

해상풍력자원 예측을 위한 WRF-OML모델 적용 Application of WRF-OML Model for Offshore Wind Resource Prediction

강민협* · 고경남**† · 김민영***

Min-Hyeop Kang*, Kyung-Nam Ko**† and Min-Yeong Kim***

(Received 12 October 2020, Revision received 1 December 2020, Accepted 3 December 2020)

Abstract : The atmosphere-ocean coupled model was applied to propose the optimal numerical prediction method for offshore wind resource prediction. The WRF-OML (Weather Research and Forecasting-Ocean Mixed Layer) model, an atmosphere-ocean coupled model, was used to take into account the sea surface temperature, ocean surface flux that changes over time. The wind data at 68 m in height above sea level for one year measured by an offshore met mast installed 2.7 km off the Kimnyeong coast of Jeju was analyzed for a reference. The wind speeds predicted by the WRF-OML and the original WRF models were compared with those of the offshore met mast. The electric production from a virtual 5.56 MW wind turbine at the mast position was estimated using the power curve of the turbine. The bias and the RMSE (root-mean-square-error) of the electric power production as well as the wind speed were calculated using the met mast measurements and predictions from the two models. As a result, the bias and the RMSE of the WRF model were -0.57 m/s and 4.41 m/s, while those of the WRF-OML model were 0.16 m/s and 3.54 m/s, respectively. The WRF-OML model also had better performance than the WRF model for power production prediction.

Key Words : Wind data, Offshore wind energy, Wind power production, WRF, WRF-OML

1. 서 론

에너지 안보를 지키고 기후변화를 완화시키기 위하여 전 세계에서 재생에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 그 중 풍력에너지는 초기투자비용이 상대적으로 매우 크지만 이후 안정적으로 운영할

수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 그러나 풍력발전사업을 하기에 좋은 조건을 갖춘 육상 사이트는 이미 선점이 되어 있는 경우가 많아서 풍력기술 선도국들은 해상에 풍력단지를 건설 및 운영하고 있다.

삼면이 바다로 둘러싸인 대한민국도 좁은 지리

**† 고경남(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0853-7094) : 부교수, 제주대학교 대학원 풍력공학부
E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-4401
*강민협(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2187-7253) : 센터장, (사)한국기술사업화진흥협회 기술품질연구센터
***김민영(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9583-622X) : 연구원, 국가태풍센터

**† Kyung-Nam Ko(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0853-7094) : Associate professor, Faculty of Wind Energy Engineering, Graduate School, Jeju National University.
E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-4401
*Min-Hyeop Kang(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2187-7253) : Center chief, Technology Quality Research Center.
***Min-Yeong Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9583-622X): Researcher, National Typhoon Center.

적 요건 및 대형화되는 풍력단지로 인해 해상 풍력단지 개발이 요구되고 있다. 특히 제주도는 이미 한림 지역에서 35 MW 용량의 탐라해상풍력발전단지를 운영 중이며,²⁾ 기타 해상에서도 대규모의 해상풍력발전단지 건설을 추진 중이다. 한편, 해상에서는 육상보다 부족한 실측 바람데이터와 육상과는 다른 해양특성 때문에 풍력발전량 예측에 어려움이 따른다.³⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존에 육상에서 많이 사용하는 수치예측모델을 대체 또는 개선하여 예측성능을 높일 필요가 있다.

기상모델 대부분은 외해에서는 50-200 km 해상도의 해수면온도(Sea surface temperature, SST) 자료를 주로 사용한다. 그러나 연안에서는 조석과 해류에 의해 공간적으로 수온변동이 크므로, 고해상도 SST 및 SST 일변화를 기상모델에 반영할 필요가 있으며, 이를 위해 해양혼합층(Ocean Mixed Layer, OML) 모델을 고려할 필요가 있다.

