



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)





博士學位論文

대기-해양 접합모델을 활용한 제주  
해상 풍력발전기의 풍속 및 발전량  
예측성능 평가

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

姜旻協

2020年 8月



# 대기-해양 접합모델을 활용한 제주 해상 풍력발전기의 풍속 및 발전량 예측성능 평가

指導教授 高 炅 男

姜 旻 協

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2020 年 6 月

姜旻協의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長

김 병 석

委 員

배 운 혁

委 員

정 지 현

委 員

이 영 미

委 員

고 경 남

濟州大學校 大學院

2020 年 6 月



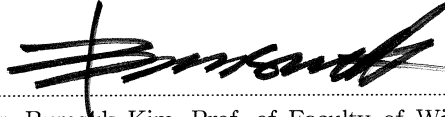
# Assessment of prediction performance for an offshore wind turbine around Jeju Island using atmosphere-ocean coupled model

Minhyeop Kang  
(Supervised by professor Kyungnam Ko)

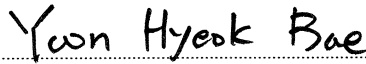
A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Doctor of Philosophy

2020. 6.

This dissertation has been examined and approved.



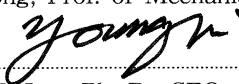
Thesis director, Bumsuk Kim, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering



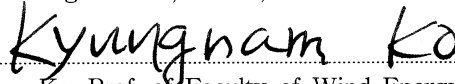
Yoon Hyeok Bae, Prof. of Ocean System Engineering



Jihyun Jeong, Prof. of Mechanical Engineering



Young Mi Lee, Ph. D., CEO of ECOBRAIN



Kyungnam Ko, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

June 2020

Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy  
Graduate School  
Jeju National University





# Contents

List of Figures .....	iv
List of Tables .....	ix
Abstract .....	xi
제1장. 서론 .....	1
1.1. 연구 배경 및 필요성 .....	1
1.2. 연구 동향 .....	5
1.3. 연구 목적 .....	8
1.4. 연구 방법 .....	10
1.5. 논문의 구성 .....	16
제2장. 풍력 및 발전량 예측 기반기술 현황 .....	17
2.1. 기반기술 개요 및 현황 .....	17
2.1.1. 기상예측기술 .....	17
(1) 물리적 방법 .....	18
(2) 통계적 방법 .....	19
2.1.2. 기상수치모델의 개요 .....	20
2.2. 3차원 기상수치모델 WRF 개요 .....	21
2.2.1. WRF의 역학적 특성 .....	23
(1) 미세물리과정 .....	23
(2) 행성경계층 물리과정 .....	23
(3) 지표면 물리과정 .....	24
(4) 대기복사 물리과정 .....	24
2.2.2. WRF의 예측절차 .....	25

제3장. 사이트 조건 및 기초 풍력자원평가 .....	27
3.1. 사이트 조건 .....	27
3.1.1. 대정해상기상탑 .....	27
3.1.2. 김녕해상기상탑 .....	30
3.2. 기초 풍력자원평가 .....	32
3.2.1. 대정해상기상탑 기초 풍력자원평가 .....	32
3.2.2. 김녕해상기상탑 기초 풍력자원평가 .....	37
제4장. 연구결과 .....	43
4.1. 풍력 및 발전량 예측 프로세스 설계 .....	43
4.1.1. 물리과정 최적화를 통한 국지 바람 예측기법 개발 .....	43
(1) 물리옵션 선정 .....	45
(2) 공간격자 및 연직격자 .....	49
(3) 경계조건 및 등지격자 .....	51
(4) 초기입력자료 .....	54
4.1.2. 대기-해양 접합모델의 적용 .....	55
4.1.3. 접합모델을 활용한 실시간 해상풍 예측 프로세스 .....	60
4.2. 접합모델을 활용한 풍속 및 발전량 예측 결과 .....	63
4.2.1. 대정 사이트에서의 접합모델 예측성능 .....	66
(1) 풍속 예측성능 .....	66
(2) 발전량 예측성능 .....	76
4.2.2. 김녕 사이트에서의 접합모델 예측성능 .....	84
(1) 풍속 예측성능 .....	84
(2) 발전량 예측성능 .....	95
제5장. 요약 및 결론 .....	102

References ..... 105

감사의 글 ..... 114

## List of Figures

Fig. 1-1 Annual mean wind speed at (a) 50 m height and (b) 80 m height (Korea meteorological Administration, 2007) .....	2
Fig. 1-2 Power curve and power coefficient of the wind turbine .....	14
Fig. 3-1 Location of Daejeong offshore met-mast .....	28
Fig. 3-2 Location of Kimnyeong offshore met-mast .....	30
Fig. 3-3 Weibull distribution at Daejeong offshore met-mast .....	32
Fig. 3-4 Monthly wind speed variation at 94 m, 80 m, 60 m and 20 m heights at Daejeong offshore met-mast .....	33
Fig. 3-5 Diurnal wind speed variation at 94 m, 80 m, 60 m and 20 m heights at Daejeong offshore met-mast .....	34
Fig. 3-6 Wind rose at 94 m, 80 m and 60 m height heights at Daejeong offshore met-mast .....	35
Fig. 3-7 Energy rose at 94 m, 80 m and 60 m heights at Daejeong offshore met-mast .....	36
Fig. 3-8 Weibull distribution at Kimnyeong offshore met-mast .....	37
Fig. 3-9 Monthly wind speed variation at 68 m, 58 m, 48 m and 38 m heights at Kimnyeong offshore met-mast .....	38
Fig. 3-10 Diurnal wind speed variation at 68 m, 58 m, 48 m and 38 m heights at Kimnyeong offshore met-mast .....	39
Fig. 3-11 Wind rose at 68m, 58m and 48m heights at Kimnyeong offshore met-mast .....	40
Fig. 3-12 Energy rose at 68 m, 58 m and 48 m heights at Kimnyeong offshore met-mast .....	41
Fig. 4-1 Configuration of the two way nested domains of the WRF model. Sizes of the domains are 27 km(domain 01), 9 km(domain 02), 3 km(domain 03), 1 km(domain 04) and 0.3 km(domain 05). Colors represent topography .....	44

Fig. 4-2 Error rate in physical option for microphysics .....	46
Fig. 4-3 Error rate in physical option for Planetary boundary layer .....	47
Fig. 4-4 Error rate in physical option for Surface layer .....	47
Fig. 4-5 Error rate in physical option for Land surface .....	47
Fig. 4-6 Error rate in physical option for Longwave radiation .....	48
Fig. 4-7 Error rate in physical option for Shortwave radiation .....	48
Fig. 4-8 (a) Horizontal grid and (b) vertical grid of WRF system .....	49
Fig. 4-9 Vertical $\eta$ coordinate used in WRF model. Black lines between 0.0 and 1.0 represent $\eta$ values .....	50
Fig. 4-10 Arakawa-C grid staggering for a portion of a parent domain and an embedded nest domain with a 3:1 grid size ratio .....	52
Fig. 4-11 Several nesting grid methods. (a) optical nesting grid, (b) same parents grid, (c) overlay grid, and (d) intra sharing grid .....	53
Fig. 4-12 Schematic of the one-dimensional ocean mixed layer model used in the WRF model .....	57
Fig. 4-13 Spatial distributions of Real Time Global Sea Surface Temperature (RTG SST) used in the original WRF model at 00UTC 1 July 2016 .....	58
Fig. 4-14 Spatial distributions of Hybrid Coordinate Ocean Model Sea Surface Temperature (HYCOM SST) used in WRF-OML coupled model at 00UTC 1 July 2016 .....	58
Fig. 4-15 Schematic diagram explaining the process of WRF and WRF-OML models for offshore wind prediction experiments. The blue arrows and boxes are for WRF process, and the red arrows and boxes for WRF-OML process, while the black arrows and boxes are for common process .....	62
Fig. 4-16 Power curve of a wind turbine .....	64
Fig. 4-17 Scatter plots of simulated results using (a) WRF and (b) WRF-OML (wind speed of 94m height) with observations at Daejeong offshore met-mast .....	67

Fig. 4-18 Monthly mean wind speed of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast. Wind speeds at 94 m height .....	68
Fig. 4-19 Wind roses of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast. Wind speeds at 94 m height .....	69
Fig. 4-20 Hourly mean wind speed of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast. Wind speeds at 94 m height .....	71
Fig. 4-21 Wind speed bias and RMSE with wind speed at Daejeong offshore met-mast .....	72
Fig. 4-22 Wind speed bias and RMSE with lead time at Daejeong offshore met-mast .....	73
Fig. 4-23 Wind speed bias and RMSE with seasons at Daejeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November, and winter is December to February .....	74
Fig. 4-24 Weibull Distribution of observations and predictions from WRF and WRF-OML, and power curve of the wind turbine at Daejeong offshore met-mast. $\bar{v}$ is mean wind speed, $P_m$ is measured power and $P_r$ means rated power .....	76
Fig. 4-25 Energy roses of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast .....	77
Fig. 4-26 Monthly power production at Daejeong offshore met-mast .....	78
Fig. 4-27 Power production bias and RMSE at Daejeong offshore met-mast .....	79
Fig. 4-28 Power production bias and RMSE with seasons at Daejeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November, and winter is December to February .....	80

Fig. 4-29 Power production bias and RMSE with time at Daejeong offshore met-mast .....	81
Fig. 4-30 Power production bias and RMSE with lead time at Daejeong offshore met-mast .....	82
Fig. 4-31 Scatter plots of simulated results using (a) WRF and (b) WRF-OML (wind speed of 68m height) with observations at Kimnyeong offshore met-mast .....	85
Fig. 4-32 Monthly mean wind speed of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast. Wind speeds at 68 m height .....	87
Fig. 4-33 Wind roses of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast. Wind speeds at 68 m height .....	87
Fig. 4-34 Hourly mean wind speed of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast. Wind speeds at 68 m height .....	89
Fig. 4-35 Wind speed bias and RMSE with wind speed at Kimnyeong offshore met-mast .....	90
Fig. 4-36 Wind speed bias and RMSE with lead time at Kimnyeong offshore met-mast .....	91
Fig. 4-37 Wind speed bias and RMSE with seasons at Kimnyeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November, and winter is December to February .....	92
Fig. 4-38 Weibull Distribution of observations and predictions from WRF and WRF-OML, and power curve of the wind turbine at Kimnyeong offshore met-mast. $\bar{v}$ is mean wind speed, $P_m$ is measured power and $P_r$ means rated power .....	95
Fig. 4-39 Energy roses of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast .....	96



Fig. 4-40 Monthly power production at Kimnyeong offshore met-mast .....	98
Fig. 4-41 Power production bias and RMSE at Kimnyeong offshore met-mast .....	98
Fig. 4-42 Power production bias and RMSE with seasons at Kimnyeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November and winter is December to February .....	99
Fig. 4-43 Power production bias and RMSE with lead time at Kimnyeong offshore met-mast .....	100

## List of Tables

Table 1-1 Potential onshore and offshore wind energy in Korea and Jeju (As of 2017) .....	2
Table 1-2 Current status of wind power forecasting models .....	7
Table 1-3 Number of Observation and Model data points at Daejeong offshore met-mast .....	11
Table 1-4 Number of Observation and Model data points at Kimnyeong offshore met-mast .....	12
Table 1-5 Specification of the wind turbine .....	14
Table 2-1 Classification of weather prediction according to wind speed forecast lead time .....	17
Table 2-2 Classification of weather prediction methods .....	19
Table 2-3 Overview of WRF as numerical meteorological model .....	22
Table 2-4 Options of planetary boundary layer .....	24
Table 2-5 Prediction process of WRF .....	26
Table 3-1 Specification of wind sensors and measurement heights at Daejeong offshore met-mast .....	28
Table 3-2 Site and measurement conditions at Daejeong offshore met-mast ....	29
Table 3-3 Specification of wind sensors of the met-mast at Kimnyeong offshore met-mast .....	31
Table 3-4 Site and measurement conditions at Kimnyeong offshore met-mast .....	31
Table 3-5 Frequencies of wind direction and wind power density for significant wind directions at Daejeong offshore met-mast .....	36
Table 3-6 Frequencies of wind direction and wind power density for significant wind directions at Kimnyeong offshore met-mast .....	42

Table 4-1 Domains of WRF .....	43
Table 4-2 List of physical options applied to WRF model .....	45
Table 4-3 Test period for physical model optimization .....	46
Table 4-4 Physical options selected .....	49
Table 4-5 Bias and RMSE of WRF model and WRF-OML model at Daejeong offshore met-mast .....	66
Table 4-6 Frequency by wind directions of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast .....	70
Table 4-7 Monthly mean wind speed from the observation data and from the models for the filtered data at Daejeong offshore met-mast .....	75
Table 4-8 Monthly wind power production from the met-mast observation data and from the prediction data of the models at Daejeong offshore met-mast .....	83
Table 4-9 Bias and RMSE of WRF model and WRF-OML model at Kimnyeong offshore met-mast .....	84
Table 4-10 Frequency by wind direction of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast .....	88
Table 4-11 Seasonal Bias and RMSE of WRF model and WRF-OML model at Kimnyeong offshore met-mast .....	93
Table 4-12 Monthly mean wind speed from the observation data and from the models at Kimnyeong offshore met-mast .....	94
Table 4-13 Monthly wind power production from the met-mast observation data and from the prediction data of the models at Kimnyeong offshore met-mast .....	101

## Abstract

As the optimal numerical forecasting method for offshore wind resource prediction, the atmosphere-ocean coupled model was proposed in this thesis. Weather forecasting models such as Weather Research and Forecasting (WRF), 5<sup>th</sup> generation Mesoscale Model(MM5) and Auto-Regressive Integrated Moving Average(ARIMA) has been used for predicting wind speeds, and especially atmospheric models are utilized for wind resource forecasting. On the other hand, unlike on land, the mixing of seawater occurs in the ocean with the change of solar radiation and wind conditions, which leads to a change in the sea surface temperature during a short period of time. Since spatio-temporal changes in sea surface temperature affect wind conditions, the temperature are very important variables for forecasting offshore wind power production.

In this thesis, the Weather Research and Forecasting-Ocean Mixed Layer (WRF-OML) model, an atmosphere-ocean coupled model, was used to reflect the change in sea surface temperature, ocean surface heat flux with time and then, the forecasting results were compared with those from the WRF model which is a kind of the atmospheric model. Finally, predictions from the WRF and the WRF-OML models were compared with offshore met-masts measurements which is a reference in this thesis. In order to quantify the accuracy of wind predictions from the two models, Root-Mean-Square-Error (RMSE) and bias were calculated. The offshore met-masts were installed off the Daejeong and Kimnyeong regions of Jeju Island, respectively. The measurements from 94 m on Daejeong offshore met-mast were analyzed in term of electric power production as well as wind speed and wind direction, while those from 68 m on Kimnyeong offshore met-mast were done. The power production was derived based on the power curve of the 5.56 MW

WinDS5560 wind turbine model. The analyzed periods were both for one year, from 1st Aug. 2015 to 31st Jul. 2016 for Daejeong offshore met-mast, and from 1st Dec. 2012 to 30th Nov. 2013 for Kimnyeong offshore met-mast.

As a result, for Daejeong offshore met-mast, the bias and RMSE of the WRF model were 1.09 m/s and 2.88 m/s, respectively, while those of the WRF-OML model were -0.07 m/s and 2.45 m/s, respectively. That is, the WRF-OML model had higher accuracy than the WRF model.

As for Kimnyeong offshore met-mast, the bias of -0.57 m/s and RMSE of 4.41 m/s were found using the WRF model, while the bias of 0.16 m/s and RMSE of 3.54 m/s were calculated using the WRF-OML model. The WRF-OML model also performed better than the WRF model.

The frequencies of the wind direction and the directional wind power density were both mainly from the north-west on the basis of the actual data and the results of two models. For Daejeong offshore met-mast, the wind frequencies from the north-west were 42.8 % from the actual data, 25.9 % from WRF model and 26.4 % from WRF-OML model at the met-mast position. The frequency of directional wind power density were 55.2 %, 35.6 % and 39.3 %, respectively. As for Kimnyeong offshore met-mast, the wind frequencies from the north-west were 40.9 %, 23.0 % and 33.8 % from actual data, the WRF model and the WRF-OML model at the met-mast position, while the frequencies of directional wind power density were 54.4 %, 31.8 % and 44.3 %, respectively. This result means that the WRF-OML model predicted more accurately than the WRF model for the frequencies of wind direction and directional wind power density.

For the two offshore met-masts, the RMSEs of the WRF-OML model for the monthly and the seasonal wind speeds as well as wind speed with lead time were all lower than those of the WRF model. As for the wind power production prediction, the WRF-OML model also had higher accuracy.

The AEP (annual energy production) estimation based on the predicted

wind speed from the WRF model showed an overestimation of 15.3 % and an underestimation of 10.9 % at Daejeong and Kimnyeong offshore met-masts, respectively. On the other hand, the AEP from the WRF-OML model showed an underestimation of 5.9 % and 0.2 % at the two sites, respectively. In other words, the WRF-OML model had better performance than the WRF model in terms of AEP estimation as well as wind speed estimation.

## 초 록

해상 풍력자원예측을 위한 최적의 수치예측 방법을 적용하기 위해 대기-해양 접합모델을 제안하였다. 풍속예측기술은 주로 기상수치예측모델을 활용하고 있으며, 특히 대기모델을 활용한 풍력자원예측에 관한 연구는 매우 활발하게 진행되고 있다. 한편, 육상과 달리 해상에서는 태양복사 및 바람의 강도에 따라 해수의 혼합작용이 발생하며, 이로 인해 단기간에 해수면 온도(Sea Surface Temperature)변화가 크게 나타날 수 있다. 해수면 온도의 시공간적 변화는 바람에 영향을 미치게 되므로 풍력자원 및 발전량 예측에 있어서 매우 중요한 변수가 된다.

본 논문에서는, 시간에 따라 변하는 해수면온도 및 해양표면 플릭스를 반영하기 위해 대기-해양 접합모델인 WRF-OML(Weather Research and Forecasting - Ocean Mixed Layer) 모델을 활용하였으며, 그 결과를 대기모델인 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델과 비교하고, 최종적으로 해양에서의 met-mast 측정값과 비교 검증하였다. 검증의 대상은, 해상풍력발전단지 설치 예정인 대정해상에 설치된 met-mast의 94 m 높이에 설치된 풍속계 및 김녕해상에 설치된 met-mast의 68 m 높이에 설치된 풍속계로부터의 풍속데이터이다. 발전량은 정격출력 5.56 MW인 WinDS5560 풍력발전기의 출력 곡선을 기반으로 산출하였다. 분석기간은 대정해상은 2015년 8월 1일부터 2016년 7월 31일까지, 김녕해상은 2012년 12월 1일부터 2013년 11월 30일까지 각각 1년의 기간으로 하였다.

본 논문에서는 풍속 및 발전량 예측정확도를 정량화하기 위해 통계적 방법인 Bias 및 RMSE(Root-Mean-Square-Error)를 계산하였다. 대정 해상에서의 1년 기간 동안 기상탑 94 m 높이 풍속을 예측한 결과, WRF 모델의 Bias와 RMSE는 각각 1.09 m/s, 2.88 m/s였으며, WRF-OML 모델의 Bias와 RMSE는 각각 -0.07 m/s, 2.45 m/s로써, WRF-OML 모델이 더 좋은 성능을 보였다. 김녕 해상에서의 1년 기간 동안 기상탑 68 m 높이 풍속 예측 결과, WRF 모델의 Bias와 RMSE는 각각 -0.57 m/s, 4.41 m/s였으며, WRF-OML 모델의 Bias와 RMSE는 각각 0.16 m/s, 3.54 m/s로써, WRF-OML 모델이 더 높은 정확도를 보였다.

