2010. 8. 1 ~ 2011. 7. 31 이며, 예측된 지면높이는 기상탑 측정높이와 같은 60m로 설정하였다.

### 2.3 WAsP을 이용한 국소지역 풍황자원 예측

WRF 기상수치모델을 이용한 풍력발전단지 풍황특성 예측결과의 비교·검증을 위해, WAsP을 이용하여 동일한 지역에 대한 풍황해석을 수행하였다. WAsP은 국소지역 풍황자원 해석소프트웨어로써 1987년 덴마크의 Risø 국립연구소에서 개발되어 풍력발전단지설계 분야에서 널리 사용되고 있다. 해석에 사용된 지형자료는 국토지리정보원으로부터 확보된 자료이고, 표면거칠기는 환경공간정보서비스에서 제공되는 자료를 바탕으로 생성하였다. WAsP과 WRF에 입력된 지형과 표면거칠기 자료는 모두 동일하게 적용 되었다.

상기 기술한 바와 같이, WAsP을 이용한 해석을 위해서는 인근지역에서의 풍황측정자료가 필요하다. 평대지점의 풍황자원 예측 시에는 우도지점의 기상탑 자료를 입력 자료로 사용했고, 우도지점의 풍황자원 예측 시에는 평대지점의 기상탑 자료를 적용하였다. WAsP이 추정하는 지면높이는 60m로써 WRF 모델과 동일하게 설정하였다.

### 2.4 풍황자원 예측결과 비교·검증 방법

WRF 모델 및 WAsP으로부터 예측된 결과를 각각의 기상탑 측정자료와 비교·검증하기 위해서 식 (1)~(3)과 같은 Bias, MAE (mean absolute error), RMSE(root mean square error)를 계산하였다. 여기서  $F_t$ 는 예측치,  $A_t$ 는 측정치를 의미한다.

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (F_t - A_t) \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n |F_t - A_t| \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (F_t - A_t)^2}{N}} \quad (3)$$

해석결과와 측정결과사이의 연평균풍속을 검토하였고 풍황분석에서 많이 사용되는 와이블분포 (Weibull distribution)의 비교를 통해 WRF 모델의 풍속 예측 타당성을 살펴보았다. 풍속자료를 이용한 와이블분포의 모수 추정은 추정방법에 따라

**Table 3** Descriptive statistics for measured wind data and predicted wind data of WRF and WAsP

Site	Pyeongdae	Udo	
Measured mean wind speed [m/s]	7.38	8.46	
Predicted mean wind speed(WRF)[m/s]	7.67	8.16	
Predicted mean wind speed(WAsP)[m/s]	7.91	7.79	
Bias [m/s]	WRF	0.29	-0.30
	WAsP	0.53	-0.67
Measured data vs. WRF	MAE[m/s]	1.86	1.81
	RMSE[m/s]	2.51	2.38

그 값이 달라지기 때문에<sup>(12)</sup> WAsP에서 채택하고 있는 추정식<sup>(13)</sup>을 동일하게 적용하였다. 다음으로 바람장미(wind rose)를 비교분석하여 주풍향 판단을 위한 WRF 모델의 적용타당성을 검토하였고, 월평균풍속 추이를 검토하여 계절풍에 대한 예측가능성을 검토하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 WRF 모델에 의한 풍황자원 예측 정확도 및 적용타당성을 검증하고자 한다.

Table 3에 나타난 바와 같이, WRF 모델에 의해 예측된 평대사이트의 연평균풍속은 7.67m/s로써, 기상탑 측정자료에 비해 0.29m/s 과대 예측되었고, WAsP에 의해 예측된 연평균풍속은 7.91m/s로써 0.53m/s의 차이를 보인다. 이와 반대로 우도사이트의 경우 WRF 모델에 의해 예측된 연평균풍속은 8.16m/s로써 0.3 m/s 과소 예측되었고, WAsP에 의해 예측된 연평균풍속은 7.79m/s로써 0.67m/s 만큼 과소 예측되었다.