이 연구에서는 풍속뿐만 아니라 특정 해상풍력 발전기에 의해 생산되는 발전량을 예측하기 위해 기존 수치예측모델인 WRF 모델보다 개선된 WRF-OML 모델을 제안하였다. WRF-OML 모델을 이용한 풍속예측 결과는 제주 김녕해상에 설치된 기상탑으로부터 실측된 풍속과 비교하였다. 또한, 해상기상탑 위치에서 풍속에 대한 발전량을 산출하여 비교함으로써 해양조건을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 예측정확도를 평가하였다.

2. 사이트 특성 및 연구 방법

2.1 사이트 및 데이터 특성

본 연구를 위한 사이트는 제주도 북동쪽에 위치한 김녕 해상이다. 제주도 김녕 해상은 해상풍력을 위한 바람 조건이 우수하다고 알려져 있고, 풍력자원, 조류, 파고 등에 대한 기초조사가 수행되어 왔다. Fig. 1은 본 연구에서 수치모델링 및 실측이 이루어진 해상기상탑의 위치를 나타낸다. 해상기상탑은 김녕 해안에서 2.7 km 떨어진 해상에 설치되어 있으며, 자켓(Jacket) 형태의 하부구조물 12 m 위에 6개의 풍속계와 3개의 풍향계 및



Fig. 1 Location of Kimnyeong offshore met-mast

Table 1 The specification of wind sensors of the met-mast

Items	wind sensors	
	anemometer	wind vane
tower location	33.34N, 126.47E	
model	Thies P610H	NRG 200P
measurement range	0 - 75 m/s	0 - 360 °
accuracy	0.2 m/s	1.5 °
stating threshold	0.3 m/s	0.2 m/s
operating temp.	-50°C ~ +80°C	-50°C ~ +80°C
heights	70m, 68m, 58m, 48m, 38m, 28m	68m, 58m, 48m

Table 2 The description of real and model data used

Items	description	remark
data used for analysis	wind speed	anemometer : 68m
	wind direction	wind vane : 68m
averaging time	10 minutes	
measurement period	2012.12.1. - 2013.11.30.	365 days(8,760 hrs)
number of data (observations)	8,760 / 8,760	data recovery rate : 100%
number of data (model)	17,520/17,520	data recovery rate : 100%

기타 기상관측장비가 설치되어 있다. 여기서는 풍향계와 풍속계가 동일 최고 높이에 설치된 68 m 높이의 Thies P610H 풍속계 및 NRG 200P 풍향계로부터 측정된 데이터가 사용되었다. 풍향풍속계의 자세한 사양은 Table 1과 같다.

연구수행을 위해 사용된 데이터의 종류 및 기간, 사용된 실측데이터와 모델데이터의 수는 Table 2와 같다. 본 연구에서는 바람데이터의 계

절편화에 따른 변동성을 고려하기 위해 1년 (2012. 12. 1 ~ 2013. 11. 30) 동안 김녕 해상기상탑 68m에서 실측된 데이터와 WRF 및 WRF-OML 모델로부터의 68 m 예측데이터가 비교되었다. 즉, 예측데이터와 실측데이터(기준값)를 비교함으로써 두 모델 간의 정확도를 검증하였다.

2.2 풍속 및 발전량 예측 프로세스

풍력발전은 태양열에 의한 지구의 불균등 가열로 발생한 바람의 운동에너지를 블레이드의 공기역학적인 작용을 통해 회전에너지로 변환시키고, 이러한 기계적 에너지를 전기에너지로 변환시킨 후 전력계통에 제공하는 방식이다. 풍력발전시스템의 출력은 이론적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \eta C_p \rho V^3 A \quad (1)$$

여기서 η 는 동력전달장치 및 발전기의 에너지 변환 효율, C_p 는 로터의 출력계수, ρ 는 공기밀도, V 는 풍속, A 는 블레이드 회전면적이다. 이론적으로 풍력발전량은 풍속의 세제곱에 비례하므로 풍속의 정확한 예측은 풍력발전량 예측에 가장 중요한 요소이다.