실측자료와 두 모델의 예측결과 모두, 바람빈도 및 에너지밀도는 북서풍 계열이 가장 높은 빈도를 보였다. 대정 해상에서, met-mast 실측값, WRF 모델, WRF-OML 모델 각각에 대하여, 주풍향인 북서풍 계열의 바람빈도는 42.8 %, 25.9 %, 26.4 %를 보였으며, 에너지밀도는 55.2 %, 35.6 %, 39.3 %를 보였다. 에너지밀도가 바람빈도보다 약 10 % 이상 높아 주풍향에 대한 에너지효율이 높은 것으로 분석된다. 김녕 해상에서도 역시 북서풍 계열이 주풍향이며, met-mast 실측값, WRF 모델, WRF-OML 모델 각각에 대하여, 바람빈도는 40.9 %, 23.0 %, 33.8 %를 보였으며, 에너지밀도는 54.4 %, 31.8 %, 44.3 %를 보임에 따라, 대정해상에서와 마찬가지로 주풍향에 대한 에너지효율이 높았다.

월별, 계절별, 풍속구간별, 예측시간별로 분석을 한 대정해상과 김녕해상의 RMSE는, 모든 구간 및 기간에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 낮은 값을 보여, 예측성능이 더 우수함을 보였다. 발전량에 대한 월별, 계절별, 예측시간별 분석결과 역시 모든 구간 및 기간에서 WRF-OML 모델의 RMSE가 WRF 모델보다 낮은 값을 보여 높은 성능을 보여주고 있다. 한편, 풍속 및 발전량 예측시간이 길어질수록 오차는 점차 커지는 특성을 보였다.

대정해상에서 예측 풍속에 근거한 연간발전량 추정결과, 기상탑 측정값 대비 WRF 모델은 15.3 % 과다 모의하는 반면, WRF-OML모델은 5.9 % 과소 모의하는 경향을 보였다. 또한 김녕해상에서의 연간발전량은, 기상탑 대비 WRF 모델은 10.9 % 과소모의 하였으며, WRF-OML 모델은 0.2 % 과소모의 하였다.

결과적으로, 풍속 예측성능의 경우, 대정해상과 김녕해상 각각 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 11.8 % 및 5.0 % 우수하였다. 또한 발전량 예측성능의 경우, 대정해상과 김녕해상 각각 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 9.4 % 및 10.7 % 우수하였다.

해상풍력단지 건설을 위한 후보지 선정 시, met-mast를 설치하고 1년 이상의 실측을 거쳐 풍황이 우수한 곳을 선정함에 따라 발생하는 경제적 비용과 시공간적 비용은 매우 크다. 본 논문에서 제안한 WRF-OML 모델을 활용하여 해상풍력자원을 예측함으로써, 해상풍력단지 건설을 위한 최적의 후보지 선정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.





# 제1장. 서론

## 1.1. 연구 배경 및 필요성

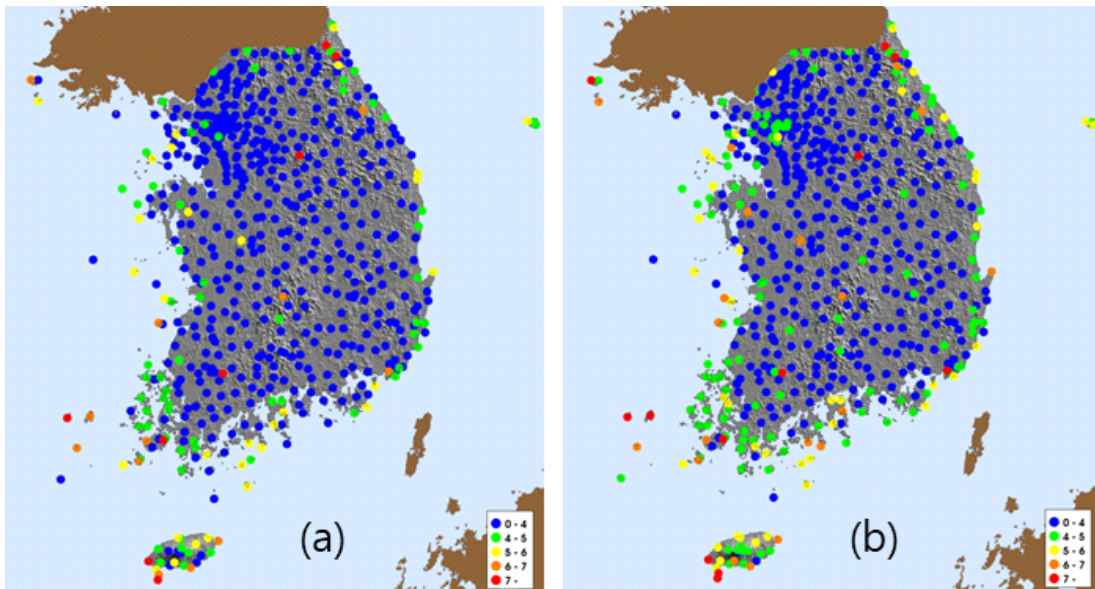
전 세계적으로 지구온난화를 비롯한 기후변화가 지속적으로 진행되고 있으며, 특히 재생에너지원의 개발은 화석연료 고갈 문제를 해결하기 위해 필수적이다. 풍력에너지는 전세계에서 활용하고 있는 매력적인 재생가능 에너지원으로써, 에너지 안보와 기후변화 속도를 완화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 [1]. 석유, 석탄 등 화석연료는 투입량에 따라 발전량을 예측하는 방식으로 운영하지만, 자연자원인 바람을 에너지원으로 변화시키는 풍력발전은 변동성이 큰 바람에 따라 발전량이 정해지므로 정확한 발전량을 예측하는데 어려움이 있다. Table 1-1에서와 같이, 2017년 현재 국내 육·해상 풍력자원의 기술적 잠재량은 총 1,932 TWh/년(해상풍력에너지는 1,176 TWh/년)이며, 이는 국내 총 발전량의 3.5배에 해당한다. 그중 제주도의 경우, 풍력에너지의 기술적 잠재량은 224 TWh/년 (해상풍력에너지는 193 TWh/년)에 달하는 것으로 평가되고 있다 [2]. 한편, 제주특별자치도는 CFI 신재생에너지 보급 목표 수정안(2019년)을 통해, 2019년 현재 595 MW인 해상풍력 발전용량을 2030년까지 1.9 GW 보급을 목표로 하고 있다 [3].

대한민국은 면적의 약 70 %가 산악지역으로 구성되어 있어 대규모 풍력단지 건설을 위한 가용면적에 제한이 있다. 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 지리적 요건상 대규모 풍력단지 건설을 위해 해상 풍력단지 개발이 필수적이다. 특히, 해상풍력단지는 육상풍력에 비해 더 풍부한 바람자원을 확보할 수 있고, 대형 터빈 설치와 대규모 단지 건설에도 유리한 조건을 가지고 있다. 한국에너지기술연구원 [4] 및 기상청 [5]에 의해 개발된 국가 바람지도에 따르면 남해안 및 서해안 도서지역과 연안을 비롯하여 제주도 부근 해상에서의 연평균 풍속이 6 m/s 이상으로써, 국내 해상풍력자원의 풍부함을 설명하고 있다(Fig. 1-1).

특히, 제주도는 이미 한림 지역에서 35 MW 용량의 탐라해상풍력단지를 운영중이며 [6], 대정 및 김녕 해상에서도 해상풍력발전단지 건설을 추진중이다.

**Table 1-1.** Potential onshore and offshore wind energy in Korea and Jeju (As of 2017)

Classification		Onshore		Offshore	
		Korea	Jeju	Korea	Jeju
Power production (GWh/year)	Theoretical	942,142	31,087	1,384,904	197,133
	Technical	755,771	30,653	1,175,786	193,349
	Market	38,622	6,047	70,996	4,088
Facility capacity (GW)	Theoretical	498.8	9.2	461.6	56.1
	Technical	352.3	9.0	386.6	55.0
	Market	16.7	1.9	22.0	1.2



**Fig. 1-1.** Annual mean wind speed at (a) 50 m height and (b) 80 m height (Korea Meteorological Administration, 2007)

그러나 육상에 비해 신뢰할 수 있는 해상 풍력데이터가 부족하기 때문에 해상 풍력단지를 확보하는데 한계가 있으며, 이로 인해 해양에서의 풍력발전량을 예측하는데에도 어려움이 따른다 [7]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존에 많이 사용하는 수치예측모델을 대체 또는 개선하여 예측성능을 높일 필요가 있다.

풍력 발전량 예측의 기본이 되는 풍속예측을 위해 주로 기상수치예측(Numerical Weather Prediction, NWP) 모델을 활용하고 있다. 특히, Weather Research and Forecasting(WRF) 모델은 국제적으로 널리 활용되고 있으며, 기상변수를 연구하고 시뮬레이션하기 위한 매우 강력하고 유용한 도구이다 [8]. WRF 모델을 활용한 이베리아 근해 풍력자원 평가 [9], 칠레의 해상풍력 시뮬레이션 [10], 터빈 높이 풍속예측을 위한 WRF 모델 향상방안 [11] 등 WRF를 활용한 풍력자원 예측에 관한 연구들이 활발히 진행되어왔다 [12-21].

기상모델 대부분은 육상에서는 1-10 km 해상도의 지형고도 자료를 사용하고, 외해에서는 50-200 km 해상도의 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST) 자료를 주로 사용한다. 공간적으로 수온변동이 크지 않은 외해에서는 고해상도의 SST 자료가 필요하지 않지만, 조석과 해류에 의해 공간적으로 수온변동이 큰 연안에서는 50 km 이상 격자의 SST 자료로는 국지적인 해양특성을 반영하기 어렵다. Park et al [22]은 한반도 서해상에서 해수면온도의 균일한 변화가 대기온도 및 대기안정도에 영향을 주며, 바람의 변화는 해수면 온도의 수평분포에 민감한 영향을 준다고 하였다.

고해상도 SST 및 SST 일변화를 기상모델에 반영하기 위해서는 해수의 수직 혼합과정을 모사할 수 있는 해양혼합층(Ocean Mixed Layer, OML)모델을 고려할 필요가 있다. Schade and Emanuel [23]은 SST가 내려가 해양이 차가워지면 상향 엔탈피 플럭스를 줄임으로써 사이클론의 강도를 약화시키는 원인이 된다고 하였다. Kawai et al. [24]은 여름철 SST 일변화가 커지면 해수의 연직순환이 약해지고 해수면 부근 기온이 상승함을 보였다. Dai and Trenberth [25]는 SST 일변화가 고려되지 않을 경우 대기순환에 의한 일변화가 과소모의 된다고 하였다.

기상예측 성능 개선을 위해 대기모델과 해양혼합층모델을 접합한 연구도 진행되고 있다. Noh et al. [26]은 NWP-OML 접합을 통해 SST 일변화를 수치모델에 반영한 결과, 맑고 바람이 약한 경우 SST가 급격히 상승하였음을 보였고,

Chang and Anthes [27]는 해양모델과 이상적으로 결합된 허리케인모델에서 SST 냉각이 경계층의 평균온도와 수증기를 감소시키는 결과를 보였다. Lee and Chen [28]은 대기-과동-해양 접합모델 시뮬레이션을 통해 열대폭풍(Tropical cyclone, TC) 내에서 발생하는 지속적인 후류냉각으로 인해 대기혼합층(atmospheric mixed layer)이 얕아지고, 잠재온도가 낮아질 수 있음을 보였다. 이 연구들의 결과는 접합모델을 사용할 경우 더 정확하게 온도변화의 예측을 수행하였으며, 이는 결과적으로 해상에서 풍속 예측성능을 높일 수 있다.

풍력 발전량 예측을 위한 기존의 기상수치모델은 SST의 일변화 및 해수의 수직혼합과정을 고려하지 않아 해상에서의 발전량 예측에 한계가 있었다. 또한 풍력에너지는 풍속의 세제곱에 비례하기 때문에 풍력 터빈에 의해 생성된 발전량을 예측하기가 더 어렵다. 게다가 대기-해양 접합모델을 사용한 풍력 예측에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 논문에서는 풍력 뿐만 아니라 해상 풍력 발전기에 의해 생성되는 발전량을 예측하기 위해 대기모델인 WRF 모델보다 개선된, 대기-해양 접합모델인 WRF-OML 모델을 제시하였다. 제안한 WRF-OML 모델로부터 예측된 풍속은 기존의 대기모델인 WRF 모델을 이용한 풍속예측결과와 제주도 해상에 설치된 2종의 기상탑으로부터 측정된 실제 풍속과 비교되었다. 또한, 해상기상탑 위치 각각에서 각 풍속에 대한 발전량을 산출하여 비교하였다. 이를 통해 해양조건을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 예측정확도가 더 향상되었음을 증명하였다.

## 1.2. 연구 동향

풍력의 에너지원인 바람은 해당 지역의 지리적 및 지형적 조건에 따라 달라지기 때문에 해당 지역에 최적화된 기술개발이 선행되어야 한다. 풍력발전의 선진국이라고 할 수 있는 미국과 유럽 내 여러 국가들은 풍력 발전량 및 바람자원을 예측하기 위한 기술개발을 선도하고 있으며, 국내에서도 육상에 설치된 풍력발전기를 대상으로 예측기술의 개발이 이루어지고 있다.

미국은 전력회사 별로 PJM, 3TIER 등의 풍력 예측시스템을 보유하고 있으며, 대표 모델로는 Previento 및 eWind 등이 있다 [29-30]. 특히, PJM은 물리모델과 통계 모델 등을 활용하여 자체적으로 개발한 Previento라는 모델을 이용하여 전력생산 계획을 수립하고 풍력 에너지 예측에 이용하고 있다. 이 회사는 약 165 GW 용량에 해당하는 세계 최대규모의 전력계통과 전력시장을 운영하고 있는 비영리기관으로써, 미국 동부 13개 주와 워싱턴의 전력계통과 도매전력시장을 운영하고 있다.

유럽에서는 풍력분야 선진국을 중심으로 2001년 ANEMOS 컨소시엄을 설립하고, 2002년에는 풍력관련 산업체, 전력운영자, 대학 등 전문가들이 모여 ANEMOS 프로젝트를 출범시킴에 따라 통계모델 및 물리모델의 예측정확도 향상을 위한 연구를 수행하였다 [31]. 이 프로젝트는 유럽의 각국과 연계하여 최적의 예측환경을 구축하고 상호협력을 통해 기술력 향상을 목적으로 하고 있다.

일본은 2008년부터 풍력발전량 예측시스템을 실용화하고 기상물리모델을 기반으로 단지 실시간 자료를 적용하여 발전량을 예측하는 기술을 활용하고 있다. 또한 복잡한 지형의 풍황 변화를 고려하기 위하여 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기법을 적용한 정확도 개선도 병행하고 있다 [32].

육상과 해상 모두 풍력 에너지를 산출하기 위해서는 사전에 풍력자원의 산정이 중요하다. 그러나 해상의 경우, 지표면과 달리 해수면의 지형적 변화가 거의 없어 지형으로 발생하는 복잡한 영향을 고려하지 않아도 되는 이점이 있다. 따라서 해상 풍 자료만으로도 해상의 풍력자원량을 신뢰성 있게 산출할 수 있다는 이점이 있다. 이창훈 외 [33]는 육상풍력 계산에 사용되는 풍력자원 공간분포지도를 이용하여 해상풍력의 잠재용량을 산정하였다. 자료취득의 한계로 인해 대상해역(풍력밀도 300 W/m<sup>2</sup> 이상, 수심 50 m 이하, 육지로부터 거리 50 km 이내)의 10 %만 설치한다는

가정하에 해상풍력 잠재용량 44,415 MW, 해상풍력 잠재발전량 127.7 TWh를 제시하였다. 이 연구결과는 해상풍력 잠재발전량이 육상풍력에 비해 3.7배 높은 것이다.

풍력자원 공간분포지도 이외에 서해안 5개 지점의 2014년 연간 풍속 자료를 수집·분석하여 풍력발전 부존량을 산정한 연구도 진행되었다 [34]. 연구 결과에 따르면 서해안 지역의 풍력발전 부존량은 북쪽에서 남쪽으로 내려갈수록 연평균 풍력 에너지밀도가 커지는 것을 알 수 있었다. 12월에 풍력 에너지밀도가 가장 높고 6월에 가장 낮았으며 갈매여 관측지점에서는 월평균 풍력 에너지밀도가 20배 이상 차이를 보여 계절적 풍력에너지의 격차가 심하게 나타나고 있었다. 하지만 다양한 종류의 터빈을 이용할 경우 연간 발전량 및 터빈 이용률이 변할 수 있다고 하였다.

국내에서는, 다변량 분석과 같은 통계적 방법으로 단기 출력을 예측하는 방법이 연구되기도 하였으나 [35], 6시간 이상의 발전량 예측에는 적합하지 않은 단점이 있다. 미국 및 유럽 국가들에 비해 늦게 시작되었으나, 국내에서도 기상수치모델을 풍력 분야에 적용하여 풍력지도를 제작하는 등 풍력발전량을 예측하기 위한 연구가 진행되고 있으며 [36-40], 특히 타 지역보다 신재생에너지 생산이 많은 제주도를 중심으로 기상수치모델을 활용한 연구가 다수 수행되었다 [41-46].

풍력단지 개발을 위한 연구가 국내외에서 다양하게 수행되어 왔으나 대부분 육상 풍력단지 개발에 집중되는 경향이 있으며 최근에는 대규모 풍력단지 개발을 위한 해상 풍력자원평가에 대한 필요성이 증가하고 있다. 국내의 경우에도, 오기영 등 [47]은 해상 기상탑으로부터 실측된 바람데이터를 활용하여 국내 남서부 해안의 풍력자원을 추정하였으며, 육상에서 실측된 두 개 지점의 데이터를 이용하여 장기간 풍속을 예측하였다. 그 외에도 기상수치모델을 활용하여 해상풍력단지 개발을 위한 다수 연구가 있다 [48-50].

풍력예측기술은 풍력산업과 동반하여 발전해 왔으며, 기상물리모델인 WRF 시스템, 통계모델인 ARIMA 모델, 칼만필터, 인공신경망 등이 활용되고 있다. 그 중에서도 가장 중요한 기반기술은 기상예측기술이며, 이와 함께 전력기술 및 예측정보의 최적화 기술이 활용되고 있다 [51]. Table 1-2는 여러나라에서 활용되고 있는 대표적인 발전량 예측 모델을 보여주고 있다.

Table 1-2. Current status of wind power forecasting models

Model	Cooperation	Operating Site	Method
Previento	University of Oldenburg, Germany	Germany	Physical
WPPT	IMM: University of Copenhagen	Denmark	Statistical
Predikktor	Risoe	Spain, Denmark, Germany, USA	Physical
PowerSight	3TIER	USA	Statistical
AWPPS (More-Care)	Armines/Ecole des Mines de Paris	Ireland, Creta, Madeira	Statistical Fussy-ANN
Zephyr, Combination of WPPT and Prediktor	Rosoe and IMM	Denmark	Physical Statistical
RAL (More-Care)	RAL	Ireland	Statistical
SIPREOLICO	University Carlos III, Madrid Red Electrica de Espana	Spain	Statistical
LocalPred -Regiopred	CENER	La Muela, Soria, Alaiz	Physical



### 1.3. 연구 목적

전력시장에서는 풍력발전량 예측 오차에 따라 순이익의 차이가 매우 크게 나타나는데, 영국에서는 풍력발전량 예측정보 활용에 따른 경제효과를 2003년 전력시장 기준으로 약 5 £/MWh의 시뮬레이션 결과를 제시하였다 [52]. 미국 신재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)는 풍력발전량 예측정보를 활용할 경우 100 MW 단지에서 연간 4십만달러 정도의 비용절감 효과가 있다고 하였다 [30]. 덴마크에서는 풍력발전량 예측정보를 활용할 경우 1.3-2.7 Euro/MWh의 비용절감이 가능하다고 하였으며 [53], 이는 20MW 단지에 적용할 경우 연간 약 3억5천-7억원에 해당하는 경제적 효과를 창출한다.

우리나라에서도 이와 같은 경제적 이익을 위해 대규모의 풍력단지에 대해 풍력발전량 예측기술을 적용하여 운영하고 있다. 한편, 현재까지의 대규모 풍력단지는 대부분이 육상에 설치되어 있으며 풍력발전량 예측기술의 중요한 기반기술인 기상물리모델은 육상에서 최적화되어 있다.