WAsP은 해석을 위해 입력된 풍황자료를 기반으로 예측사이트의 풍황을 추정하기 때문에 평대사이트의 연평균풍속 예측 결과는 입력자료로 사용된 우도사이트의 높은 연평균풍속 때문에 과대 예측된 것으로 판단되며, 우도사이트에서 발생한 연평균풍속 결과의 차이 또한 같은 이유인 것으로 생각된다. 또한 평대와 우도사이트 사이에 있는 지형과 표면 거칠기의 영향으로 예측된 풍속 값이 감소 또는 증가하였지만, 두 사이트에서 측정된 기상탑 풍속자료의 연평균풍속을 추정하기

엔 그 영향이 다소 낮았다. WindPRO(WAsP solver)의 cross predict 기능과 두 기상탑 자료를 이용하여 표면 거칠기를 검증할 수 있다. 이를 통해 WAsP에서 추정된 연평균풍속의 정확도를 높일 수 있으나, 예비타당성조사 과정에서 풍력 발전단지 후보지역 내에 2곳 이상 기상탑을 설치하여 풍황자료를 확보하는 것은 비용적인 면에서 비효율적이다. 즉, Table 3에 나타난 WAsP의 결과는 단일 기상탑 자료 이용 시 표면 거칠기 검증이 사실상 불가능하기 때문에 WAsP의 예측한계를 나타낸다.

WRF 모델은 해석 대상 사이트의 풍속을 시간 경과에 따라 예측하기 때문에 예측 정확도는 기상탑 풍속 측정 자료와 동일 시간대별로 검토되어야 한다. 비교·검토 결과를 Table 3에 나타내었으며 MAE는 각 지점별로 1.86m/s, 1.81m/s, RMSE는 2.51m/s, 2.38m/s로 확인되었다. WRF에서 예측한 풍속자료는 이러한 오차를 내포하고 있지만, 연평균풍속과 같은 점(point) 추정 측면에서는 WRF 예측결과가 WAsP보다 높은 정확도를 보여주고 있다. WAsP에 의한 해석결과는 시간변화에 따른 풍속의 추정이 불가능하므로 MAE와 RSME에 의한 비교검토가 불가능하다.

각각의 예측모델에 따라 추정된 와이블분포의 모수와 와이블분포도를 Table 4와 Fig. 3에 나타내었다. WRF 모델에 의해 예측된 와이블분포가 WAsP에 의해 예측된 와이블분포에 비해 더 높은 정확도를 나타낸다. 평대사이트를 예측한 WAsP과 WRF 모델의 와이블분포는 약 7m/s 구간까지는 기상탑 풍속자료의 와이블분포보다 과소 예측되었고, 약 7m/s 이상 구간부터는 과대 예측되는 특성을 보인다. 반대로 우도사이트를 예측한

WAsP과 WRF 모델의 와이블분포는 약 8m/s 구간까지는 기상탑 풍속자료의 와이블분포보다 과대 예측되었고, 약 8m/s 이상의 구간부터는 과소 예측되는 특성을 나타내었다.