이 연구에서는 Fig. 2와 같이 국내 제조사가 해상풍력용으로 개발한 5.56 MW 풍력발전기의 출력곡선과 출력계수가 활용되었다. 3.5 m/s의 시동 풍속에서 풍력발전시스템이 가동하기 시작하며, 시동풍속에서 13.0 m/s인 정격풍속 사이에서의 출

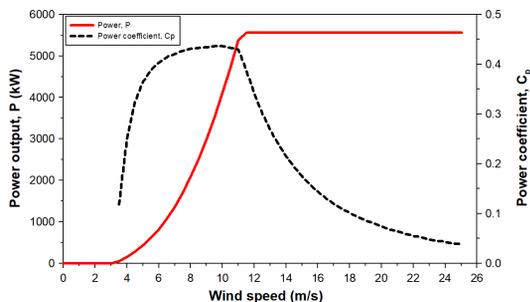


Fig. 2 Power curve and power coefficient of the wind turbine used for this study

력특성은 풍속의 세제곱이 되며 정격풍속 이상에서는 정격출력이 중단풍속인 25 m/s까지 유지되도록 제어된다.⁴⁾

본 연구에서 사용된 대기모델은 National Center for Atmospheric Research(NCAR)에서 개발된 중규모 모델인 WRF(ver. 3.9.1.1)로써, 연구 및 운영을 위해 설계된 수치 기상예측 및 대기 시뮬레이션 시스템이다.⁵⁾ WRF 모델은 초기 및 경계조건으로 입력되는 전지구예측데이터를 바탕으로 선택된 물리과정을 기반으로 수치적분을 수행한다. 각 물리과정은 선택할 수 있는 옵션들을 포함하는데, 본 연구에서는 각 물리과정별로 Table 3과 같이 옵션을 선택하였다.⁶⁻¹¹⁾

Fig. 3은 수치해석 영역을 보여준다. 제주도 북동쪽 해안을 중심으로 공간 해상도를 5개 도메인으로 구성하였다. 각 영역의 수평격자는 151×151 (도메인 01 - 도메인 04), 88×88(도메인 05)로 구성하였으며, 격자 간격은 각각 27, 9, 3, 1 km는

Table 3 Physical process of models

Variables	Schemes
Microphysics	WDM 6-class
Planetary Boundary Layer	Meller-Yamada-Janjic
Surface Layer	Monin-Obulkhov
Land surface	Noah-MP
Shortwave Radiation	Dudhia
Longwave Radiation	RRTMG

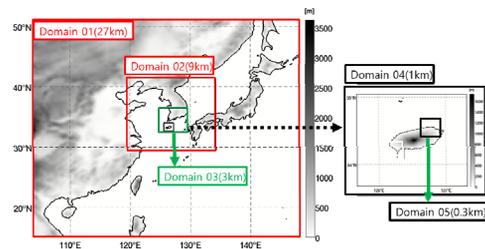


Fig. 3 Configuration of the 2-way nested domains for the WRF and WRF-OML models. Sizes of domains are 27 km(domain 01), 9 km(domain 02), 3 km(domain 03), 1 km(domain 04) and 0.3 km(domain 05)

물론 고해상도 수치모델링을 위해 0.3 km도 추가하여 양방향 등지격자로 구성하였다. 도메인 01로부터 얻어진 결과는 2-way nesting 기법을 이용하여 단계별로 작은 영역(도메인 02 - 도메인 05)의 예보를 생산할 수 있다. 5개 도메인 모두 48시간으로 예측시간을 설정하였다.

해상에서의 풍력자원 예측정확도를 높이기 위해서는 대기와 해양의 상호작용을 고려할 필요가 있으며, 초기입력장으로 사용되는 해수면온도, 혼합층 깊이, 수온약층의 기울기를 고려하는 것이 중요하다. 이를 위해, 해양혼합층모델을 대기모델에 결합함으로써, 해수면 온도의 단기변화를 고려하고자 하였다.