본 논문에서는 제주도 해상에 설치 예정인 풍력단지에서의 풍력발전량 예측기술을 개발함에 있어서, 해수면온도의 일변화 등 해상 조건을 반영한 기상물리모델을 제안함에 따라 기존의 기상물리모델을 적용할 때보다 더 정확도가 높은 예측기술을 개발하고자 한다. 또한 풍향, 풍속 등 풍력자원 및 발전량 예측에 도움이 되는 모델링 방법으로써 본 연구방법을 제안하고자 하며, 다음의 연구목표를 지향하여 연구를 수행하였다.

1) 기초 풍력자원평가 : 본 연구의 대상이 되는 제주도 대정지역과 김녕지역의 고도별 풍속 및 풍향, 풍향밀도, 에너지밀도 등 기초 풍력자원을 분석한다.

2) 풍속 및 발전량 예측 프로세스 설계 : 본 연구의 대상이 되는 지점에 대한 풍향 및 발전량 예측을 위해, 물리옵션 선정 등 기상수치모델 WRF의 물리과정 최적화 등을 통해 국지 바람 예측기법을 개발한다. 또한 해양혼합층(OML)모델을 적용하여 해상에서의 SST 일변화 및 혼합층두께(Mixed Layer Depth, MLD) 변화를 고려한 대기-해양접합모델을 개발한다.

3) 접합모델을 활용한 풍속 예측결과의 검증 : 접합모델로부터 예측된 풍속과 대기모델인 WRF 모델로부터 예측된 풍속을 해상 기상탑에서 실제 관측된 풍속과 비교한다. RMSE, Bias 등의 통계적 방법론을 사용하여 두 모델 간 예측정확도를 검증한다.

4) 접합모델을 활용한 발전량 예측결과의 검증 : 접합모델로부터 예측된 풍속을 기반으로 산출된 발전량과 대기모델인 WRF 모델로부터 예측된 풍속을 기반으로 산출된 발전량은, 해상 기상탑에서 실제 관측된 풍속을 기반으로 산출된 발전량과 비교한다. RMSE, Bias 등의 통계적 방법론을 사용하여 두 모델 간 예측정확도를 검증한다.

#### 1.4. 연구 방법

본 논문에서는 해양에서의 실측데이터 확보가 가능한 2개 지점을 선정하였으며, 각각 1년 동안의 데이터(대정: 1 Aug 2015 - 31 Jul 2016 / 김녕: 1 Dec 2012 - 30 Nov 2013)를 수집하였다. 실측데이터와 동일 기간에 해당하는 모델 예측데이터가 사용되었으며, 활용 모델은 기존의 기상수치모델인 WRF 모델 및 기존의 모델에 해양혼합층(OML)모델을 융합한 접합모델인 WRF-OML 모델이다. 사용된 데이터는 지점별 기상탑에서의 풍속관측 최고 높이(대정 94 m, 김녕 68 m)에서의 풍향·풍속 데이터로써, 측정데이터를 두 모델의 예측데이터와 비교하여 두 모델 간의 정확도를 검증하였다.

Table 1-4 및 Table 1-5는 본 논문에서 사용된 데이터 목록을 보여주고 있다. 사용된 관측데이터 수는, 대정의 경우 366일간 매시간 데이터 8,784개, 김녕의 경우 365일간 매시간 데이터 8,760개가 사용되었으며, 두 지점에서의 측정데이터 회수율은 100 %이다. 사용된 모델데이터 수는, 대정의 경우 13,488개, 김녕의 경우 17,520개이다. 모델은 일 1회 수행되며, 이때 48시간까지의 예측이 이루어지므로, 하나의 실측데이터와 대응되는 모델 데이터는 정확히 두 배가 된다. 표에서와 같이, 김녕에서의 모델데이터 회수율은 100 %이지만, 대정에서의 모델데이터 회수율은 76.8 %이다. 지역모델인 WRF 구동을 위해 초기 입력데이터로써 전구모델인 GFS 모델데이터가 필요한데, 대정의 경우 어떤 알 수 없는 이유로 인하여 GFS 데이터의 누락이 발생한 것이 그 원인이다. 이러한 이유로, 대정의 경우 사용된 관측데이터는 모델데이터와의 비교를 위해 필터링 된 데이터를 사용하였다.

**Table 1-3.** Number of Observation and Model data points at Daejeong offshore met-mast

Period	Number of data point			
	OBS.	Filtered	WRF (recovery rate, %)	WRF-OML (recovery rate, %)
Aug. 2015	744	696	1,392(0.93)(93.5)	1,392(0.93)(93.5)
Sep. 2015	720	384	768(0.53)(53.3)	768(0.53)(53.3)
Oct. 2015	744	624	1,248(0.84)(83.9)	1,248(0.84)(83.9)
Nov. 2015	720	696	1,392(0.97)(96.7)	1,392(0.97)(96.7)
Dec. 2015	744	504	1,008(0.68)(67.7)	1,008(0.68)(67.7)
Jan. 2016	744	648	1,296(0.87)(87.1)	1,296(0.87)(87.1)
Feb. 2016	696	672	1,344(0.97)(96.6)	1,344(0.97)(96.6)
Mar. 2016	744	696	1,392(0.94)(93.5)	1,392(0.94)(93.5)
Apr. 2016	720	504	1,008(0.70)(70.0)	1,008(0.70)(70.0)
May 2016	744	240	480(0.32)(32.3)	480(0.32)(32.3)
Jun. 2016	720	600	1,200(0.83)(83.3)	1,200(0.83)(83.3)
Jul. 2016	744	480	960(0.65)(64.5)	960(0.65)(64.5)
Sum (recovery rate, %)	8,784 (100.0)	6,744 (76.8)	13,488 (76.8)	13,488 (76.8)

**Table 1-4.** Number of Observation and Model data points at Kimnyeong offshore met-mast

Period	Number of data point			
	OBS.	Filtered	WRF (recovery rate, %)	WRF-OML (recovery rate, %)
Dec. 2012	744	744	1,488(100)	1,488(100)
Jan. 2013	720	720	1,440(100)	1,440(100)
Feb. 2013	744	744	1,488(100)	1,488(100)
Mar. 2013	720	720	1,440(100)	1,440(100)
Apr. 2013	744	744	1,488(100)	1,488(100)
May 2013	744	744	1,488(100)	1,488(100)
Jun. 2013	672	672	1,344(100)	1,344(100)
Jul. 2013	744	744	1,488(100)	1,488(100)
Aug. 2013	720	720	1,440(100)	1,440(100)
Sep 2013	744	744	1,488(100)	1,488(100)
Oct. 2013	720	720	1,440(100)	1,440(100)
Nov. 2013	744	744	1,488(100)	1,488(100)
Sum (recovery rate, %)	8,760 (100.0)	8,760 (100.0)	17,520 (100)	17,520 (100)

기본적인 풍황 분석에는 와이블분포함수를 사용하였다. 잠재적 풍력에너지 및 평균풍속을 계산하기 위한 풍속의 도수분포로써 와이블 분포가 많이 사용되며, 이는 풍력발전단지 설계를 위한 중요한 역할을 한다. 와이블 분포는 확률밀도함수로 나타낼 수 있으며, 그 표현식은 다음 식(1-1)과 같다.

$$PDF = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \text{-----}(1-1)$$

와이블분포는 두 개의 파라미터인 c와 k로 구성된다. c는 척도계수(scale factor)로써 m/s의 단위를 가지며 풍속의 크기를 결정한다. k는 형상계수(shape factor)로써 단위가 없는 무차원수(dimensionless number)이며 분포 곡선의 형상을 결정한다.

수치모델 해석 결과 얻어진 평균풍속을 활용하여 연간발전량(Annual Energy Production, AEP)을 산출하였다. AEP는 풍력발전기에서 연간발전량을 산정하여 경제성을 판단하는 중요한 역할을 한다. AEP는 1년 8,760 시간에 대하여 실측데이터를 통해 산출된 와이블 분포와 풍력발전기 제작사에서 제공하는 Power curve를 활용하여 계산한다. AEP는 와이블 분포에 따라 변하는 값이므로 AEP를 통해 와이블 분포의 척도계수와 형상계수의 차이에 의한 편차를 알 수 있다. AEP는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$AEP = \sum_{i=1}^n (P(V_i) \times f(V_i) \times 8,760) \text{-----}(1-2)$$

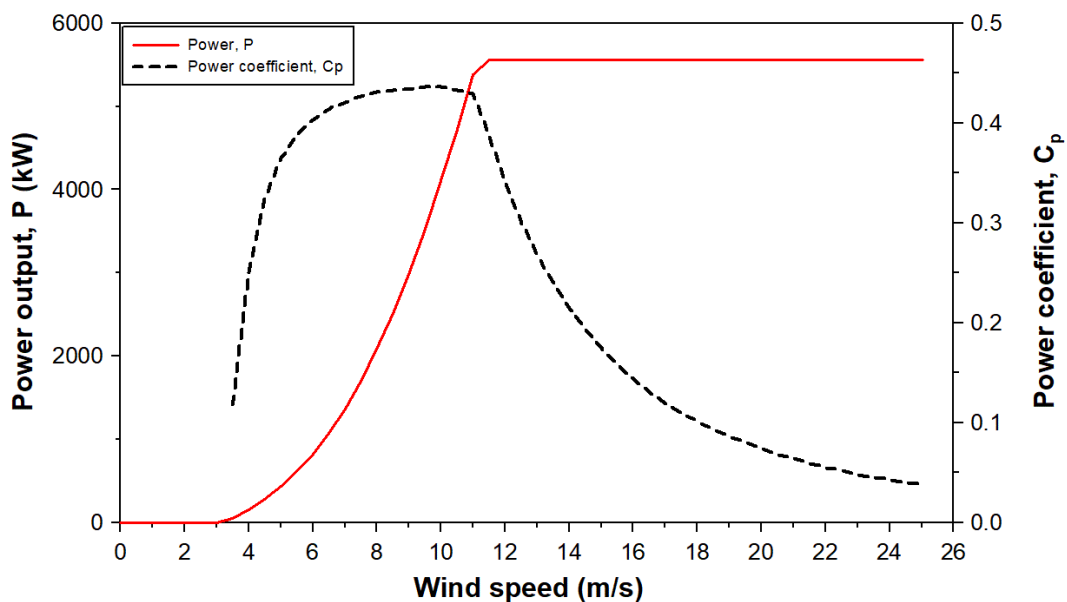
여기서 AEP는 연간발전량 [kWh], P(V)는 풍속 V의 발생전력 [kW], f(V)는 풍속 V의 발생확률이다. 시동풍속부터 중단풍속까지 각 풍속별로 산출한 발생전력량의 총합이 연간발전량이 된다. 본 논문에서는 대정에서의 관측 기간은 윤년이 포함되어 있어 식 중 8,760은 8,784로 대체하여 계산하였다.

Table 1-5는 본 논문에서 AEP를 산출하기 위해 선정된 풍력발전기의 제원을 보여주고 있다. 대정 해상풍력발전단지에 설치 예정인 풍력발전기인 A사의 모델은 김녕 해상풍력발전단지에도 설치 가능한 모델이다. 특히 본 논문에서 해석의 대상이

되는 김녕 해상기상탑은 68 m의 높이지만 실제 해상풍력발전단지 예정지에는 A사의 모델이 80 m 이상에 설치되어 운영함을 고려하여 두 지점 모두 동일한 모델을 대상으로 분석하였다. 해당 풍력발전기의 power curve는 아래 그림 1-2와 같다.

**Table 1-5.** Specification of the wind turbine used

Items	Description
Model	WinDS5560
Rated power	5.56 MW
Rotor diameter	139 m
Cut-in wind speed	3.5 m/s
Rated wind speed	13.0 m/s
Cut-out wind speed	25.0 m/s
Gear box type	spur / planetary
Generator type	synchronous permanent



**Fig. 1-2.** Power curve and power coefficient of the wind turbine used

본 논문에서는 기존의 기상수치모델인 WRF 모델과 접합모델인 WRF-OML 모델을 활용하여 두 지점에 대한 풍속을 각각 예측하고 해상기상탑의 실측값과 비교하였다. 한편, 예측된 풍속을 기반으로 풍력발전량을 도출하여 실측된 풍속 기반의 풍력발전량과 비교하였다. 풍속 및 풍력발전량 예측결과의 정확도 검증을 정량적으로 확인하기 위해 통계적인 방법을 사용하였으며, 아래 식 (1-3), (1-4) 와 같이 Bias 및 Root Mean Square Error(RMSE)를 계산하였다.

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (F_t - A_t)^2}{N}} \quad \text{-----}(1-4)$$

위 식에서  $F_t$ 는 예측값,  $A_t$ 는 관측값을 의미한다. 두 모델간의 예측결과를 비교하기 위해 사용된 데이터는 두 지점에서 다르다. 대정 해상기상탑의 경우 모델데이터는 filtered data이다. 각 모델의 예측값과 관측값을 서로 비교 후 모델간 성능을 비교하기 위해서는 일대일 대응이 필요하므로 관측데이터 역시 동일 시간의 자료만 filtered 하여 사용하였다. 그러나 김녕 해상기상탑의 경우 모든 관측값에 대해서 모델데이터가 존재함에 따라 filtered 할 이유가 없으므로 모든 데이터가 사용되었다. Bias가 양의 값을 갖는 경우에는 과대평가, 음의 값을 갖는 경우에는 과소평가를 의미한다. RMSE는 실측값과 예측값 사이의 오차값을 나타내는 것이며, 낮을수록 실측값에 가까우므로 정확도가 높다고 할 수 있다.



## 1.5. 논문의 구성

본 연구는 다음과 같이 구성하였다.

**제2장 “풍력 및 발전량 예측 기반기술 현황”** : 풍력 및 발전량 예측의 기반 기술인 기상예측 기술의 방법론(물리적 방법, 통계적 방법)을 고찰하고 대표적인 물리적 모델로써 기상물리모델을 소개하였다. 3차원 기상수치모델인 WRF의 역학적 특성을 설명하고 WRF의 예측절차를 정의하였다.

**제3장 “사이트 조건 및 기초 풍력자원평가”** : 본 연구의 대상지역인 대정과 김녕 사이트 해상기상탑의 제원 및 특성을 보였다. 한편, 측정데이터 및 모델 예측데이터의 분석방법에 대해 정의하였다. 또한, 본 연구의 실험 대상인 대정과 김녕 사이트의 와이블분포, 풍속특성, 윈드로즈 및 에너지로즈 등 기초 풍력자원평가를 수행하였다.

**제4장 “연구결과”** : 풍력 및 발전량 예측 프로세스 설계과정을 설명하였다. 물리과정 최적화를 위해 격자체계, 물리옵션 선정, 경계조건 등을 정의하였으며 이를 기반으로 국지 바람 예측기법을 개발하였다. 또한, 대기-해양 접합모델을 적용한 해상풍 예측 프로세스를 정의하였다. 개발된 국지 바람 예측기법(대기-해양 접합모델)을 활용하여 풍속 및 풍력발전량 예측결과를 검증하였다. 본 연구의 대상 지역인 대정과 김녕 사이트에서의 접합모델을 활용한 풍속 및 발전량 예측결과를 기존의 기상수치모델인 WRF와 비교함으로써 접합모델의 성능이 우수함을 검증하였다.

**제5장 “요약 및 결론”** : 대정 및 김녕해상 2개 사이트에서 접합모델을 활용한 국지 해상풍 예측결과를 요약하고, 결론을 도출하였다.

## 제2장. 풍력 발전량 예측 기반기술 현황

### 2.1. 기반기술 개요 및 현황

#### 2.1.1. 기상 예측기술

Table 2-1은 풍력 발전량 예측을 위해서는 기상예측기술의 선행이 필수적이다. 풍력 발전량 예측은 일반적으로 초단기예측, 단기예측, 중기예측, 장기예측으로 분류한다 [54, 55]. 초단기 예측은 수초에서 30분 이내, 단기 예측은 30분에서 6시간 이내, 중기예측은 6시간에서 24시간 이내, 장기예측은 24시간에서 7일까지이다.

Table 2-1은 선행시간에 따라 분류하는 예측의 종류를 보여주고 있다. 일반적으로, 6시간 이내의 초단기 예측 및 단기 예측은 과거 실적자료에 근거한 통계적 방법을 통해 예측이 수행되며, 6시간 이후의 단기 예측과 장기 예측은 물리적 방법을 이용하여 예측한다.

**Table 2-1.** Classification of weather prediction according to wind speed forecast lead time

Classification	Lead time	Methods
Early short term prediction	some seconds - 30 min.	statistical methods
Short term prediction	30 min. - 6 hours	physical methods + statistical methods
Medium term prediction	6 hours - 24 hours	physical methods
Long term prediction	24 hours - 7 days	physical methods

## (1) 물리적 방법

물리적 방법이란, 대기에서 일어나는 다양한 현상들을 물리식으로 표현하고, 예측하고자 하는 기상요소와 관련된 물리식을 물리과정을 사용하여 계산 후 예측을 수행하는 방법론이며, 대표적인 것이 수치기상예보(Numerical Weather Prediction, NWP)이다. 수치기상예보는 대기현상의 역학 및 물리적 원리에 대한 지배방정식들을 컴퓨터를 활용하여 연속적으로 수치적분함에 따라 현재의 대기상태를 분석하고 미래의 대기상태를 정량적으로 예측하는 과정이다. 6시간 이내의 초단기 예측과 단기 예측은 최근의 기상 요소들의 변화가 크게 변하지 않는다는 가정 하에 과거 자료를 통해 예측하는 통계적 방법이 가능하다. 그러나 6시간 이후의 기상은 과거의 자료만으로 예측하기에 분명한 한계가 있으므로, 대개의 경우 물리적 방법은 중기 또는 장기 예측 등 선행시간이 긴 경우 사용한다. 한편, 물리적 방법의 사용을 위해서는 다양한 기상자료와 많은 물리식 등이 필요하므로 컴퓨터 전산자원 및 많은 계산시간이 필요하다.

수치기상예보 시스템이 구축되면, 윈드프로파일 또는 시뮬레이션에 대한 매개변수를 활용하여 풍력발전기의 풍속을 계산한다. 이 풍속값을 제조사에서 제공된 power curve에 연결하여 전력량으로 출력할 수 있다. 한편 출력되는 전력량의 예측을 위한 물리적 방법, 즉 수치 기상예보를 활용하기 위해서는 막대한 양의 정보가 필요하다. 전 세계적으로 수많은 기상관측소에서 주기적으로 측정되는 기상요소들은 기상수치 모델이 운영되기에 필요한 많은 초기조건을 제공한다. 이때 불충분하거나 잘못된 초기조건이 입력될 경우 실제와 매우 다른 바람 정보를 예측하거나 특정 풍력발전기가 예측모델을 통해서 얻은 파워곡선과 일치하지 않는다면 예측 알고리즘이 잘못된 것일 수 있다. 결국, 실측데이터가 없이 수행되는 예측기법은, 그 정확도가 향상되기 위해 정확히 실측된 정보가 초기정보로 활용이 되고, 측정된 풍속과 파워 출력 간에 상관도를 높이는 작업이 병행되어야 한다 [56-59].

## (2) 통계적 방법

통계적 방법은 과거의 실적자료를 기반으로, 통계적 학습과 패턴 분석을 통해 6시간 이내의 기상을 예측하는 방법이다 [60]. 과거와 현재의 기상이 크게 다르지 않다는 전제 하에 수행되므로 과거 실적자료가 많을수록 추출 가능한 패턴이 충분하므로 더 높은 정확도를 얻을 수 있다. 물리적 방법과 달리 분석과 예측에 사용되는 시간이 짧으므로 빠른 시간에 예측이 가능하지만, 비교적 선행시간이 긴 중기 예측과 장기 예측에는 적용될 수 없다. 현재 상태가 매우 중요한 기반이 되므로 단기 예측에만 적합하며, 6시간 이후를 예측할 경우 물리적 방법이 함께 고려되는 것이 예측 정확도를 높일 수 있다 [61, 62]. 풍력에너지 예측을 위한 통계적 방법은 신경망회로(neural network), 다중회귀(multiple regression), 자기회귀평균이동(ARIMA, autoregressive moving average) 등이 있는데, 이 중 2개 이상의 통계적 방법을 융합하여 사용하는 경우도 있다 [63]. 본 논문에서는 통계적 방법을 고려하지 않은 순수한 물리적 방법을 이용하여 기상물리모델의 성능 및 정확도를 검증하였다.