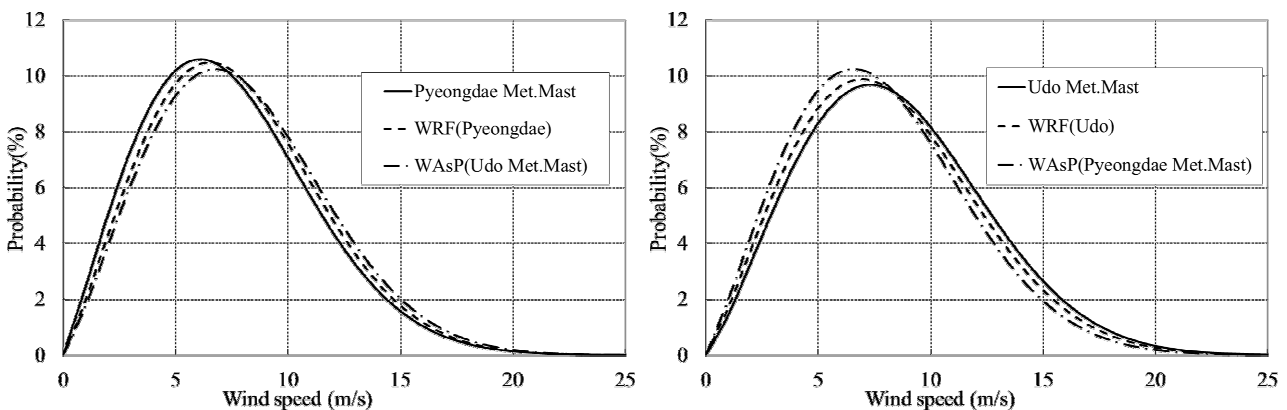
WRF와 WAsP의 와이블분포 중 기상탑 풍속자료의 와이블분포도의 형태에 더 가까운 분포도를 찾기 위해서 KS-test(Kolmogorov Smirnov test)<sup>(12)</sup>를 수행하였다. KS-test는 비교 대상인 두 집단의 누적분포도 차이를 분석하기 위해 수행되며, Table 5에서 나타난 바와 같이 기상탑 풍속자료의 와이

**Table 4** Weibull parameters of measured wind data and predicted wind data of WRF and WAsP

Type	Weibull parameters	Site	
		Pyeongdae	Udo
Measured data	K	2.084	2.229
	C	8.33	9.56
WRF	K	2.170	2.178
	C	8.66	9.21
WAsP	K	2.193	2.150
	C	8.93	8.80

**Table 5** RMSE and Kolmogorov-Simirnov test results(Max-error in cdf)

Site	Analysis model	Weibull distribution	
		RMSE in pdf	Max-error in cdf
Pyeongdae	WRF	0.0033	0.0335
	WAsP	0.0054	0.0572
Udo	WRF	0.0028	0.0060
	WAsP	0.0312	0.0676



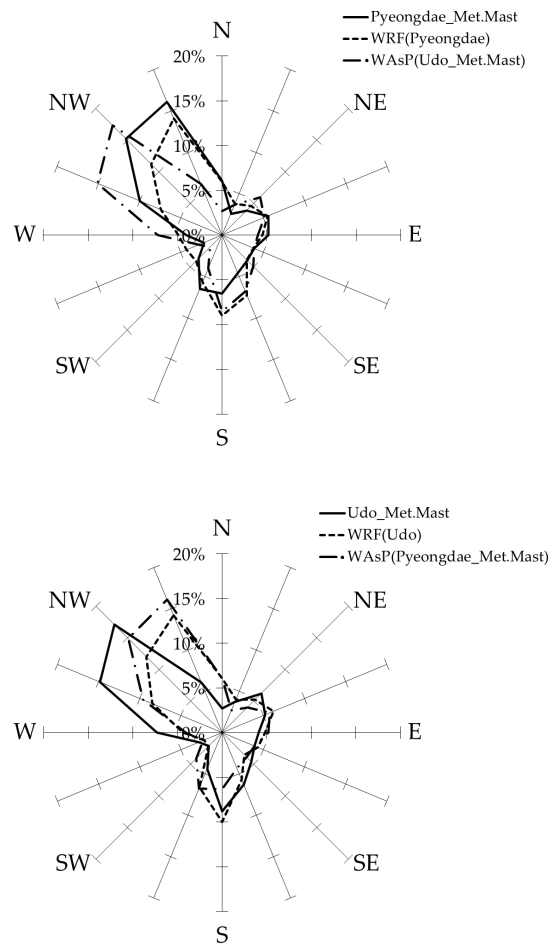
**Fig. 3** Comparison of Weibull distributions (left: Pyeongdae, right: Udo)