OML은 바람에 의한 혼합이 지배적이며 바람의 세기에 따라 혼합층깊이(Mixed Layer Depth, MLD)가 변하고 이는 표층수온의 변화를 일으키는 이유가 된다.^{12),13)}

Fig. 4는 이 연구에서 사용된 해양혼합층 모델을 보여주고 있으며, Pollard 등[14]의 연구결과를 근간으로 한다. OML 모델에서는 바람응력(wind stress), 현열 플럭스(sensible heat flux), 잠열 플럭스(latent heat flux)가 외력으로 작용하며, 이들은 각각 다음 식들로 표현할 수 있다.

$$\tau = \rho C_D V_{10}^2 \tag{2}$$

이 식에서 τ 는 바람응력으로, 연직혼합을 일으켜 따뜻한 혼합층과 차가운 수온약층의 해수가 혼합됨으로써 표층을 냉각시키는 역할을 한다. ρ 는 공기밀도, C_D 는 마찰계수, V_{10} 은 10 m 높이에서의 풍속이다. 마찰계수는 표층의 거칠기 길이

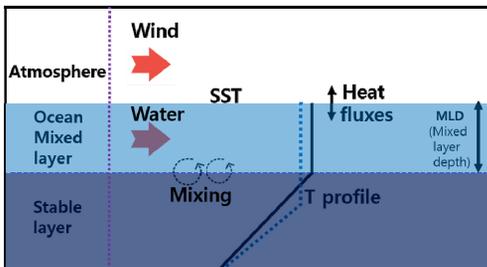


Fig. 4 Schematics of the one-dimensional ocean mixed layer model used

(Roughness length)와 관련이 있으며, 해상에서는 파랑이 완전히 발달했다는 가정하에 10 m에서 풍속의 함수로 유도적인 값을 사용한다.^{15),16)}

$$H = \rho c_p V_{10} \theta \tag{3}$$

여기서 H는 현열 플럭스로서, 대기와 해양의 기온차에 의해 결정된다. c_p 는 정압비열, θ 는 잠재온도(potential temperature)이다.

$$E = \rho C_E V_{10} \Delta q \tag{4}$$

이 식에서 E는 잠열 플럭스로서, 대기와 해양의 비습 차이와 풍속에 의해 결정된다. C_E 는 수증기 벌크전달계수(bulk transfer coefficient), Δq 는 비습차이다. OML 모델은 WRF 모델에서 해양혼합층 프로세스를 시뮬레이션하기 위해 설계되었다. 이 모델은 바람응력을 사용하여 OML에서의 흐름을 모의하며, 결과적으로 더 깊은 층의 차가운 온도와 혼합을 시뮬레이션한다. 해양혼합층 모델 초기값으로 사용되는 SST는 Hybrid Coordinate Ocean Model SST(HYCOM SST)를 사용하였으며,

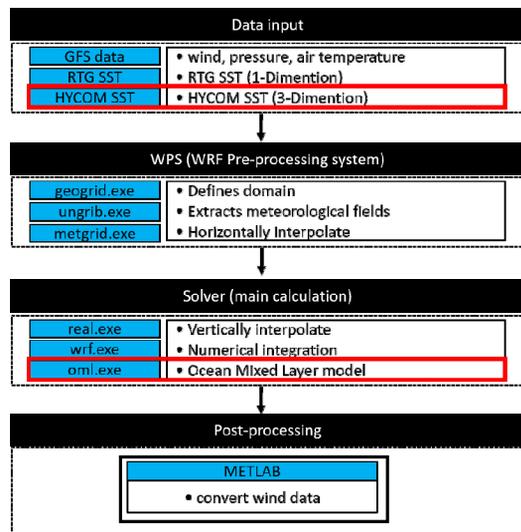


Fig. 5 Schematic diagram explaining the process of WRF and WRF-OML models for offshore wind prediction. The red boxes represent additional WRF-OML processes

혼합층깊이(Mixed Layer Depth, MLD)를 결정하기 위해 해양열량(ocean heat contents)을 이용하였다.