Table 2-2는 대표적인 물리적 방법 및 통계적 방법을 보여주고 있다.

**Table 2-2.** Classification of weather prediction methods

Classification		Methods
Physical methods	NWP (Numerical weather prediction)	GFS MM5 Prediktor HIRLAM
	Time series model	ARMA ARIMA ARX Grey Predictors Linear Predictions Exponential Smoothing
Statistical methods	ANN (Artificial neural network model)	ADALINE Recurrent Multilayer Perceptron Feed-forward

### 2.1.2. 기상수치모델의 개요

풍력 발전량 예측을 위한 기법 중 기상물리모델은 수치 역학을 이용하여 대기에서 일어나는 현상들을 물리적으로 계산하는 방법으로, 기상예측을 위한 기초자료가 필요하다. 기상수치모델은 비선형 복잡계인 대기의 운동을 모수화(parameterization)하여 수많은 방정식으로 이루어져 있는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 날씨를 예측한다. 기상수치모델은 물리법칙을 기본으로 하는 수치방정식을 계산하여 다가오는 기상요소를 예측하며, 대표적인 수치 모델로는 WRF(Weather Research and Forecasting), MM5(Mesoscale Model Version 5), RAMS(Regional Atmospheric Modeling System) 등이 있다.

기상수치모델은 대기의 상태를 계산하는 다양한 물리방정식과 물리과정으로 구성되어 있으며, 다양한 검증 과정을 통해 지역 특성에 가장 적합한 옵션을 선정하는데, 이는 특정 포인트의 기상예측에 있어서 필수적 과정이다. 특히, 우리나라와 같이 전체 면적의 약 70 %가 산으로 분포되고 삼면이 바다로 둘러싸인 환경에서는, 특정 지역의 기상을 예측하는데 많은 어려움이 있다. 또한, 일반적으로 관측지점은 고르게 분포하지 않기 때문에 단순한 통계모델로 기상예측을 수행하는데에는 한계가 많이 따르게 된다. 그러므로 실시간 기상을 예측하기 위해 기상 수치 모델을 기반으로 종관기상의 특성과 지형조건을 적용하는 것이 필요하며, 해당 지역의 예측정확도를 높이기 위해 적합한 수치모델을 선정하고 해당 수치 모델을 최적화시키는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 연구대상 지역의 풍속과 발전량 예측을 위해 WRF 모델과 해양혼합층모델(Ocean Mixed Layer Model, OML)을 접합한 형태의 기상 수치 모델을 제안하였다.

## 2.2. 3차원 기상수치모델 WRF

WRF 모델은 우리나라 기상청의 기존 예보모델인 MM5 모델을 개선한 것으로써, 전 세계적으로 현업 및 날씨예측에 많이 사용되는 모델이다. 이 모델은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 중규모 및 미규모 기상국(MMM, Mesoscale & Microscale Meteorology Division), 미국립해양대기센터(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration), 지구시스템연구소(ESRL, Earth System Research Laboratory), 미공군 기상국(AFWA, Air Force Weather Agency), 미해군연구소(NRL, Naval Research Laboratory), 미연방항공국(FAA, Federal Aviation Administration) 및 다수 대학의 과학자들이 참여하여 공동 개발하였다 [64].

WRF 모델은 완전 압축, 비정수계 모델이고 Arakawa-C 격자체계를 사용하며 플럭스 형태의 진단방식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라량을 보존하는 특징이 있다. WRF 모델은 전처리과정, 자료동화과정, 단방향 또는 양방향 등지화를 포함하는 역학과정, 후처리과정으로 구성되어 있다.

기상예측기술은 일반적으로 6시간 이내의 예측은 과거 실적자료에 근거한 통계적 방법과 물리적 방법을 병행하여 사용하며, 6시간 이후는 물리적 방법을 이용하여 예측한다. 물리적 방법을 통해 다양한 대기 현상과 물리과정들을 물리식으로 표현하고, 예측하고자 하는 기상요소와 관련된 물리식을 계산하여 예측하게 된다. 물리적 방법은 선행시간이 6시간 이상인 예측이 가능하지만 다양한 물리식 계산과정과 기상데이터가 필요하다. Table 2-3에서와 같이, WRF는 다양한 기관 및 대학에서 공동으로 개발하였으며, 전처리과정, 후처리과정, 자료동화 과정 등으로 구성되어 있다. 또한, 수 m에서 수천 km까지의 다양한 해상도를 가지며, 다양한 물리과정과 옵션을 선택하여 사용 가능한 특성이 있다.

Table 2-3. Overview of WRF as numerical meteorological model

Items	Description
Development	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NCAR/MMM</li> <li>• NOAA/ESRL/GSD, NOAA/NCEP/EMC</li> <li>• partnerships at AFWA, NRL, FAA</li> <li>• collaborations with universities and other government agencies</li> </ul>
Major programs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WPS (The WRF Pre-processing system) : include 1) defining simulation domains, 2) interpolating terrestrial data to the simulation domain, 3) degribbing and interpolating meteorological data from another model to this simulation domain</li> <li>• WRF Solver : key component of the modeling system, which is composed of several initialization programs for idealized, and real-data simulations, and the numerical integration program</li> <li>• WPP (WRF Post-processor) and Graphic tools : RIP4(based on NCAR Graphics), NCL(NCAR Graphics Command Language), GrADS, VAPOR(Visualization and Analysis Platform for Ocean, atmosphere and solar Researchers), MET(Model Evaluation Tools)</li> <li>• WRF-DA : ingest observations into the interpolated analyses created by WPS</li> </ul>
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suitable for use in a broad range of applications across scales ranging from meters to thousands of kilometers</li> <li>• Select and apply various schemes and physics options</li> <li>• Improvement of speed by parallel processing of large amounts of data</li> <li>• Designed to be a flexible, state-of-the-art atmospheric simulation system that is portable and efficient on available parallel computing platforms</li> <li>• Improvement of data assimilation system</li> </ul>

### 2.2.1. WRF의 역학적 특성

WRF의 물리식은 미세물리과정(Microphysics scheme), 행성경계층 물리과정(Planetary boundary layer scheme, PBL scheme), 지표면 물리과정(Land surface model scheme, LSM scheme), 대기복사 물리과정(Radiation scheme) 등으로 구성되며, 다양한 카테고리의 물리식 옵션을 사용한다.

#### (1) 미세물리과정

미세물리과정은 중규모 모델링에 적합하고 간단화된 물리식에서부터 구름을 모의하기에 적합한 혼합상 물리식에 이르는 Bulk scheme의 사용이 가능하며, 다음과 같은 세부 옵션을 선택할 수 있다.

: WDM 6-class scheme, WSM 5 scheme, WSM 6 scheme, Kessler scheme, Purdue Lin scheme, Single moment 3-class scheme

#### (2) 행성경계층 물리과정

행성경계층(PBL)은 지면의 영향에 의해 형성되는 대기 난류층으로, 전체적인 대기 구조에서 에디의 확산에 영향을 미친다. 그러므로, PBL Scheme이 활성화되면 가장 적절한 수평적 확산 선택 옵션들은 수평적 수직적 혼합이 독립적으로 이루어진다는 일정한 값들이 있다. PBL Scheme은 잘 혼합된 경계층과 안정층에서 연직 플럭스 profile을 결정하며 대기의 기온과 구름을 포함하는 습윤상태 및 전체 대기 구조에서의 수평적 모멘텀의 경향성을 제공한다. 대부분의 PBL Scheme은 건조혼합상태를 고려하지만, 혼합을 결정하는 연직 안정도에서 포화효과를 포함하기도 한다.

Table 2-4는 행성경계층 물리과정의 여러 옵션으로써, 행성경계층 물리과정이 사용하는 profile과 모델 상층에서 확산을 처리하는 방법을 나타낸다. PBL scheme에 따라서 행성경계층 높이가 결정되므로 대기상태를 보다 정확히 모의하기 위해서는 적절한 PBL scheme의 선택이 중요하다.



Table 2-4. Options of planetary boundary layer

Scheme	PBL Mixing	Entrainment treatment	PBL Top
MYJ scheme (Meller-Yamada-Janjic PBL scheme)	K from prognostic TKE	part of PBL mixing	from TKE
YSU scheme (Yonsei University PBL scheme)	K profile + countergradient term	explicit term	from buoyancy profile
MRF scheme (Medium Range Forecast scheme)	K profile + countergradient term	part of PBL mixing	from critical bulk Ri

### (3) 지표면 물리과정

지표면 물리과정(Land Surface Model, LSM)은 지표면 scheme에서 대기정보와 복사 scheme에서 복사 강제력, 미세물리학과 구름 scheme에서 강수 강제력, 지표면 특성에서 지표면 상태변수를 사용한다. 예를 들면, Noah LSM과 같은 옵션은 다중 토양층에서 열적 플럭스 및 습도 플럭스나 식생, 나무 등 다양하고 정교한 장치를 가지고 있다. 지표면 모델은 다음 옵션의 선택이 가능하다.

: Noah LSM, 5-layer thermal diffusion, Rapid update cycle (RUC) model LSM

### (4) 대기복사 물리과정

복사물리과정은 복사 플럭스로 기인하는 대기 가열과 지표 열수지에 대한 장파복사 및 단파복사에 관한 정보를 제공한다.

장파복사는, 적외선 복사와 대기·지표면으로 방출 및 흡수되는 열적 복사를 포함하며 지표에서 위쪽으로 향하는 장파복사 플럭스는 지표면 방출률에 따른 지표 온도에 의해 결정된다.

단파복사는 태양스펙트럼을 생성하는 가시광선 파장과 대기과 지표면에서 발생하는 흡수, 반사, 산란 과정을 포함한다. 대기에서 복사는 모델에서 생성되는 구름과 수분분포, 탄소와 오존뿐만 아니라 미량의 기체농도에서 반응한다. WRF 모델에서의 복사과정은 1차원적 기둥 scheme이어서, 독립적인 각 기둥은 수평적으로 무한하며 일정한 평면에서의 기둥과 동일시된다. WRF 모델에서 사용되는 복사 Scheme의 옵션은 다음과 같다.

: RRTM Longwave scheme, GFDL Longwave scheme, Dudhia shortwave scheme, Goddard shortwave scheme

### 2.2.2. WRF의 예측 절차

Table 2-5에서는 WRF의 예측 과정을 보여주고 있다. 우선 각종 데이터가 입력된 후 전처리 과정을 통해 예측이 수행되는 해당 영역에 대한 내삽 및 기상장 추출을 수행한다. 전처리 과정에서 생성된 자료는 WRF 모델의 초기자료와 경계조건의 입력자료로 입력되며, 이를 기반으로 예측 수행 및 기상장 자료를 생성한다. WRF 모델에서 생산된 격자별 다양한 예측값 중 목적으로 하는 장소에서의 풍력 발전량 예측을 위한 기상요소를 추출한다. 맨 마지막으로 자료동화를 통해, 현재의 대기상태를 설명하기 위한 유용한 모든 자료를 사용하여 수치모델 초기자료를 생성함으로써, 수치모델의 예측 오차를 최소화한다.

Table 2-5. Prediction process of WRF

Process	Description
Data Input	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Static data to define terrain, land-use, soil state, etc. User can input own static data in same easy-to-write format.</li> <li>• Time-varying meteorological data – from internet (NCEP ftp site, NOAA data portal, etc.</li> </ul>
WPS (WRF Pre-processing system)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Defines simulation domain area</li> <li>• Produces terrain, land-use, soil type etc. on the simulation domain</li> <li>• Interpolate meteorological data to WRF grid horizontally</li> <li>• Real-data preparation for NWP runs</li> <li>• Program for adding more observations to analysis</li> <li>• Define model grid with a chosen map projection and interpolate time-independent fields to the grid</li> <li>• Convert time-dependent grib-formatted met data to simple binary format</li> <li>• Interpolate time-dependent met data to model grid, and combine met data with geogrid data</li> </ul>
WRF Solver	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Initialization programs for real and idealized data</li> <li>• Select physics options at run-time</li> <li>• Numerical integration program</li> <li>• One-way (or two-way) nesting in separate runs</li> <li>• Creates initial and boundary condition files for real-data cases</li> <li>• Does vertical interpolation to model levels (when using WPS)</li> <li>• Performs time integration</li> <li>• Outputs history and restart files</li> </ul>
WPP (WRF Post-processing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processes output from WRF</li> <li>• De-staggers variables</li> <li>• Interpolates to pressure levels and user defined grid</li> <li>• Outputs in standard GRIB format, which can be read by most graphical packages</li> </ul>
WRF-DA (WRF data assimilation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingest observations to improve WRF input analysis</li> <li>• Used in cycling mode for updating WRF initial conditions after WRF run</li> </ul>

## 제3장. 사이트 조건 및 기초 풍력자원평가

### 3.1. 사이트 조건

제주도는 한반도 최남단에 위치(북위  $33^{\circ} 06'$  -  $34^{\circ} 00'$ , 동경  $126^{\circ} 08'$  -  $126^{\circ} 58'$ )하고 있으며, 중앙에 1,950 m 높이의 한라산을 중심으로 동서사면( $3 - 5^{\circ}$ )이 남북사면( $5 - 10^{\circ}$ )보다 완만한 경사를 이루고 있는, 사면이 바다로 둘러싸인 화산섬이다. 총면적은  $1,847 \text{ km}^2$ 이며, 동서방향( $73 \text{ km}$ )이 남북방향( $31 \text{ km}$ )보다 2.4배 더 길다.

제주도 전지역에 걸쳐 풍부한 바람자원을 가지고 있으며, 주풍향은 북서풍이다. Fig. 3-1과 Fig. 3-2는 대규모 해상풍력발전단지 조성 예정인 대정과 김녕 해상에 설치된 해상기상탑의 위치를 보여주고 있다.

#### 3.1.1. 대정해상기상탑

Fig. 3-1은 본 논문에서 사용된 해상데이터 중 대정 해상기상탑의 위치( $33.19 \text{ N}$ ,  $126.28 \text{ E}$ )를 보여주고 있다. 대정해상기상탑은 대정 해안에서  $1.5 \text{ km}$  떨어진 해상에 설치되어 있으며, 자켓(Jacket) 형태의 하부구조물  $12.5 \text{ m}$  위에 8개의 풍속계(Wind anemometer)와 5개의 풍향계(Wind vane) 및 기상 특성을 측정하기 위한 온도계(Thermometer)와 습도계(Hydrometer)가 설치되어 있다. 여기서는 블레이드 높이에 해당하며 가장 높은 위치인 해상기상탑  $94 \text{ m}$  높이에 설치된 Thies first class 풍속계와 풍향계로부터 측정된 데이터가 사용되었다. 풍향풍속계의 자세한 사양과 측정 높이는 Table 3-1과 같다.

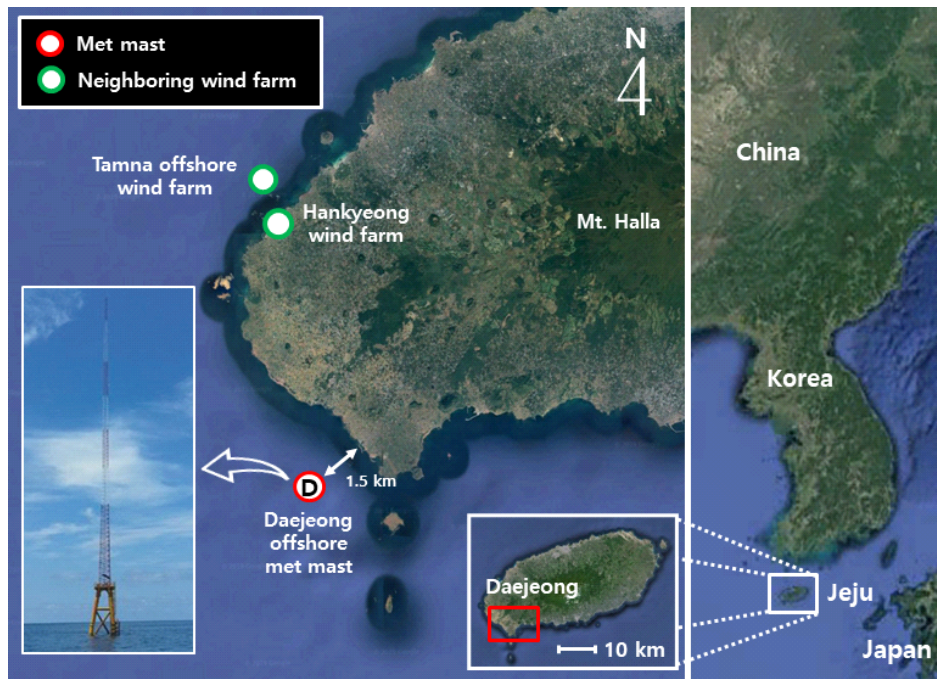


Fig. 3-1. Location of Daejeong offshore met-mast

Table 3-1. Specification of wind sensors and measurement heights at Daejeong offshore met-mast

Items	Wind sensors	
	Anemometer	Wind vane
Model	Thies First class	Thies First class
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 temperature	-50°C – +80°C	-50°C – +80°C
Heights	99 m, 94 m, 88 m, 80 m, 70 m, 60 m, 50 m, 20 m	94 m, 88 m, 80 m, 70 m, 60 m

대정해상기상탑에서 실측된 1년 기간(1 Aug 2015 - 31 Jul 2016) 데이터와 2가지 모델로부터의 예측데이터가 사용되었다. 사용된 데이터는 허브 높이인 94 m에서의 풍향·풍속 데이터로써, 예측데이터를 측정데이터와 비교함으로써 두 모델간의 정확도를 검증하고자 하였다. 데이터 회수율은 실측데이터는 100 %인 반면, 모델데이터는 두 모델 모두 76.8 %의 회수율을 나타냈다. 지역모델인 WRF 구동을 위한 초기입력 데이터로써 전구모델인 GFS 모델데이터가 필요한데, 어떤 이유로 GFS 데이터의 누락이 발생한 것이 그 원인이다. 한편, 모델 수행에 있어서 자료동화 과정은 고려하지 않으므로, 누락된 모델데이터가 분석결과에 영향을 미치지 않는다. 연구수행을 위해 사용된 데이터의 종류 및 기간, 사용된 실측데이터와 모델데이터의 수는 Table 3-2와 같다.

**Table 3-2.** Site and measurement conditions at Daejeong offshore met-mast

Items	Description	Remark
Used data for analysis	wind speed	Anemometer : 94m
	wind direction	Wind vane : 94m
Averaging time	10 minutes	
measurement period	1 Aug 2015 - 31 Jul 2016	366 days (8,784 hours)
Number of data points (observation)	8,784 / 8,784	Data recovery rate : 100%
Number of data points (modeling)	12,624 / 17,568	Data recovery rate : 76.8%

### 3.1.2. 김녕해상기상탑

Fig. 3-2는 본 논문에서 사용된 해상데이터 중 김녕 해상기상탑의 위치(33.34 N, 126.47 E)를 보여주고 있다. 김녕해상기상탑은 김녕 해안에서 2.7 km 떨어진 해상에 설치되어 있으며, 자켓(Jacket) 형태의 하부구조물 12.0 m 위에 6개의 풍속계(Wind anemometer)와 3개의 풍향계(Wind vane) 및 온도계(Thermometer), 습도계(Hydrometer)가 설치되어 있다. 여기서는 해상기상탑 최고 높이인 68 m 높이에 설치된 Thies P610H 풍속계와 NRG 200P 풍향계로부터 측정된 데이터가 사용되었다. 풍향풍속계의 자세한 사양과 높이는 Table 3-3과 같다.