**Table 6** AEP(Annual energy production) error of wind turbines by using Weibull parameters of measured wind data and predicted wind data from WAsP and WRF at Pyeongdae and Udo site

Wind turbines		Hub Height [m]	Site			
			Pyeongdae		Udo	
			WRF	WAsP	WRF	WAsP
AEP Error [%]	Alstom ECO 80/2000	70	7.92	13.72	5.21	12.98
	Vestas V90-3.0 MW	80	7.78	13.50	5.17	12.93
	Doosan WinDS 3000	80	7.88	13.50	5.05	12.75
	REpower 5M offshore	100	7.39	12.40	4.54	11.55

블 누적분포와 WRF의 와이블 누적분포의 최대 편차 값은 평대와 우도사이트에서 각각 0.0335, 0.006으로 나타났다. 이는 WAsP의 결과보다 낮은 편차 값으로, WRF의 와이블분포가 기상탑 풍속 자료의 와이블분포에 더욱 일치함을 의미한다. RMSE 결과도 마찬가지로 WRF가 WAsP에 비해 낮은 편차값을 나타낸다. 이상의 결과에 근거하여 두 사이트 모두 WRF 모델에 의해 예측된 와이블분포가 WAsP 예측결과에 비해 더 높은 예측 정확도를 갖는 것으로 판단된다. 따라서 WRF 모델로부터 예측된 풍속자료를 이용하여 예측사이트의 와이블분포 특성 파악이 충분히 가능한 것으로 확인된다.

풍력발전분야에서 와이블분포는 연간발전량(AEP)을 산출하는데 적용되므로 수치모델에 의해 예측된 와이블분포와 풍력터빈의 출력곡선을 적용하여 WindPRO(WAsP slover)의 WAsP-interface 모듈을 이용하여 연간발전량을 산출하였다. 산출된 결과는 기상탑 풍속자료의 와이블분포를 이용한 연간발전량 산출결과와의 비교를 통해 상대오차를 구하였다. 풍력터빈은 임의의 4 종류를 선택하였고, 풍력터빈의 허브 높이는 70m, 80m, 100m 이다. 적용된 풍력터빈의 출력성능에 따라 연간발전량은 다르게 나타나지만, Table 6에 나타난바와 같이 상대 오차율은 유사한 결과를 보인다. 평대사이트의 경우 WRF 모델과 WAsP이 각



**Fig. 4** Wind roses of measured wind data, WAsP and WRF (upper : Pyeongdae, under : Udo)

각 약 8%와 13%의 상대오차를 나타내고 있고, 우도사이트의 경우에는 WRF 모델과 WAsP이 각각 약 5%, 13%의 상대오차를 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 WRF 모델이 와이블분포의 모수를 더 정확하게 추정하고 있기 때문에 WAsP보다 낮은 연간발전량 상대오차를 보인다.

Fig. 4에 나타난 바람장미 비교결과는 방향별로 바람이 불어온 확률을 표현한 것으로써, 풍력발전단지설계 시 풍력터빈의 이격거리 및 위치선정을 위해 사용된다. 기상탑 풍향자료로부터 계산된 바람장미는 각 사이트마다 다른 형태를 나타내고 있다. 평대사이트의 주풍향은 북북서~북서풍 계열이고 우도사이트의 주풍향은 서북서~북서풍 계열로 나타났다. WAsP으로부터 계산된 바람장미는 두 사이트 모두 기상탑 풍향자료의 바람장미와는 다소 다른 형태를 보여주고 있다.