해상풍 및 이에 근거한 발전량 예측을 위한 수치모델의 수행순서는 Fig. 5와 같다. 여기서는 대기모델인 WRF 모델과 대기-해양 접합모델인 WRF-OML 모델 등 2개 모델이 사용되었다. 두 모델은 초기 입력장으로써 전지구모델예측자료인 GFS 자료를 동일하게 사용하지만, 해수면온도자료에 대해서는 WRF 모델은 RTG SST를, WRF-OML 모델은 HYCOM SST를 각각 사용한다 [17]. 수치모델 계산과정에서는 두 모델 모두 real.exe 및 wrf.exe 프로그램을 수행하며, WRF-OML 모델은 추가로 oml.exe 프로그램을 수행한다. 마지막으로 후처리과정을 통해 필요한 풍력데이터를 추출하게 된다.

3. 풍속 및 발전량 예측 결과 검증

3.1 풍속 예측결과 검증

Fig. 6과 Fig. 7은 WRF 모델과 WRF-OML 모델의 예측결과와 실측값을 각각 비교하여 보여주는 산포도이다. WRF 모델은 Bias -0.57 m/s, RMSE는 4.41 m/s를 보였다. 그리고 WRF-OML 모델은 Bias 0.16 m/s, RMSE는 3.54 m/s를 보였다.

WRF 모델은 약 2개월을 제외하고 전반적으로 음의 bias를 보이는 반면, WRF-OML 모델은 낮은 크기로 양의 bias와 음의 bias를 보였다. RMSE는

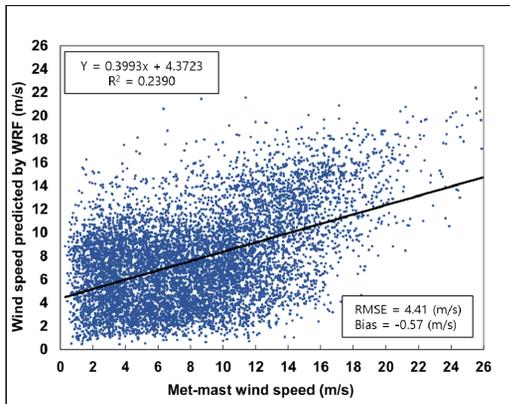


Fig. 6 Scatter plots of simulated results using WRF model with observations

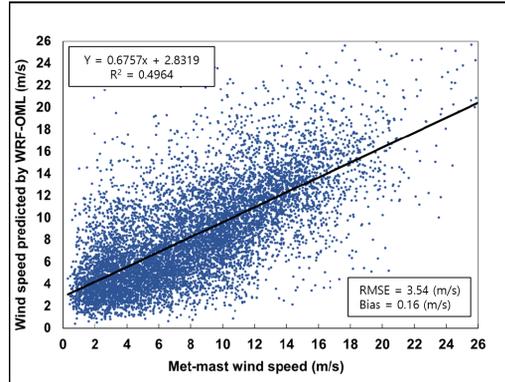


Fig. 7 Scatter plots of simulated results using WRF-OML model with observations

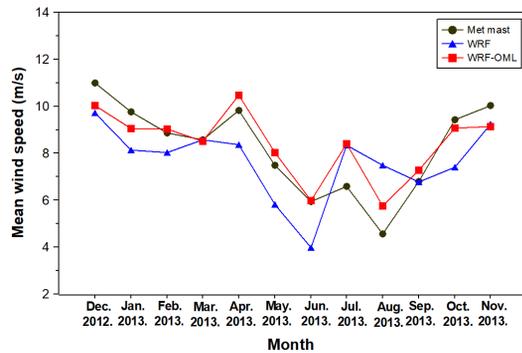


Fig. 8 Monthly mean wind speed of observation data and simulated results using WRF and WRF-OML models

WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 0.87 m/s 낮은 오차율을 보였다. 결정계수 R2은 WRF 모델 및 WRF-OML 모델 각각 0.239, 0.496의 값을 보였다.

Fig. 8은 두 예측모델 및 실측데이터의 월별 평균풍속을 보여주고 있다. WRF 모델은 월평균 -7.05%의 오차를 보이는 반면, WRF-OML 모델은 월평균 +1.9%의 오차를 보이고 있어, WRF-OML 모델이 실측값과 더 가까운 예측을 하고 있다.