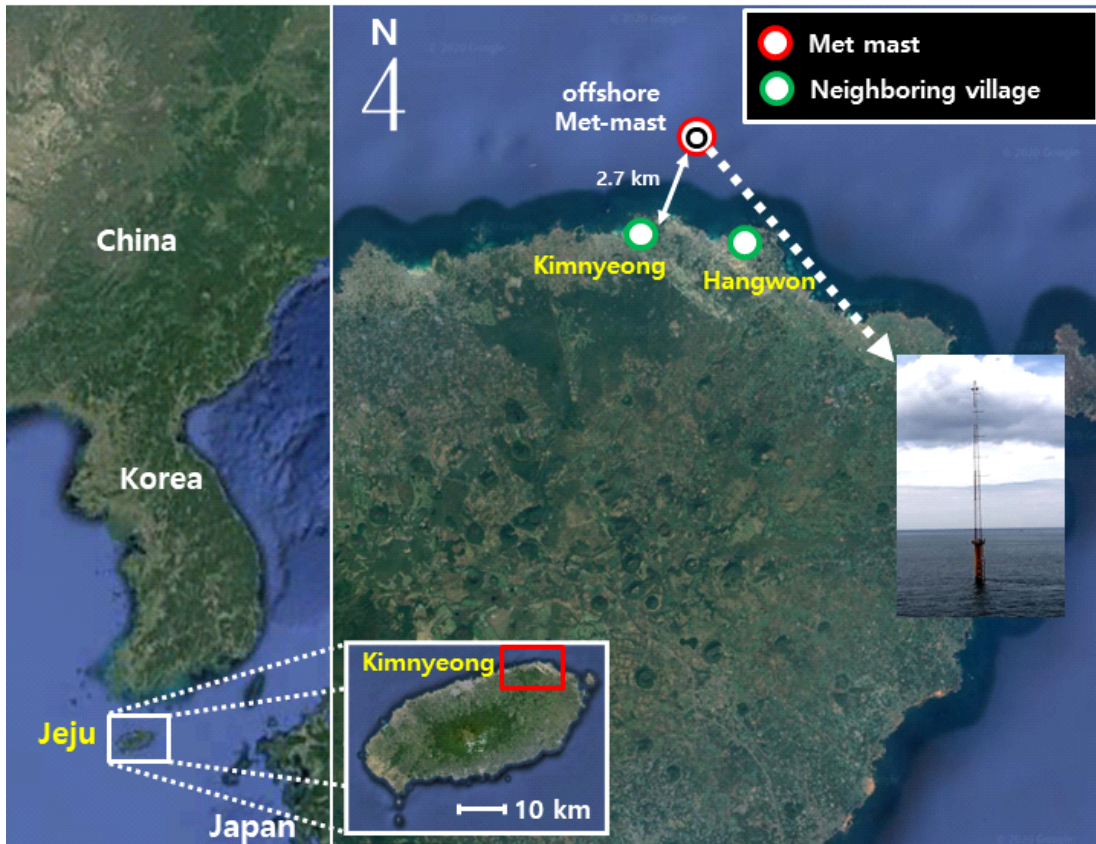


Fig. 3-2. Location of Kimnyeong offshore met-mast

**Table 3-3.** Specification of wind sensors of the met-mast at Kimnyeong offshore met-mast

Items	Wind sensors	
	Anemometer	Wind vane
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 temperature	-50°C - +80°C	-50°C - +80°C
Heights	70 m, 68 m, 58 m, 48 m, 38 m, 28 m	68 m, 58 m, 48 m

본 논문에서는 1년 기간(1 Dec 2012 - 30 Nov 2013) 동안의 김녕해상기상탑의 측정데이터와 2가지 모델로부터의 예측데이터가 사용되었다. 사용된 데이터는 68 m에서의 풍향·풍속 데이터로써, 예측데이터를 측정데이터와 비교함으로써 두 모델 간의 정확도를 검증하였다. 데이터 회수율은 실측데이터 및 모델데이터 모두 100 %의 회수율을 나타냈다. 연구수행을 위해 사용된 데이터의 종류 및 기간, 사용된 실측데이터와 모델데이터의 수는 Table 3-4와 같다.

**Table 3-4.** Site and measurement conditions at Kimnyeong offshore met-mast

Items	Description	Remark
Used data for analysis	wind speed	Anemometer : 68 m
	wind direction	Wind vane : 68 m
Averaging time	10 minutes	
measurement period	1 Dec 2012 - 31 Nov 2013	365 days (8,760 hours)
Number of data points (observation)	8,760 / 8,760	Data recovery rate : 100 %
Number of data points (modeling)	17,520 / 17,520	Data recovery rate : 100 %



### 3.2. 기초 풍력자원평가

대정 해상기상탑 및 김녕 해상기상탑에서의 실측값을 기준으로 수치모델의 성능평가 이전에, 잠재적 풍력에너지 및 평균풍속을 계산하기 위한 기초풍력자원평가를 수행하였다. 기초 풍력자원 평가요소로써, 와이블분포, 고도별 풍속분포, 바람빈도 및 에너지밀도를 대상으로 하였다.

#### 3.2.1. 대정해상기상탑 기초 풍력자원평가

와이블 파라미터를 구하기 위하여 최우도법(Maximum Likelihood Method, MLM)을 사용하였으며, 풍속계와 풍향계가 동일 높이에 설치되어 있는 3개 높이 각각에서의 와이블 분포 파라미터는 Fig. 3-3에 나타내었다. 척도계수  $c$ 는 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 7.60 m/s, 7.42 m/s, 7.34 m/s를 나타냈으며, 형상계수  $k$ 는 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 1.72, 1.72, 1.74로 거의 유사한 값을 보이고 있다.

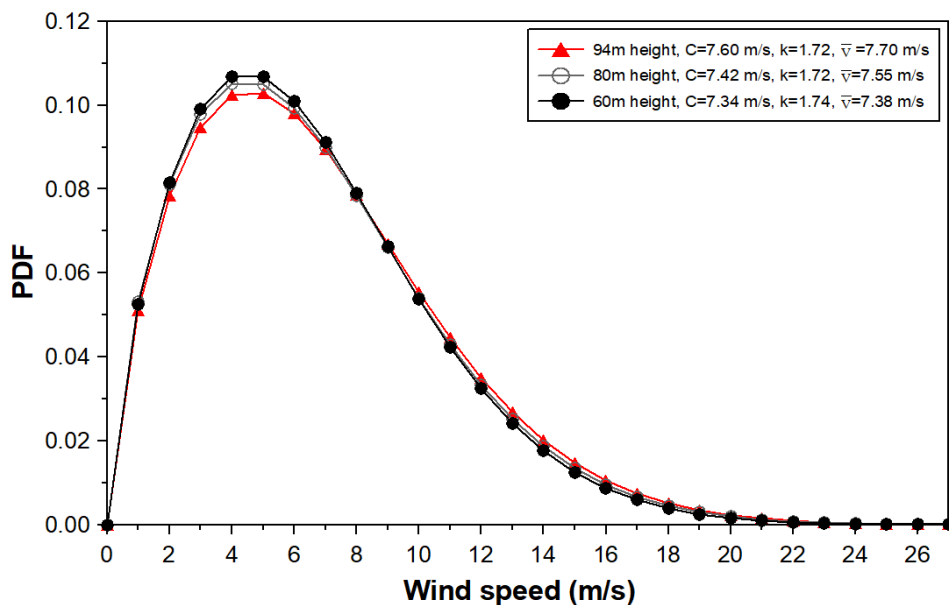


Fig. 3-3. Weibull distribution at Daejeong offshore met-mast

Fig. 3-4와 같이 대정지역에서의 연중 평균풍속은 위 3개의 높이와 20 m 높이를 추가하여 4개의 높이에서 고려하였다. 94 m, 80 m, 60 m, 20 m 높이 각각에서 7.70 m/s, 7.55 m/s, 7.38 m/s, 6.88 m/s이며, 높은 고도일수록 고풍속의 바람이 우세함을 확인할 수 있다. 월별 풍속의 변화 경향은 매우 유사한 패턴을 보였으며, 모든 높이에서 8월에 풍속이 가장 낮고 2월에 풍속이 가장 높았다. 이는 한반도의 전형적인 기후 특성인, 겨울철 찬 대륙성 고기압의 영향인 것으로 분석된다.

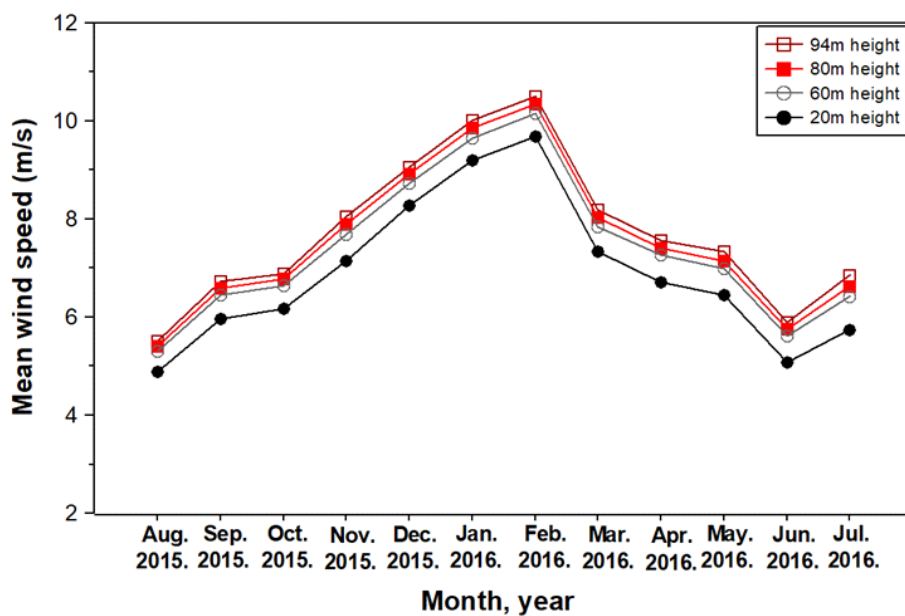


Fig. 3-4. Monthly wind speed variation at 94 m, 80 m, 60 m and 20 m heights at Daejeong offshore met-mast

Fig. 3-5는 일중 시계열에 따른 평균풍속의 변화를 나타낸다. 하루 중 최대풍속은 모든 높이에서 14 - 16시 사이에 나타났으며, 하루 중 최저풍속은 모든 높이에서 07 - 09시 사이에 나타났다. 주간에는 일사로 인한 해수면온도의 변화와 더불어 대기의 혼합으로 인해 바람이 강하지만, 야간에는 상대적으로 안정적인 대기 상태를 유지하므로 바람이 약한 것으로 분석된다.

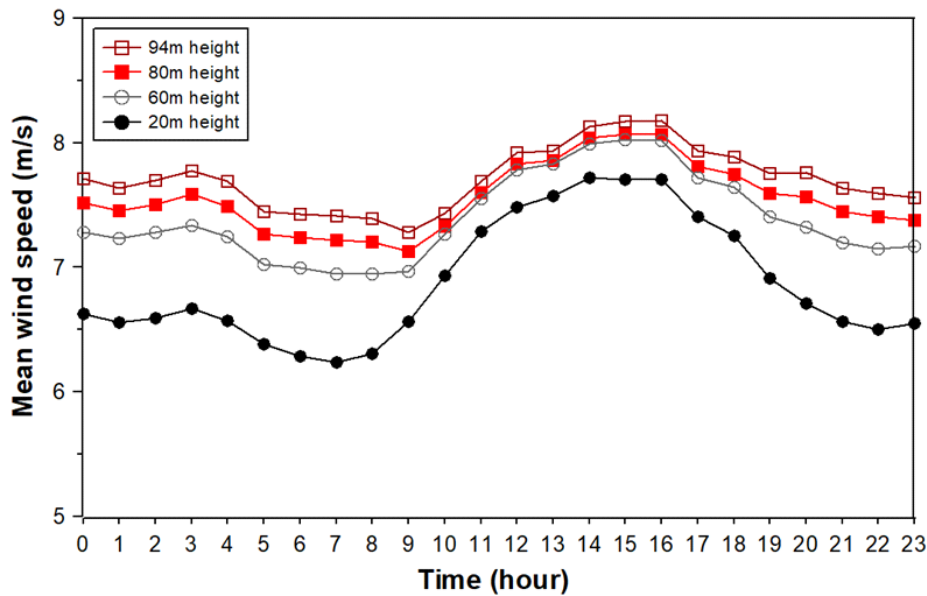


Fig. 3-5. Diurnal wind speed variation at 94 m, 80 m, 60 m and 20 m heights at Daejeong offshore met-mast

Fig. 3-6은 바람빈도(wind frequency)에 따른 바람장미를 16방위로 분석하여 나타낸 결과다. 3개 높이 모두에서 주 풍향은 북서풍계열이 우위를 갖는다. 서북서풍으로부터 북북서풍까지의 북서풍 계열 바람빈도는 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 40.1 %, 42.4 %, 38.2 %로써, 전체 바람 중 절반 가까이 차지한다. 북서풍 계열의 바람을 제외하고는 남풍계열(SSE, S, SSW)과 동풍계열의 바람(ENE, E, ESE)이 비교적 의미 있는 비중을 차지한다. 남풍계열의 바람은 94 m, 80 m, 60 m 높이에서 각각 17.1 %, 16.9 %, 15.8 %를 차지하고 있으며, 동풍계열의 바람은 94 m, 80 m, 60 m 높이에서 각각 15.8 %, 16.8 %, 17.1 %의 빈도를 보이고 있다. 해양성 열대기단인 북태평양고기압의 영향을 지배적으로 받는 계절풍의 영향으로 여름철에 남풍계열의 빈도가 비교적 높은 것으로 보인다. 한편, 늦봄부터 초여름 사이 제주도 남쪽을 주기적으로 지나가는 저기압으로 인한 영향 및 봄·가을 기간에 제주도를 중심으로 동쪽에는 고기압, 서쪽에는 저기압이 위치하는 기압패턴이 자주 발생함에 따라 동풍의 바람빈도가 높은 것으로도 해석된다. 한편, 북동풍 계열의 바람(NNE, NE, ENE)은 매우 빈도가 낮은 경향을 보이고 있는데, 94 m, 80 m, 60 m 높이에서 각각 3.0 %, 2.4 %, 2.0 %이다.

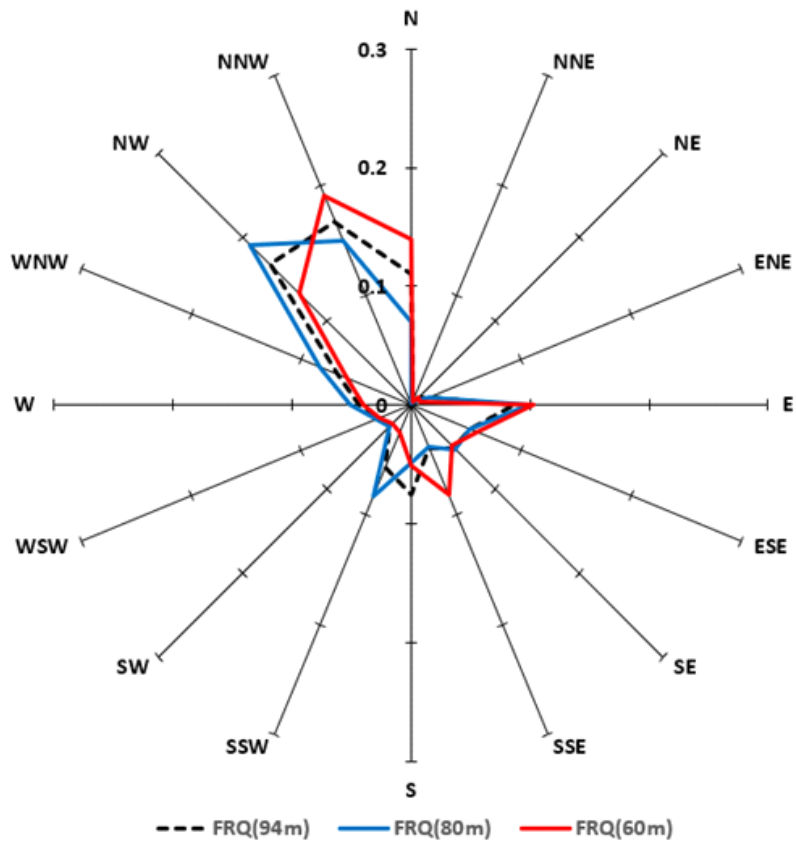


Fig. 3-6. Wind rose at 94 m, 80 m and 60 m height heights at Daejeong offshore met-mast

Fig 3-7은 에너지밀도를 보여준다. Table 3-5는 유의미한 풍향별로 바람빈도와 에너지밀도를 보여주고 있다. 겨울철 지배적인 북서풍 계열 바람은 빈도도 높지만 풍속도 강한 편이어서 북서풍계열의 에너지밀도는 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 54.3 %, 54.7 %, 52.0 %로써, 전체 에너지밀도 중 절반 이상을 차지할 뿐 아니라 바람빈도에 비해서도 10 % 이상의 밀도를 차지한다. 여름철 지배적인 남풍계열의 바람도 비교적 의미 있는 밀도를 보이고 있는데, 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 14.4 %, 13.8 %, 12.8 %로써, 바람빈도와 비슷하다. 동풍 계열의 바람 역시 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 16.1 %, 16.4 %, 19.6 %로써, 바람빈도와 비슷하게 나타나고 있다. 한편, 북동풍에 대해서는 94 m, 80 m, 60 m 높이 각각에서 1.8 %, 1.4 %, 0.4 %로써, 풍향의 빈도보다 더 낮은 에너지밀도를 보이고 있다.

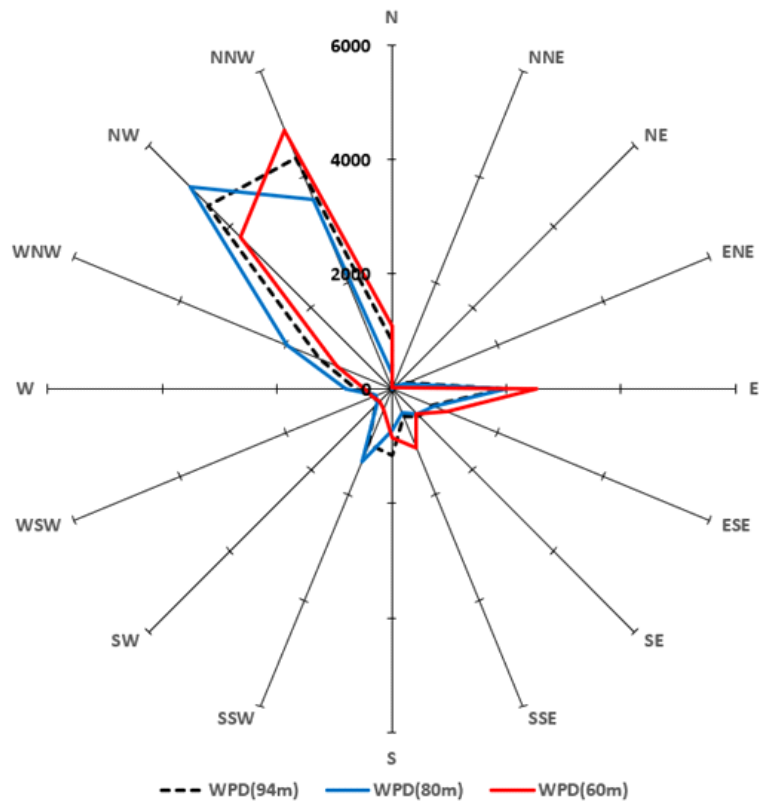


Fig. 3-7. Energy rose at 94 m, 80 m and 60 m heights at Daejeong offshore met-mast

Table 3-5. Frequencies of wind direction and wind power density for significant wind directions at Daejeong offshore met-mast

Wind direction	Wind frequency [%]			Power production density [%]		
	94m	80m	60m	94m	80m	60m
NW-ly	40.1	42.4	38.2	54.3	54.7	52.0
E-ly	15.8	16.8	17.1	16.1	16.4	19.6
S-ly	17.1	16.9	15.8	14.4	13.8	12.8
NE-ly	2.9	2.4	2.0	1.8	1.4	0.4

### 3.2.2. 김녕해상기상탑 기초 풍력자원평가

김녕 해상 역시 와이블 파라미터를 구하기 위하여 최우도법을 사용하였으며, 풍속계와 풍향계가 동일한 높이에 설치되어 있는 3개 높이 각각에서의 와이블 분포 파라미터를 Fig. 3-8에 나타내었다. 척도계수  $c$ 는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 8.37 m/s, 8.31 m/s, 8.19 m/s를 나타냈으며, 형상계수  $k$ 는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 1.62, 1.62, 1.60으로 거의 유사한 값을 보이고 있다.