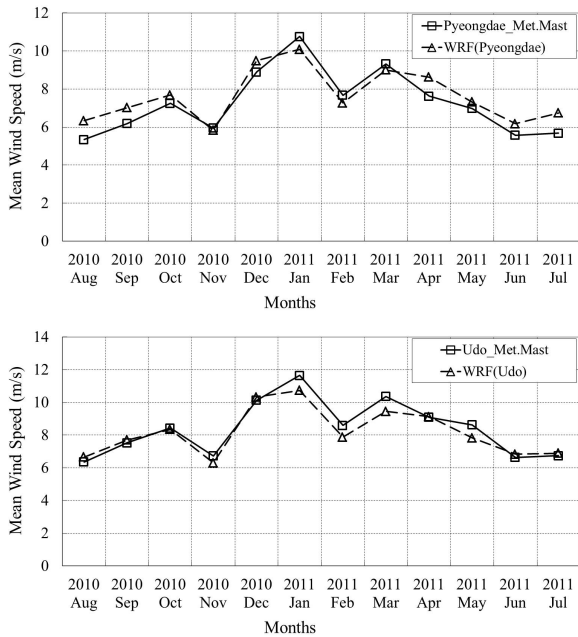


Fig. 5 Monthly mean wind speed of measured wind data and WRF (upper : Pyeongdae, under : Udo)

WAsP은 WRF와 달리 풍향해석시 기상현상의 고려없이 지형과 표면거칠기만을 고려하므로, 우도와 평대사이트에서 예측된 바람장미는 WAsP 해석에 사용된 풍향자료와 유사한 특성을 보인다. 즉, 평대사이트의 바람장미는 우도사이트에서 측정된 풍향자료를 사용하여 예측되었으므로, 우도사이트의 기상탑 풍향자료와 유사한 특징을 나타낸다.

WRF 모델의 풍향자료는 U-방향과 V-방향의 풍속을 근거로 산출하기 때문에 풍속자료의 정확도에 따라 풍향자료의 정확도가 결정된다고 할 수 있다. WRF 모델의 풍속자료는 전술한 바와 같이 MAE 결과값을 기준으로 각 사이트마다 1.86m/s, 1.81m/s의 오차를 나타냈기 때문에 풍향자료의 정확도에 이러한 영향이 반영될 수 있다.

WRF 모델로부터 예측된 바람장미는 우도와 평대사이트 모두 비슷한 특성을 나타내고 있으며, 이는 두 사이트의 지형적 영향과 기상조건이 유사하기 때문이라 판단된다. 따라서 평대사이트의 경우 기상탑 풍향자료의 바람장미와 비교적 잘 일치하는 경향을 보여주고 있으나 우도의 경우 비교결과의 차이를 보인다. WRF 모델에 의해 예측된 바람장미는 각 방향별로 빈도수를 정확하게 추정하고 있다고 할 수 없지만, 주풍향의 특성은 기상탑 자료와 비교적 잘 일치하는 결과를 도출

하고 있으므로 예측지점에 대한 주풍향 판단이 가능 할 것으로 판단된다.

기상탑 풍속자료와 WRF 모델로부터 예측된 풍속자료의 월별 평균풍속변화를 Fig. 5에 나타내었다. WAsP은 월별 평균풍속을 예측하지 못하므로 제외하였다. 대체로 기상탑 자료와 WRF 모델로부터 분석 및 예측된 결과가 서로 잘 일치하고 있으며, 계절별 평균풍속 변동특성을 잘 예측하고 있다. 따라서 WRF 모델로부터 생성된 풍속자료는 Table 3에 나타낸 MAE와 RMSE에 대한 오차를 내포하고 있으나, 연평균풍속과 마찬가지로 월평균풍속 또한 잘 추정한다고 판단된다.

측정된 월별 평균풍속 중 가장 높은 풍속을 보이는 1월과 가장 낮은 풍속을 보이는 8월을 살펴보면, 평대사이트의 8월 평균풍속은 약 1.0m/s 과대 예측되었고, 1월 평균풍속은 약 0.7m/s 과소 예측되었다. 우도사이트의 1월 평균풍속은 약 0.9m/s 과소 예측되었고, 8월 평균풍속은 약 0.3m/s 과대 예측되었다. 따라서 본 연구에 적용한 WRF 모델은 저풍속 출현빈도가 높은 계절인 여름철에는 월평균풍속이 과대 예측되는 경향을 보이고, 고풍속 출현빈도가 높은 계절인 겨울철에는 과소 예측되는 경향을 보인다.