Fig. 9는 풍속별 Bias와 RMSE를 보여주고 있다. Bias는 두 모델 모두 10 m/s까지 과대모의하고 있으나, WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작은 오차를 보이고 있다. 10 m/s 이상의 풍속 구간에서는 두 모델 모두 과소모의 하고 있으나 WRF-

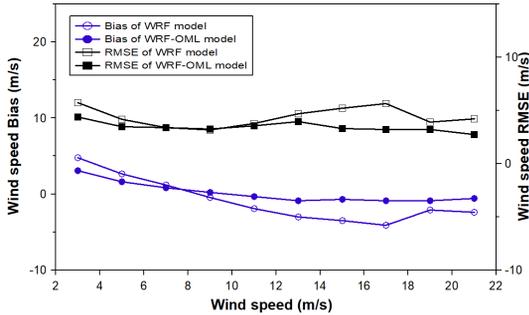


Fig. 9 Bias and RMSE of simulated results using WRF and WRF-OML models with wind speeds

OML 모델이 WRF 모델보다 절대오차가 작다. RMSE는 전 구간에서 WRF 모델보다 WRF-OML 모델이 평균 1.2 m/s 작은 오차를 보이고 있으며, 전체적으로 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 실측값에 1.6 m/s 가깝다. 거의 전 풍속 구간에서 Bias 및 RMSE 모두 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 10은 월별 풍속의 평균에 대한 오차를 분석한 결과이다. WRF 모델은 전 구간에서 과소모의를 하고 있으며, WRF-OML 모델은 10월부터 1월을 제외한 기간에서 작은 값으로 과대모의를 하고 있다. 한편, 거의 전 구간에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작은 폭으로 모의하고 있음을 알 수 있다. 또한, 11월을 제외한 모든 기간에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작은 RMSE 값을 보임에 따라 접합모델의 우수성을 보여주고 있다.

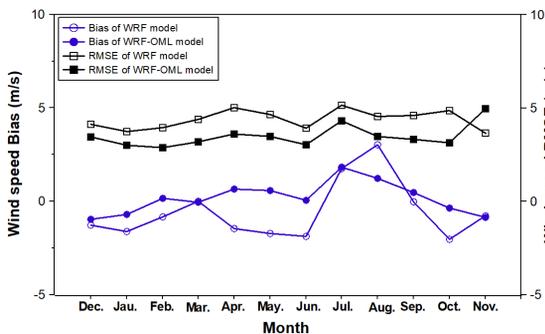


Fig. 10 Bias and RMSE of simulated wind speed results using WRF and WRF-OML models with months

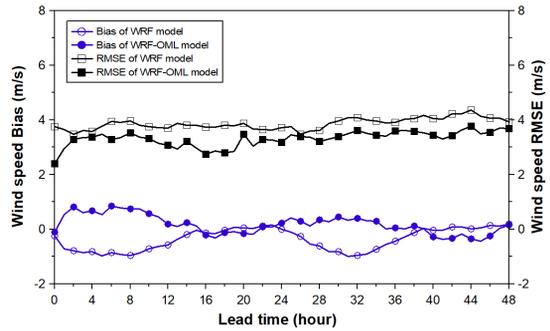


Fig. 11 Bias and RMSE of simulated wind speed results using WRF and WRF-OML models with lead time

Fig. 11은 예측선행시간에 따른 오차 분석결과를 보여준다. WRF 모델은 거의 모든 구간에서 과소모의, WRF-OML 모델은 작은 값으로 과대모의와 과소모의를 하고 있다. 약 24시간 이후 WRF-OML 모델은 거의 근사하게 예측을 하는 반면, WRF 모델은 음의 방향으로 오차의 폭이 크게 발생하고 있으며 약 40시간까지 이어지고 있다. RMSE는 모든 구간에서 WRF 모델보다 WRF-OML 모델이 약 0.6 m/s의 차이로 지속적으로 좋은 성능을 보여주고 있다.