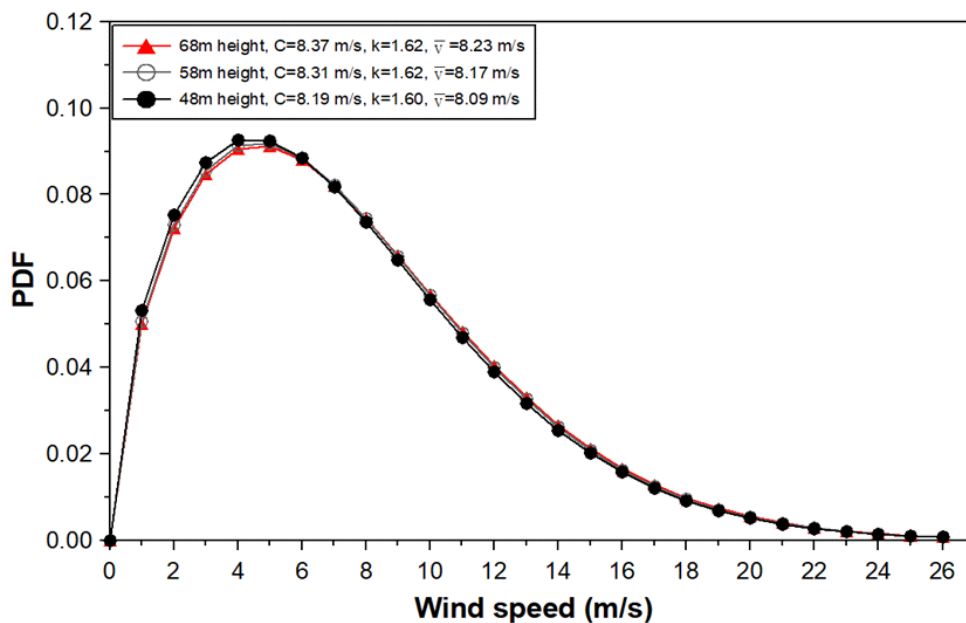


Fig. 3-8. Weibull distribution at Kimnyeong offshore met-mast

김녕지역에서의 연중 평균풍속은 위 3개의 높이와 38 m 높이를 추가하여 4개의 높이에서 고려하였다. 68 m, 58 m, 48 m, 38 m 높이 각각에서 8.23 m/s, 8.17 m/s, 8.09 m/s, 8.04 m/s이며, 높은 고도일수록 고풍속의 바람이 우세함은 대정 해상에서와 동일하다. 월별 풍속의 변화 경향은 매우 유사한 패턴을 보였으며, 모든 높이에서 8월에 풍속이 가장 낮고 12월에 풍속이 가장 높았다 (Fig 3-9). 대정 해상에서와 같이 겨울철 찬 대륙성 고기압의 영향을 받는 한반도의 전형적인 기후 특성이 반영된 것으로 분석된다.

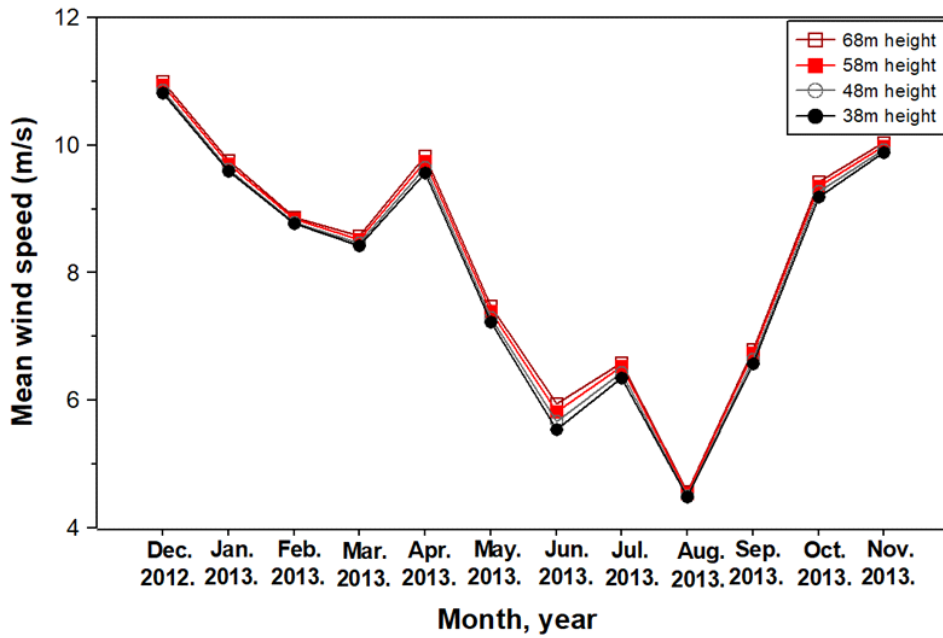


Fig. 3-9. Monthly wind speed variation at 68 m, 58 m, 48 m and 38 m heights at Kimnyeong offshore met-mast

Fig. 3-10은 시간에 따른 평균풍속의 변화를 나타낸다. 하루 중 최대풍속은 모든 높이에서 16시에 나타났으며, 일중 최저풍속은 모든 높이에서 자정에 나타났다. 주간에는 일사로 인한 해수면온도의 변화와 더불어 대기의 혼합으로 인해 바람이 강하지만, 야간에는 상대적으로 안정적인 대기상태를 유지하므로 바람이 약한 것으로 분석된다.

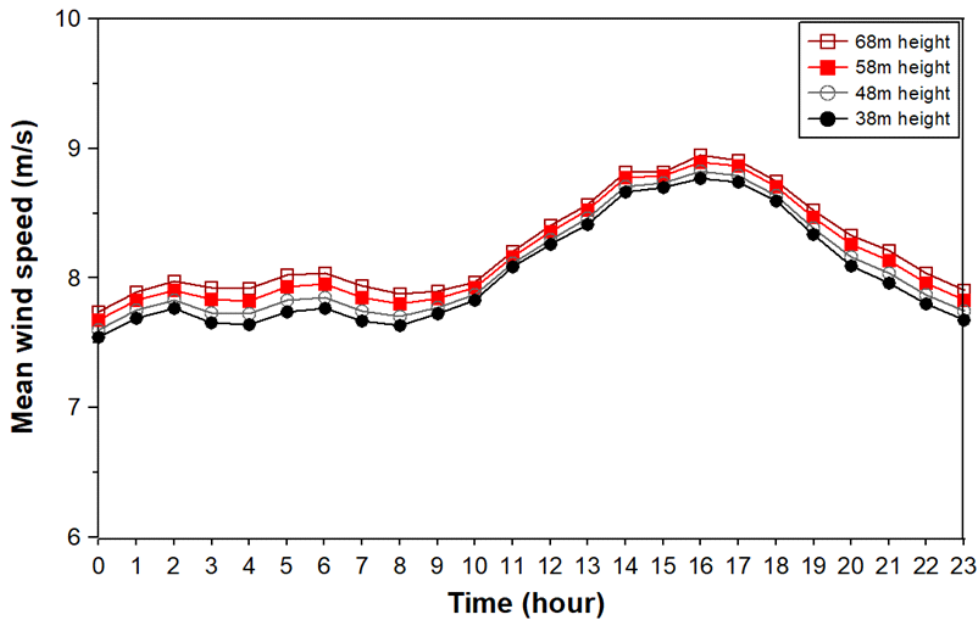


Fig. 3-10. Diurnal wind speed variation at 68 m, 58 m, 48 m and 38 m heights at Kimnyeong offshore met-mast

Fig. 3-11은 바람빈도(wind frequency)에 따른 바람장미를 16방위로 분석하여 나타낸 결과다. 대정에서와 마찬가지로, 3개 높이 모두에서 주 풍향은 북서풍 계열의 바람(NNW, NW, WNW)이 우위를 갖고 있으며, 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 40.9 %, 41.9 %, 40.6 % 등 절반 가까이 차지하고 있다. 북동풍 계열의 바람(NNE, NE, ENE)의 빈도는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 13.9 %, 19.4 %, 19.3 %를 차지하여, 68 m 높이에서는 상대적으로 빈도가 약하다. 북서풍 계열의 바람을 제외하고는 남풍계열과 동풍계열의 바람이 비교적 의미 있는 비중을 차지한다. 남풍계열의 바람(SSW, S, SSE)은 68 m, 58 m, 48 m 높이에서 각각 13.0 %, 13.3 %, 13.6 %를 차지하고 있으며, 동풍계열(ENE, E, ESE)의 바람은 68 m, 58 m, 48 m 높이에서 각각 20.7 %, 15.0 %, 17.8 %의 빈도를 보이고 있다. 대정에 비해 북동풍계열의 바람빈도는 높은 편이며, 남풍계열과 동풍계열의 바람빈도는 낮은 편이다. 주풍향인 북서풍계열의 바람은 대정해상과 비슷하다. 한편, 남서풍계열의 바람(SSW, SW, WSW)의 빈도는 매우 낮게 나타나고 있는데, 68 m, 58 m, 48 m 높이에서 각각 2.6 %, 17.9 %, 14.0 %이다.



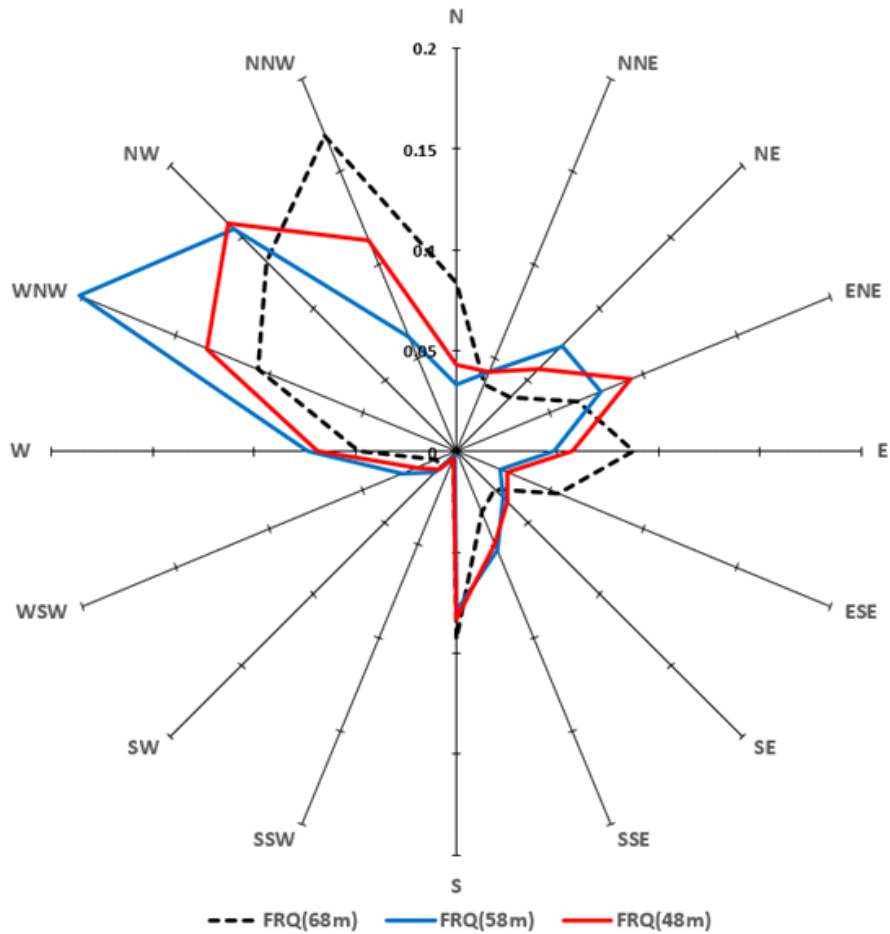


Fig. 3-11. Wind rose at 68m, 58m and 48m heights at Kimnyeong offshore met-mast

Fig. 3-12는 에너지밀도를 16방위로 분석하여 나타낸 것으로써, 그 결과는 바람빈도와 매우 밀접하다. Table 3-6은 유의미한 풍향별로 바람빈도와 에너지밀도를 보여 주과 있다. 대정과 마찬가지로 겨울철 지배적인 북서풍 계열 바람(WNW, NW, NNW)의 에너지밀도는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 54.4 %, 54.8 %, 55.7 %를 차지함에 따라, 풍향의 빈도에 비해 에너지밀도가 탁월하게 높다. 모든 높이에서 에너지밀도가 풍속의 빈도보다 13 - 15 %씩 높은 이유는, 정격풍속 이상의 바람분포가 비교적 꾸준하게 이어지는 것이 이유인 것으로 분석된다. 바람장미에서 비교적 의미 있는 남풍 계열의 에너지밀도는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 9.7 %, 9.5 %, 9.7 %로써 10 %에 가까운 밀도를 보였다. 동풍 계열(ENE, E, ESE)의 바람에

대비되는 에너지밀도는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 19.5 %, 11.4 %, 15.4 %를 차지하고 있어, 바람빈도와 유사하다. 북동풍 계열(NNE, NE, ENE)의 바람에 대비되는 에너지밀도는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 10.2 %, 17.3 %, 16.9 %를 차지하고 있다. 주 풍향인 북서계열의 경우 바람빈도에 비해 더 높은 에너지밀도를 나타내고 있는 반면, 그 외의 풍계에 대해서는 비슷하거나 풍향의 빈도보다 조금 낮은 에너지밀도를 보이는 특징을 가진다. 한편, 남서풍 계열(SSW, SW, WSW)의 바람에 대비되는 에너지밀도는 68 m, 58 m, 48 m 높이 각각에서 1.6 %, 3.0 %, 1.6 %의 매우 낮은 밀도를 보이고 있다.

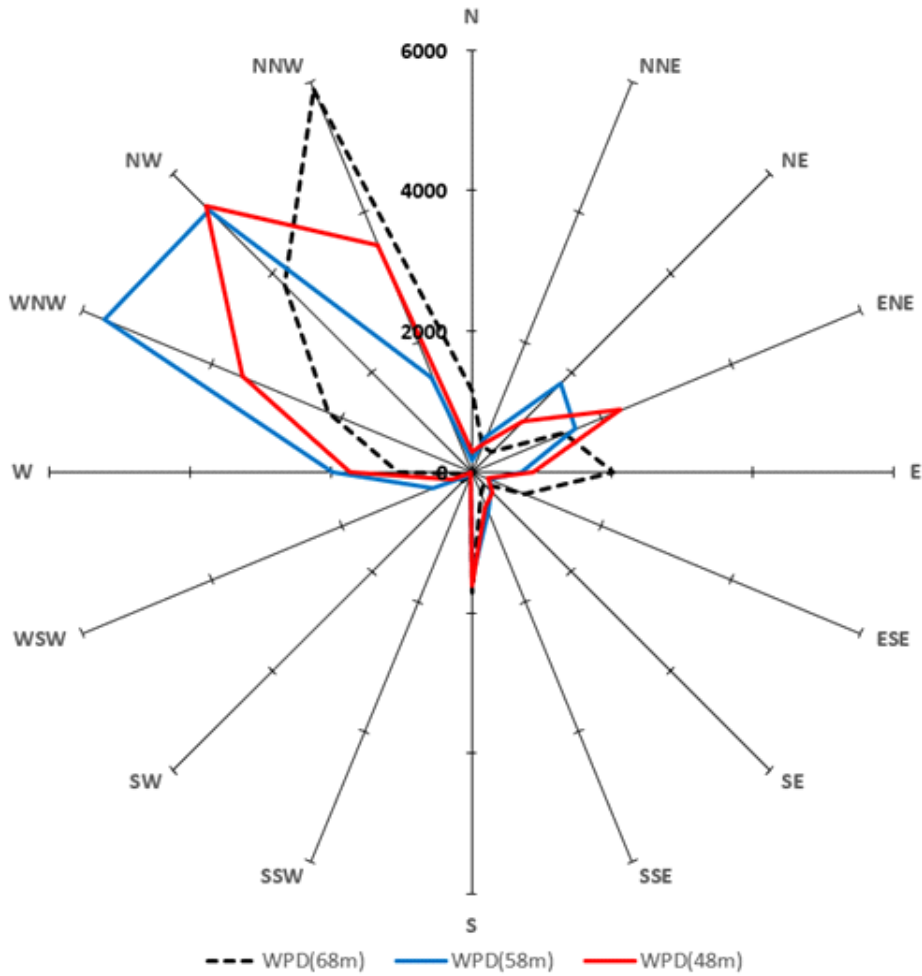


Fig. 3-12. Energy rose at 68 m, 58 m and 48 m heights at Kimnyeong offshore met-mast

**Table 3-6.** Frequencies of wind direction and wind power density for significant wind directions at Kimnyeong offshore met-mast

Wind direction	Wind frequency [%]			Power production density [%]		
	68m	58m	48m	68m	58m	48m
NW-ly	40.9	41.9	40.6	54.4	54.8	55.7
E-ly	20.7	15.0	17.8	19.5	11.4	15.4
S-ly	13.0	13.3	13.6	9.7	9.5	9.7
NE-ly	13.9	19.4	19.3	10.2	17.3	16.9
SW-ly	2.6	17.9	14.0	1.6	3.0	1.6

## 제4장. 연구결과

### 4.1. 풍력 및 발전량 예측 프로세스 설계

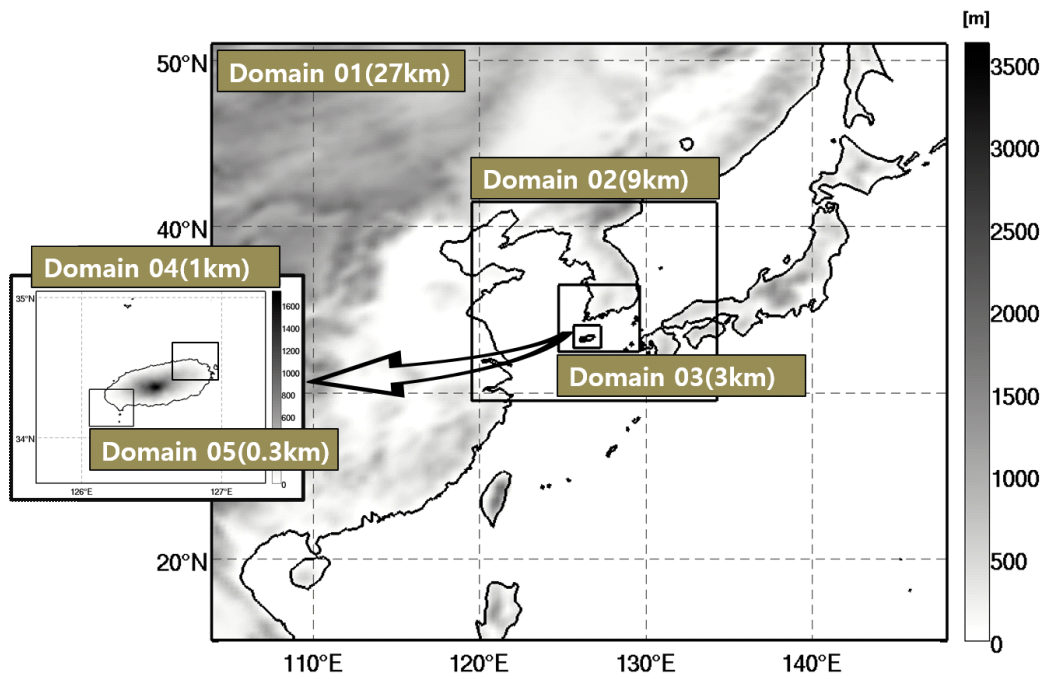
#### 4.1.1. 물리과정 최적화를 통한 국지 바람 예측기법 개발

본 논문에서 사용된 대기모델은 National Center for Atmospheric Research(NCAR)에서 개발된 중규모 모델인 WRF ver. 3.9.1.1로써, 연구 및 운영 응용을 위해 설계된 수치 기상예측 및 대기 시뮬레이션 시스템이다 [37].