#### 4. 결론

풍력발전단지 예비타당성단계에서 요구되는 풍황자원 예측을 위한 WRF 모델의 적용타당성 검증을 위해, 기상탑 풍황측정자료와 WAsP에 의한 풍황자원 예측결과와의 비교·검증을 수행하였다.

WRF 모델에 의해 예측된 풍속자료와 기상탑 풍속자료를 통계적으로 분석한 결과, WRF의 기상예측자료가 연평균풍속, 월평균풍속, 와이블분포의 모수, 연간발전량을 추정함에 있어 WAsP의 결과에 비해 높은 예측 정확도를 보였다. WRF 모델로부터 예측된 바람장미는 풍속자료에 의해 풍향을 산출하기 때문에 풍향별 출현빈도 측면에서 기상탑 풍향자료와 다소 편차가 발생하였으나, 예측사이트의 주풍향 결정을 위한 적용타당성을 확인하였다.

본 논문은 제주도의 특정지역에 국한된 검토결과로서 서로 다른 외부환경조건을 갖는 지역에 대한 다양한 비교·검증 연구를 통해 WRF 모델의 범용적 적용타당성에 대한 연구가 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호:20094020200020) 및 「풍력 발전설비 평가용 실증단지 확장개발」 과제(과제번호:2012T100201731)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌  
(References)

- (1) Hwang, Y. S., Lee, W. S., Paek, I. S. and Yoo, N. S., 2009, "Effectiveness of Wind Data from Automated Weather Stations for Wind Resources Prediction," *J. of Industrial Technology*, No.29 B, pp. 181~186.
- (2) Oh, H. S., Ko, K. N. and Huh, J. Ch., 2009, "Evaluation of Performance on WindPRO Prediction in the northeast Region of Jeju Island," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 28, No.2, pp. 22~30.
- (3) Kyong, N. H., Yoon, J. E., Jang, M. S. and Jang, D. S., 2003, "An Assessment of Offshore Wind Energy Resources Around Korean Peninsula," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 23, No. 2, pp. 35~41.
- (4) Kim, B. M., Woo, J. K., Kim, H. G., Paek, I. S. and Yoo, N. S., 2012, "Validation Study of the NCAR Reanalysis Data for a Offshore Wind Energy Prediction," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, No. 1, pp. 1~7.
- (5) EMD International Corp., 2010, "WindPRO 2.7 User Guide 3<sup>rd</sup> edition".
- (6) Risø National Laboratory, 2007, "WAsP 9 Help Facility, Modeling with WAsP".
- (7) Moon, S. J., Ko, J. W. and Lee, B. G., 2013, "Power Law Exponent in Coastal Area of Northeastern Jeju Island for the Investigation of Wind Resource," *J. of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol.21, No.4, pp. 65~71.
- (8) Mesoscale & Microscale Meteorology Division, 2012, "WRF-ARW V3 User's Guide," National Center for Atmospheric Research.
- (9) Munoz-Esparza, D., 2012, "Forecasting the Diabatic Offshore Wind Profile at FINO1 with the WRF Mesoscale Model," *DEWI magazin*, No. 40, pp. 73~79.
- (10) Lundquist, J. K., Mirocha, J. D. and Kosovic, B., 2009, "Nesting Large-eddy Simulations Within Mesoscale Simulations in WRF for Wind Energy Applications," WRF User's Workshop 2009.
- (11) Ecobrain, 2012, "Development of Renewable Energy Prediction system in Smart-grid Test Bed".
- (12) Chang, T. P., 2011, "Performance Comparison of Six Numerical Methods in Estimating Weibull Parameters for Wind Energy Application," *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 272~282.
- (13) Risø National Laboratory, 1989, "European Wind Atlas".