3.2 발전량 예측결과와 검증

Fig. 12는 두 모델이 예측한 발전량의 월별 오차에 대한 분석결과이다. WRF-OML 모델은 6월까지 0.2 MWh 이내의 적은 양으로 음의 bias와 양의 bias를 보이고 있으나, 같은 기간에 WRF 모델은 1 MWh 이내의 비교적 큰 폭으로 음의 bias를 보이고 있다. 이후에도 WRF-OML 모델은 WRF 모델보다 절대값으로 작은 bias를 보이고 있음을 알 수 있다. RMSE는 11월을 제외한 모든 구간에서 WRF-OML이 WRF 모델보다 작은 오차를 보이고 있다.

Fig. 13은 예측시간에 따른 발생전력량의 평균 오차에 대한 분석결과이다. WRF 모델은 지속적으로 음의 bias를 보이고 있으며, 시간당 평균 267.5 kWh를 과소모의하고 있다. WRF-OML 모델은 양의 bias와 음의 bias를 반복하고 있으며, 시간당

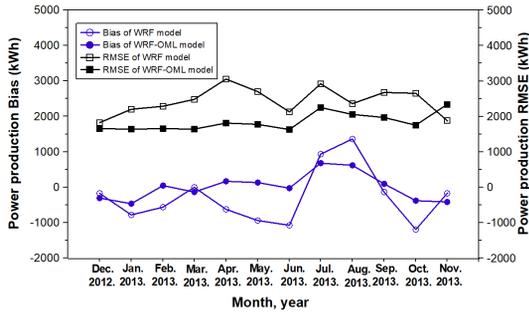


Fig. 12 Bias and RMSE of simulated results using WRF and WRF-OML models with monthly power production

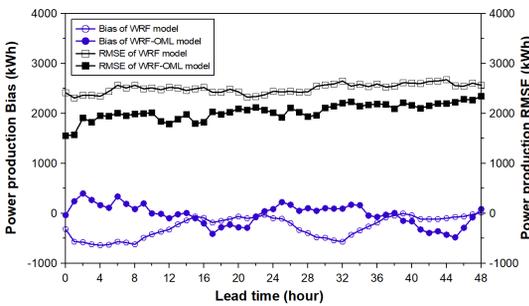


Fig. 13 Bias and RMSE of simulated power production results using WRF and WRF-OML models with lead time

평균 28.5 kWh 과소모의하고 있다. RMSE는 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 지속적으로 작은 오차를 보이고 있으며, 두 모델간 시간당 평균 오차는 463.7 kWh이다. 두 모델 모두 예측시간이 길어질수록 오차가 더 커지는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 제주 김녕 해상에서의 풍속 예측성능을 비교한 결과, WRF 모델과 WRF-OML 모델의 bias는 각각 -0.57 m/s, 0.16 m/s를 나타내고 있으며, RMSE는 각각 4.41 m/s, 3.54 m/s의 값을 보였다.
- 2) WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 월별 평균 풍속, 풍속 크기, 예측선행시간에 따른 풍속을 실측 값에 더 가깝게 예측하였다.

3) 발전량 예측성능을 예측시간별로 비교한 결과, WRF 모델은 시간당 267.5 kWh 과소모의, WRF-OML 모델은 시간당 28.5 kWh 과소모의하였다. RMSE는 WRF-OML 모델이 WRF 모델에 비해 463.7 kWh 더 작은 오차를 보였다.

4) 이 연구에서 풍속예측뿐만 아니라 해상풍력 발전량 예측에서도 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 우수한 성능을 보여 주었다. 그러나 이 결과는 김녕 해상 한 지점에 대한 결과로서, 더 높은 신뢰성 확보를 위하여 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2020학년도 제주대학교 교육·연구 및 학생지도비 지원에 의해서 연구되었음. 또한 제1저자인 강민협은 2020년 8월 박사학위논문 “대기-해양 접합모델을 활용한 제주해상 풍력발전기의 풍속 및 발전량 예측성능평가”의 일부임.

Author contributions

M. H. Kang; Formal analysis, Writing-original draft, Investigation. K. N. Ko; Supervision, Writing review & editing. M. Y. Kim; Numerical analysis, verification.