Fig 4-1은 수치해석 영역을 보여준다. 제주도 남서쪽 해안 및 북동쪽 해안을 중심으로 공간 해상도 5개 도메인으로 구성하였다. 각 영역의 수평격자는  $151 \times 151$ (domain 01 - domain 04),  $88 \times 88$ (domain 05)로 구성하였으며, 격자 간격은 각각 27, 9, 3, 1, 0.3 km의 양방향 등지격자로 구성하였다. domain 01로부터 얻어진 결과는 2-way nesting 기법을 이용하여 단계별로 작은 영역(domain 02 - domain 05)의 예보를 생산할 수 있다. 5개 도메인 모두 48시간으로 예측시간을 설정하였다.

Table 4-1. Domains of WRF

Domains	Grid size	Grid No.		Domain size
		X	Y	
Domain 1	27 km	151	151	3,066 km × 4,004 km
Domain 2	9 km	151	151	1,235 km × 1,334 km
Domain 3	3 km	151	151	442 km × 451 km
Domain 4	1 km	151	151	152 km × 152 km
Domain 5	0.3 km	88	88	29 km × 29 km



**Fig. 4-1.** Configuration of the two way nested domains of the WRF model. Sizes of the domains are 27 km(domain 01), 9 km(domain 02), 3 km(domain 03), 1 km(domain 04) and 0.3 km(domain 05). Colors represent topography

### (1) 물리옵션 선정

Table 4-2는 WRF 모델에서 구성된 물리식(Physics scheme) 옵션을 보여주고 있다. WRF의 물리식은 미세물리식(Microphysics scheme), 행성경계층(planetary boundary layer: PBL), 지표면 모델(land surface model), 단파복사(Short wave radiation scheme), 장파복사(Long wave radiation scheme) 등이 있으며 다양한 물리식 옵션을 사용한다. 각 물리식들은 여러 가지 옵션들을 포함하고 있으며, 그 중 적절한 옵션을 선택하는 과정을 거쳤다.

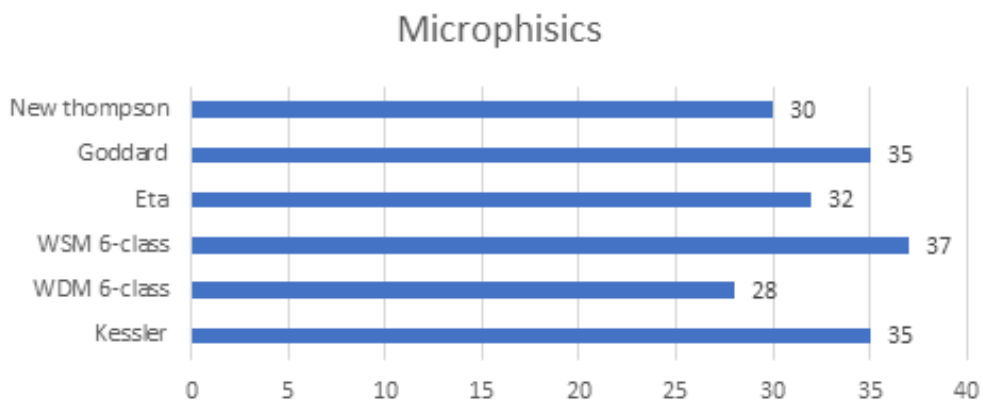
**Table 4-2.** List of physical options applied to WRF model

Classification	Physical options
Microphysics	Kessler scheme WRF Double Moment 6-class scheme WRF Single Moment 6-class scheme Eta microphysics Goddard scheme New Thompson et al. scheme
Planetary boundary layer	Meller-Yamada-Janjic scheme Yonse University scheme MRF scheme
Surface layer	Monin-Obulkhov-Janjic scheme Eta similarity MM5 similarity
Land surface	Noah-MP land-surface model 5-layer thermal diffusion RUC land surface model
Longwave radiation	RRTM scheme CAM scheme GFDL scheme
Shortwave radiation	Dudhia scheme GFDL scheme CAM scheme Goddard scheme

본 논문에서는 지속적인 데이터 확보가 가능한 기간을 각 계절별로 1개월씩 선정하여 기상물리모델의 다양한 물리 옵션을 적용한 후 실측값과 가장 유사한 결과를 보이는 물리옵션을 선정하였다. 해당 지점의 WRF 모델로부터의 풍속 예측값을 실측값과 비교하여, 각 옵션별 오차율을 산정, 물리과정별로 오차가 가장 작은 옵션을 최적화된 물리옵션으로 선정하였다. 선정 기간 및 사용데이터는 Table 4-3과 같다. 각 기상물리모델의 옵션 선정을 위한 결과는 Fig. 4-2부터 Fig. 4-7과 같다.

**Table 4-3.** Test period for physical model optimization

Division	site	Daejeong	Kimnyeong
	Spring	March, 2016	March, 2013
Summer	August, 2015	July, 2013	
Autumn	November, 2015	November, 2013	
Winter	February, 2016	February, 2013	



**Fig 4-2.** Error rate in physical option for microphysics

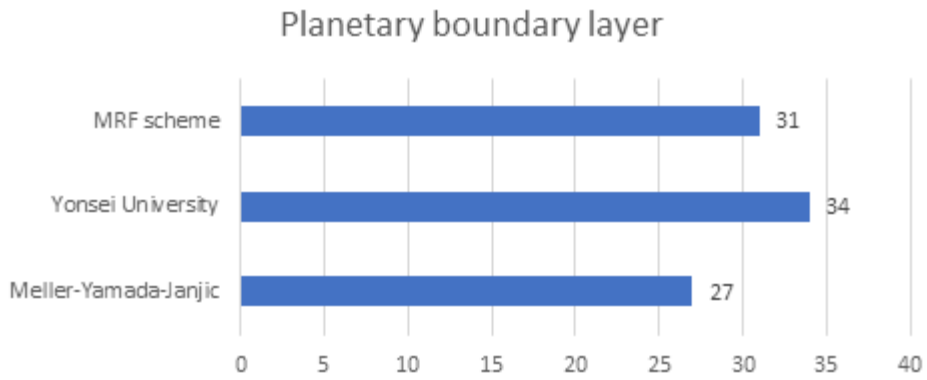


Fig 4-3. Error rate in physical option for Planetary boundary layer

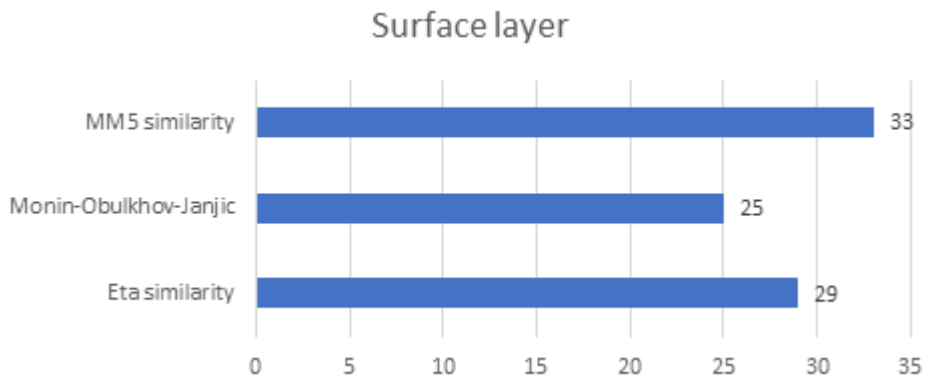


Fig 4-4. Error rate in physical option for Surface layer

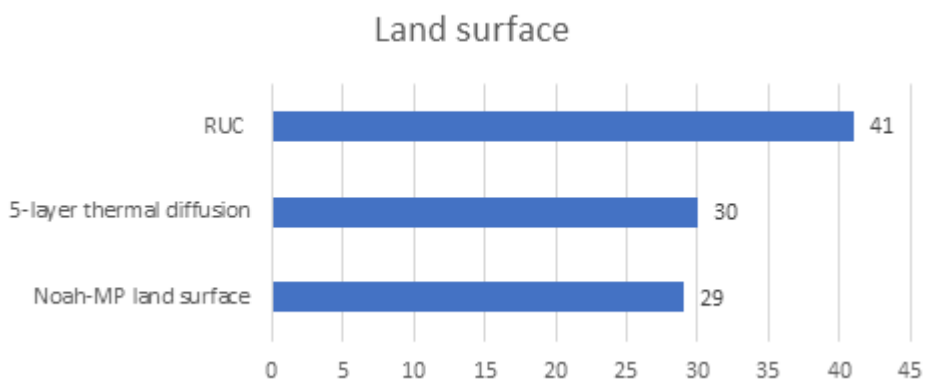


Fig 4-5. Error rate in physical option for Land surface



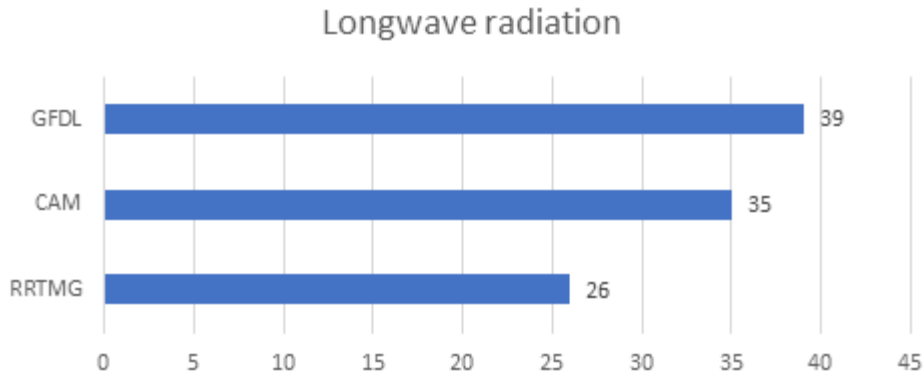


Fig 4-6. Error rate in physical option for Longwave radiation

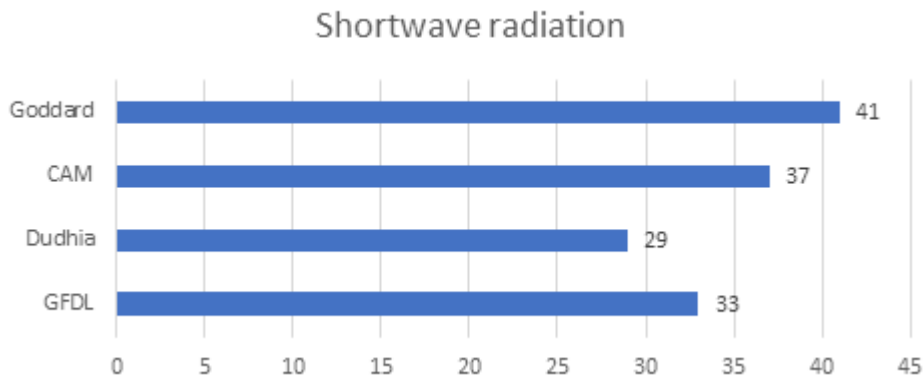


Fig 4-7. Error rate in physical option for Shortwave radiation

Table 4-4는 위의 과정을 통하여 선정된 물리옵션들이다. 미세물리모델 (Microphysics scheme)은 WDM 6-class scheme [65]을 선택하였으며, 행성경계층 모델(Planetary boundary layer scheme)은 Meller-Yamada Janjic scheme(MYJ) [66]을 사용하였다. 한편, 지표면모델(Surface layer scheme)은 Monin-Obukhov scheme [67]을 사용하였으며, 지면모델(Land surface)은 Noah-MP land-surface model [68]을 사용하였다. 장파 복사 및 단파복사는 RRTMG 모수화방법 [69]과 Dudhia scheme [70]을 각각 선정하여 사용하였다.

Table 4-4. Physical options selected

Classification	Physical option
Microphysics	WDM 6-class scheme
Planetary boundary layer	Meller-Yamada-Janjic scheme
Surface layer	Monin-Obulkhov(Janjic) scheme
Land surface	Noah-MP land-surface model
Longwave radiation	RRTMG scheme
Shortwave radiation	Dudhia scheme

(2) 공간격자 및 연직격자

WRF 모델의 공간 격자는 Fig. 4-8의 수평 및 연직 격자 체계를 사용하고 있으며, 각 격자의 중앙은 기압, 기온, 습도 등과 같은 보존 속성의 변수들을 배치하고, 격자의 좌·우는 동서 방향의 풍속, 상·하는 남북 방향의 풍속으로 구성되어 있다. 연직 격자 체계는 지형을 따르는 정수압(hydrostatic-pressure) 연직 좌표계를 사용한다. 수평격자는 (i, j)로, 연직격자는 (i, k)로 표기되며 변수의 위치는  $(x, y, \eta) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta \eta)$ 로 지정되고, 이는 질량 포인트의 위치와 같게 배치된다. 연직격자의 길이인  $\Delta \eta$ 는 상수값으로 정해져 있지 않으며 사용자가 지표면에서 모델 상층부 사이의 값으로 지정해야 한다.

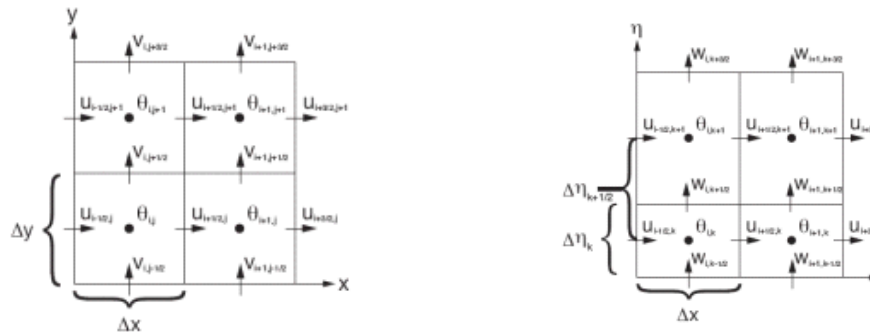


Fig. 4-8. (a) Horizontal grid and (b) vertical grid of WRF system

본 논문에서 사용한 WRF 방정식은 지형을 따르는 정역학-기압 연직 좌표식을 기반으로 하며, 아래 식(4-1)에 의해 정의된다.

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu}, \mu = p_{hs} - p_{ht} \quad \text{-----(4-1)}$$

Fig. 4-9와 같이, 위 식에서의  $\eta$ 는 하층의 1부터 상층의 0까지 30개의 층으로 나타내며,  $p_h$ 는 압력의 정수성분을 나타낸다.  $p_{hs}$ 와  $p_{ht}$ 는 각각 하층 경계와 상층 경계의 기압을 의미하며, 여기서  $p_{ht}$ 는 일정하게 50 hPa로 설정하였다.

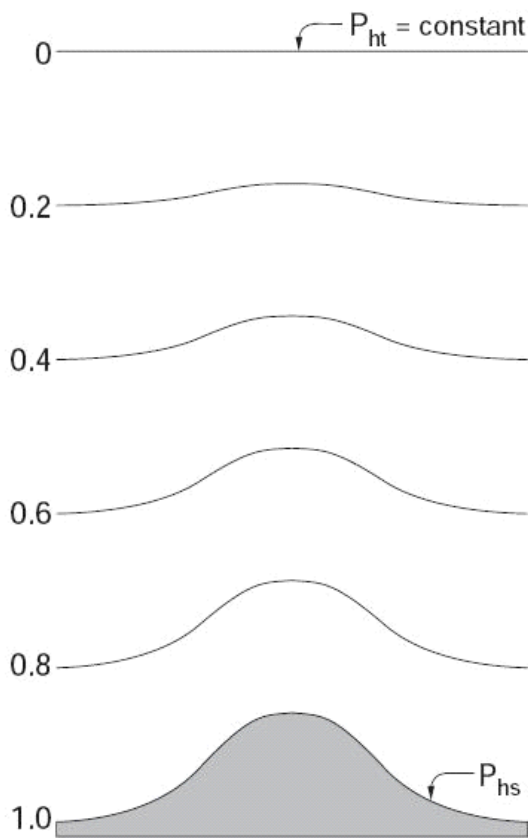


Fig. 4-9. Vertical  $\eta$  coordinate used in WRF model. Black lines between 0.0 and 1.0 represent  $\eta$  values

### (3) 경계조건 및 등지격자

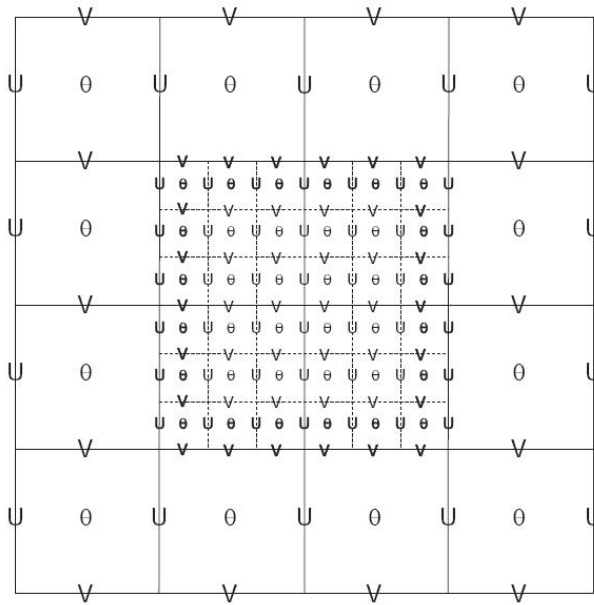
WRF에서는 이상적인 흐름에 적합한 몇가지 경계조건과 실제 데이터 모의에 적합한 경계조건을 사용한다. 이런 선택은 사용자 지정파일(namelist file)에서 사용자가 선택 가능하다. 모델링의 성긴격자(부모격자)는 단일 도메인에 대한 경계조건을 설정하는데 유효하다. 실제 데이터는 외부경계조건으로 주어지는 전통적인 시간에 의존하는 경계조건방식 대신 주기적이고 대칭적인 결합을 사용하거나 측면경계조건을 사용한다.

지역규모 수치예보 모델은 특정 지역에서 일어나는 기상현상을 예측한다. 일반적으로 전지구모형의 수평해상도는 대략 100 km 수준이므로 중규모 이하의 운동까지 표현할 수 없다. 지역규모 수치예보 모델은 제한된 지역에 고해상도의 수평 분해능을 요구할 때 사용되며, 경우에 따라서는 지역규모 수치예보 모델 내에 등지 격자를 취함으로써 더욱 협소한 지역에 대해 더욱 정교한 결과를 구할 수 있다. 지역규모 수치예보 모델은 시간 적분을 위해 전지구모델과 달리 모의영역(Domain)의 측면 경계조건이 필요하다.

지역규모 수치예보 모델에서 하층 경계조건만이 지표-대기 상호작용을 통해 계산되는 물리적 경계조건이고 나머지 측면과 상층 경계조건은 임의적으로 결정된다. 편미분 방정식의 수치 적분에서 적절한 초기조건과 경계조건이 주어지지 않으면(ill-posed) 원하는 결과를 얻을 수 없다. 쌍곡선형 방정식의 경우 특성값(Characteristics)의 수만큼 경계조건이 필요하며 2계 포물선형이나 2계 타원형 미분 방정식의 경우 하나의 경계조건이 적절히 주어져야 한다. 지역 규모 수치 예보 모델의 경우 다양한 방법의 경계조건을 결정하는 방법이 존재하며, 일반적으로 수치예보 결과를 분석함으로써 그 적절성을 평가할 수 있다. 측면 경계조건은 단방향(1-way) 적분 방식과 양방향(2-way) 적분 방식이 있다.