References

1. C. Chancham, J. Waewsak and Y. Gagnon, 2017, "Offshore wind resource assessment and wind power plant optimization in the Gulf of Thailand", Energy, 139, pp. 706-731. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.026>)
2. Global wind report annual market update, GWEC, 2016, p. 63.
3. Y. H. Wang, R. K. Walter, C. White, H. Farr, H and B. I. Ruttenberg, 2019, "Assessment of surface wind datasets for estimating offshore wind energy along the Central California Coast", Renew. Energy, 133, pp. 343-353.

- (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.008>)
4. D. Cabezon, L. Marti and M. J. Sanisidro, 2004, "Comparison of Methods for Power Curve Modeling, Proceedings of the Global Wind Power Conference", Chicago, Illinois, USA, March 28-31.
 5. H. Mi-Yeong, J. Cheng Hao, Y. Unil, K. Kwang-Deuk and R. Keun Ho, 2012, "Building of prediction model of wind power generation using power ramp rate, Journal of the Korea Society of Computer and Information", Vo. 17, No. 1.
 6. WRF-ARW V3.9 User's Guide, 2017, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
 7. G. L. Mellor and T. Yamada, 1982, "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems", Rev. Geophys. Space Phys. 20, pp 851-875.
(<https://doi.org/10.1029/rg020i004p00851>)
 8. P. A. J. Jiménez, J. Dudhia, J. F. González-Rouco, J. Navarro, J. P. Montávez and E. García-Bustamante, 2012, "A revised scheme for the WRF surface layer formulation", Mon. Weather Rev. 140, pp. 898-918.
(<https://doi.org/10.1175/mwr-d-11-00056.1>)
 9. F. Chen and J. Dudhia, 2001, "Coupling an advanced land surface - hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling system", Part II: Preliminary model validation. Mon. Weather Rev. 129, pp 587-604.
([https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129%3C0587:caalsh%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129%3C0587:caalsh%3E2.0.co;2))
 10. E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough, 1997, "Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave", J. Geophys. Res. Atmos. 102, pp. 16663-16682.
(<https://doi.org/10.1029/97jd00237>)
 11. J. Dudhia, 1989, "Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model", J. Atmos. Sci 46, pp. 3077-3107.
([https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046%3C3077:nsocod%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046%3C3077:nsocod%3E2.0.co;2))
 12. G. M. Mohan, C. V. Srinivas, C.V. Naidu, R. Baskaran and B. Venkatraman, 2015, "Real-time numerical simulation of tropical cyclone Nilam with WRF: experiments with different initial conditions, 3D-Var and ocean mixed layer model", Nat. Hazards 77, 597-624.
(<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1611-3>)
 13. C. C. Wu, W. T. Tu, I. F. Pun, I. I. Lin and M. S. Peng, 2016, "Tropical cyclone-ocean interaction in Typhoon Megi (2010)-A synergy study based on ITOP observations and atmosphere-ocean coupled model simulations", J. Geophys. Res. 121, pp. 153-167.
(<https://doi.org/10.1002/2015jd024198>)
 14. R. T. Pollard, P. B. Rhines and R. Y. Thompson, 1973, "The deepening of the wind-mixed layer", Geophys. Fluid Dyn. 3, pp. 381-404.
(<https://doi.org/10.1080/03091927208236105>)
 15. J. F. Manwell, A. L. Rogers, J. G. McGowan and B. H. Bailey, 2002, "An offshore wind resource assessment study for New England", Renew. Energ. 27, pp. 175-187.
([https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(01\)00183-5](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(01)00183-5))
 16. M. D. Powell, P. J. Vickery and T. A. Reinhold, 2003, "Reduced drag coefficient for high wind speed in tropical cyclones", Nature, 422, pp. 279-283.
(<https://doi.org/10.1038/nature01481>)
 17. Development of Meteorological Resources for Green Growth, 11-1360395-000187-10, 2010, National institute of meteorological research, Korea Meteorological Administration.