수치예보 모델에서 격자 크기는 모델이 분해할 수 있는 대기 운동의 규모와 관련이 된다. 전지구 모델이나 넓은 영역을 포함하는 수치 예보 모델의 경우 컴퓨터 성능의 한계로 모델 전체 영역에 대해 격자 크기를 줄이는 것은 한계가 있다. 즉 수십 - 수백 km의 격자 간격을 가지는 모델로 모의된 결과를 이용하여 관심 지역에 대해 수 km의 격자 간격을 가지는 고해상도모델을 수행하게 된다. 이렇게 고해상도의

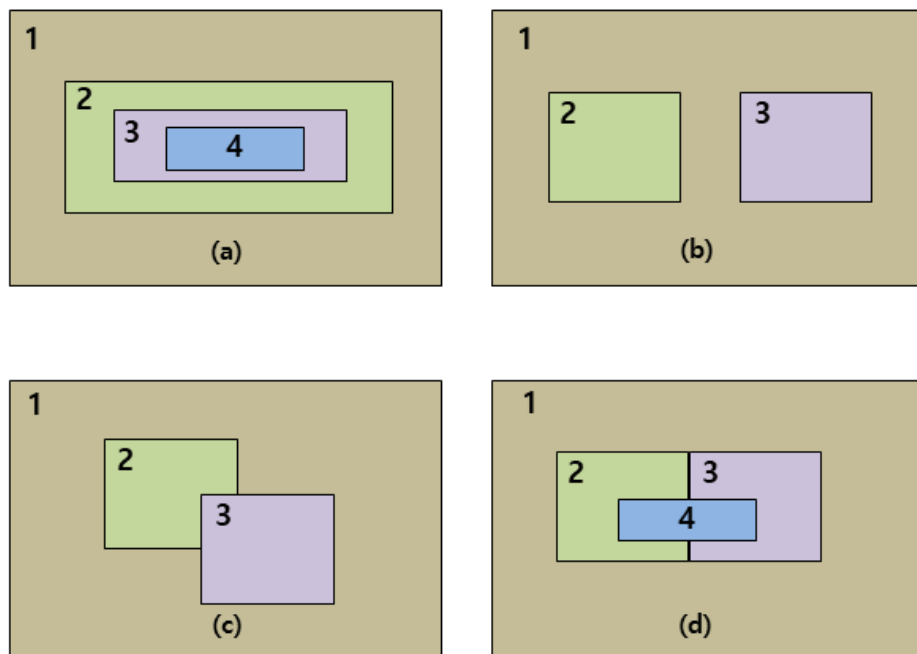
모델 결과를 위해 설정하는 격자를 등지격자(Nested Grid)라고 한다. Fig. 4-10은 C-grid를 이용한 수평 등지격자 개념을 설명하고 있다. 저해상도 모델의 하나의 격자점은 고해상도의 9개의 격자점을 포함하고 있다. 즉 x와 y 방향으로 각각 1:3의 비율을 가지는 예시이다.



**Fig. 4-10.** Arakawa-C grid staggering for a portion of a parent domain and an embedded nest domain with a 3:1 grid size ratio

모델링에서 쓰이는 1-way 적분 방식과 2-way 적분 방식은 성긴격자와 상세격자가 서로 어떤 방식으로 상호작용하는지를 구분한다. 1-way nesting 적분 방식은 성긴격자에서 상세격자로만 격자간 정보가 교환되며, 2-way nesting 적분 방식은 상세격자와 성긴격자 상호간 정보를 교환하는 방식이다. 즉, 2-way 적분방식에서는 상세격자의 해는 성긴격자 해를 상세격자 내에 위치한 성긴격자점으로 대체하는 방식의 양방향 정보교환 방식이다. 여기서는 2-way nesting 적분 방식을 사용하였으며, 이 방식은 고해상도의 모델 결과가 저해상도 모델의 적분에 영향을 미친다. 두 모델이 서로 정보를 교환하게 되므로 양방향 경계조건이라고 한다. 이 개념은 보통 지역규모 수치 예보에서 어떤 특정 영역에 공간 해상도를 더 높이고자 할 때 등지격자(Nested grid)와 함께 활용된다.

Fig 4-11과 같이 등지격자를 설정하는 다양한 방식이 있다. 등지격자는 사각형 모형이며, 부모격자(상위격자) 내에 위치하게 된다. 정수형의 공간( $\Delta x_{\text{coarse}} / \Delta x_{\text{fine}}$ )과 부모격자 내에서 임의로 정렬된다. 하나의 격자와 내부에 다수의 등지격자를 포함할 수 있으며 WRF에서 각 등지격자는 성긴격자 내부에 완전히 포함되어야 하는 규칙을 따른다. 그림에서 (a)와 (b)는 적절하게 설정된 등지격자이지만, (c)와 같이 겹치거나 (d)와 같이 내부에서 공유되는 격자는 잘못 설정된 경우이다. 본 논문에서는 광학적 등지격자 형식인 (a) 방식을 사용하였다.



**Fig. 4-11.** Several nesting grid methods. (a) optical nesting grid, (b) same parents grid, (c) overlay grid, and (d) intra sharing grid

#### (4) 초기입력자료

본 논문에서는 해상에서의 풍력발전량 예측을 위한 기상요소인 바람을 예측하기 위해, 지역모델인 WRF의 초기입력자료와 경계자료로써 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)에서 제공하는 Global Forecast System(GFS) 자료를 이용하였다. GFS 자료는 위·경도 격자 간격이  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  의 수평 해상도를 가지며, 10 hPa - 1,000 hPa까지 연직 방향으로 26개 층으로 구성되어 있다. GFS에서 취급되는 변수는, 온도장, 수평 바람장, 연직 바람장, 기압장(지위고도장), 상대습도장 등의 종관변수들이 있으며, 연직방향으로 구성된 26개의 층마다 데이터가 존재한다. GFS 자료는 하루에 4번(00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC) 생산하며, NCEP에서 관리하는 FTP 서버에 자료를 업로드한다. 본 논문에서는 18UTC 자료를 지역모델의 초기입력자료로써 사용하였다.

대정과 김녕 지역에 대한 지역모델인 3차원 기상모델링 수행시 초기 및 경계장을 사용함에 따라 예측지역의 전반적인 기상변수장을 먼저 예측하고, Nesting 기법을 이용하여 상세 기상장을 예측함에 따라 해당 지역을 대표할 수 있는 고해상도의 기상값 예측 수행이 가능하다.

초기 입력자료로 쓰이는 해수면온도는 WRF 모델에서는 옵션으로 제공하는 RTG SST 자료를 사용하였다. 이 데이터는 일차원 평면자료이며 해수면온도의 일변화를 고려하지 않는다. WRF-OML 모델에서는 해양모델인 Hybrid Coordinate Ocean Model(HYCOM)에서 생성된 해수면온도를 사용하였으며, 해수면온도, 혼합층깊이를 결정하기 위해 main calculation 과정의 모델 적분과정에 응용하였다.

#### 4.1.2. 대기-해양 접합모델의 적용

수치모델이 근본적으로 내재하고 있는 수치해석의 불확실성 때문에 해상풍을 정확하게 예측하는 데에는 한계가 있다. 그러므로, 해상에서의 바람 예측정확도를 높이기 위해서는 대기-해양 상호작용을 고려할 필요가 있다. 정확한 운동량 및 플럭스 모수화 방법을 개선하기 전에 고려할 사항은 사용중인 모델에서 해수면 온도의 일변화를 제대로 반영할 수 있느냐가 중요하다. 한반도 연안은 다양한 기상 및 해양 현상에 의해 외해보다 시공간적으로 해수면온도의 변화가 심하기 때문에 초기입력장으로 사용되는 해수면온도, 혼합층 깊이, 수온약층의 기울기를 고려하는 것이 중요하다.

해수면온도는 공간적 변화뿐 아니라 시간적인 변화로 인해 해상풍 예측에 영향을 줄 수 있다. 최근에는 원격탐측기술인 위성관측의 발달로 시간해상도가 높아져서 하루 간격의 해수면 온도자료도 대기모델에 사용된다. 그러나 낮과 밤의 일사량 차이가 큰 경우 하루 중에도 해수면 온도가 변화할 수 있고 [71], 특히 수온의 연직구배가 큰 시기에는 태풍과 같은 강한 바람에 의한 수직혼합작용으로 단기간에 해수면 온도가 크게 변화할 수 있다 [72]. 따라서 고정된 하루 간격의 해수면 온도를 사용하는 것은 해수면의 일변화를 고려할 수 없어 정확도 높은 연안해역의 바람장 산출이 어려울 수 있다. 따라서, 보다 정확한 해상풍의 추정을 위해서는 고해상도 해수면 온도의 단기변화를 고려할 수 있도록 해수의 수직혼합과정을 모사할 수 있는 해양혼합층(Ocean Mixed Layer) 모델을 대기모델에 결합하여 사용하는 것이 필요하다.

OML은 수온과 밀도가 연직으로 일정한 층으로 해양과 대기 사이에 운동에너지와 열에너지 교환을 결정하는 매우 중요한 역할을 한다. OML은 바람에 의한 혼합이 지배적이며 바람의 세기에 따라 혼합층깊이(Mixed Layer Depth, MLD)가 변하고 이는 표층수온의 변화를 일으키는 이유가 된다 [73-74].

Fig 4-12는 이 연구에서 사용된 해양혼합층 모델을 보여주고 있다. 이 모델은, 해양의 이류향을 무시하고 연직 혼합만을 고려한 1차원 모델로써, Pollard et al. [75]을 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.



$$\tau = \rho C_D V_{10}^2 \text{ ----- (4-2)}$$

이 식에서  $\tau$ 는 바람응력으로써, 연직혼합을 일으켜 따뜻한 혼합층과 차가운 수온약층의 해수가 혼합됨으로써 표층을 냉각시키는 역할을 한다.  $\rho$ 는 공기밀도,  $C_D$ 는 마찰계수,  $V_{10}$ 은 10 m 높이에서의 풍속이다. 마찰계수는 표층의 거칠기 길이(Roughness length)와 관련이 있다. 거칠기 길이는 육상에서는 지형의 특성에 따라 고정된 값을 사용하지만, 해상에서는 파랑이 완전히 발달했다는 가정하에 10 m에서 풍속의 함수로 유동적인 값을 사용한다 [76, 77].

$$H = \rho c_p V_{10} \theta \text{ -----(4-3)}$$

여기서 H는 현열 플럭스로써, 대기와 해양의 기온차에 의해 결정된다.  $\rho$ 는 공기밀도,  $c_p$ 는 정압비열(specific heat of air at constant pressure),  $V_{10}$ 은 10 m 높이에서의 풍속,  $\theta$ 는 잠재온도(potential temperature)이다.

$$E = \rho C_E V_{10} \Delta q \text{ ----- (4-4)}$$

이 식에서 E는 잠열 플럭스로써, 대기와 해양의 비습 차이와 풍속에 의해 결정된다.  $\rho$ 는 공기밀도,  $C_E$ 는 수증기 벌크전달계수(bulk transfer coefficient),  $V_{10}$ 은 10m 높이에서의 풍속,  $\Delta q$ 는 비습차이다. 복사에너지는 해수면 온도의 일변화에 영향을 미치는데, 위에서 표현한 현열과 잠열 역시 해수면 온도의 일변화에 중요한 역할을 한다.

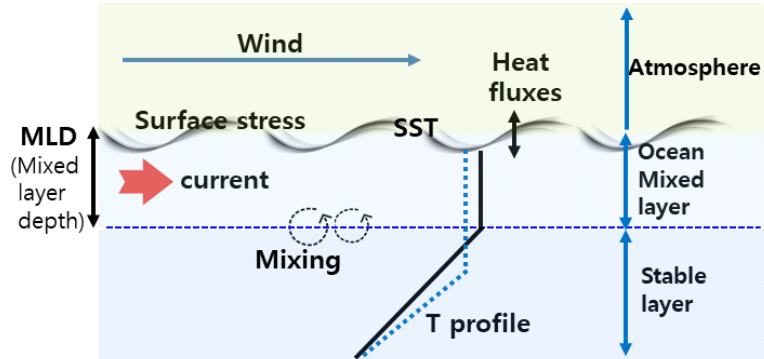


Fig. 4-12. Schematic of the one-dimensional ocean mixed layer model used in the WRF model

해양혼합층모델 초기값으로 사용되는 SST는 Hybrid Coordinate Ocean Model SST(HYCOM SST)를 사용하였다. 본 논문에서 활용된 HYCOM SST는 혼합층깊이(Mixed Layer Depth, MLD)를 결정하기 위해 해양열량(ocean heat contents)을 이용하며, MLD는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = Z - \left( \frac{2(T_s Z - H_c)}{T} \right)^{1/2} \text{-----(4-5)}$$

여기서 D는 해양의 MLD [m],  $T_s$ 는 상층 해수온도 [K],  $H_c$ 는 상층에서의 해양열량 [ $\text{Jm}^{-2}$ ], T는 수심 100 m 내에서의 수온감률( $0.2 \text{ Km}^{-1}$ )을 나타낸다. Z는 해양열량 계산시 고려하는 최저 수심으로, 여기에서는 100 m를 사용하였다. 일반적으로 해양은 대기보다 열용량이 크기 때문에 기온의 일변동은 1 K 이하로 작은 편이다. 여기서는 HYCOM에서 생산되는 일평균 MLD를 OML모델에 적용하였다.

Fig 4-13은 대기 모델인 WRF에서 사용되는 대표적 해수면 온도자료인 Real-Time Global Sea Surface Temperature(RTG SST)로써, 최대  $1/12^\circ$  (약 8 km)의 공간 해상도를 가지고 있다. Fig. 4-14는 본 논문에서 WRF-OML 모델에서 사용한 해수면온도 자료인 HYCOM SST로써,  $1/20^\circ$  (약 5 km)의 공간 해상도를 가지며, RTG SST와 달리 연안 부근의 수온변화를 자세히 모사할 수 있는 장점을 가지고 있다. RTG SST는 한반도 남서해안의 해수면온도를 비현실적으로 모의하는 반면, HYCOM SST는 비교적 현실적으로 시뮬레이션하고 있다.

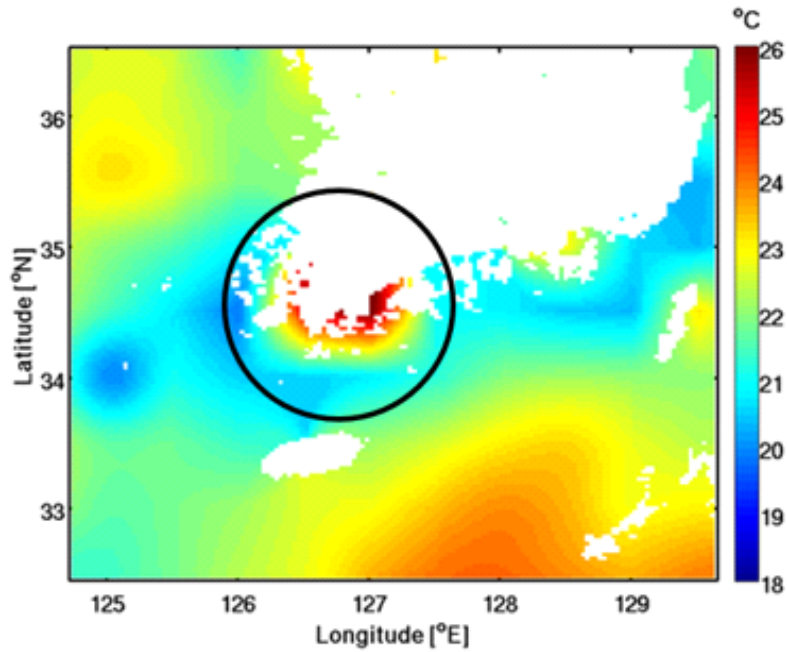


Fig. 4-13. Spatial distributions of Real Time Global Sea Surface Temperature (RTG SST) used in the original WRF model at 00UTC 1 July 2016

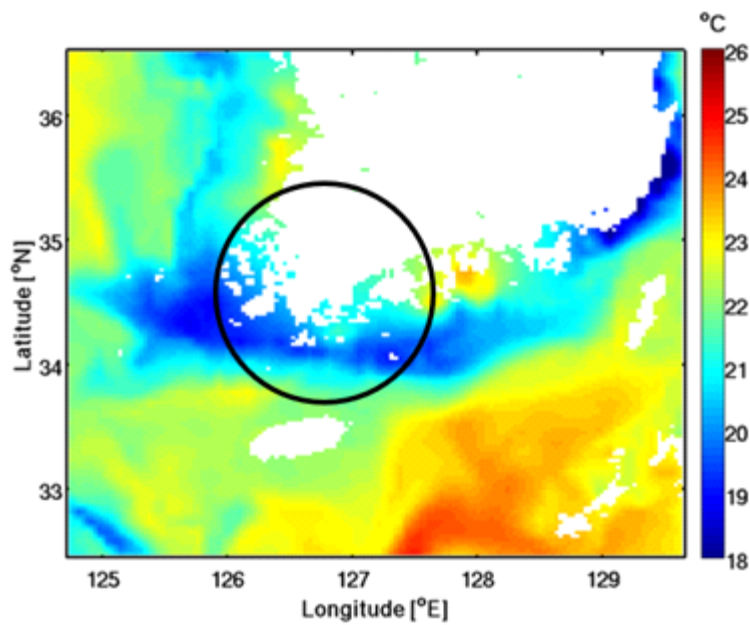


Fig. 4-14. Spatial distributions of Hybrid Coordinate Ocean Model Sea Surface Temperature (HYCOM SST) used in WRF-OML coupled model at 00UTC 1 July 2016

OML 모델은 WRF 모델에서 해양혼합층 프로세스를 시뮬레이션하기 위해 WRF에서 활용이 가능하도록 설계되었다. 이 모델은 난류 혼합층에 공급된 바람응력을 사용하여 OML에서의 흐름을 모의하며, 결과적으로 더 깊은 층의 차가운 온도와 혼합을 시뮬레이션한다. 해수의 깊은 층에서 얇은 층으로 차가운 물이 혼입되면 표면 온도가 변하고 OML이 냉각되며, 해수면온도 역시 변한다. 이러한 프로세스는 OML이 그리드포인트를 가로질러 열전달이 발생하지 않는다고 가정하므로 온도의 수직 재분포를 통해서만 수행된다. 관성 흐름의 회전과 더불어, 이에 연관된 혼합 및 SST 변화에 연관된 효과들을 통합하기 위해 OML 모델은 코리올리 항을 고려하며, 압력구배와 수평 이류항은 무시하였다. OML 모델에 있어 수평이류 및 용승 조건이 없으면 폭풍을 모의하는데 있어서 SST 냉각의 불확실성이 약 15 %에 달한다 [72]. 또한, 빠르게 이동하는 열대저기압(이동 속도 > 4 m/s)에 있어서, 수평이류항은 폭풍에 의한 SST 냉각효과에 약간의 영향을 미친다고 하였다 [78]. WRF-OML 모델이 MLD 초기장, 해수면 깊은 층에서의 수온감률, 수면에서의 바람응력에 기초를 두고 SST 변화를 계산하기 때문에, WRF-OML의 정확도는 해상에서의 열상태 초기값에 크게 좌우된다 [79]. OML은 기본적으로 MLD를 모의하며, 임의의 시간 솔루션  $n$ 에 대한 혼합층 깊이의 변화율은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dh}{dt} = u\gamma Ri^{-n} \text{-----} (4-6)$$

이 식에서,  $h$ 는 MLD,  $u$ 는 속도,  $\gamma$ 는 상수값이다. 리차드슨 넘버인  $Ri$  및 열보존으로부터 비롯되는 해양의 온도변화는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Ri = \frac{gh\frac{\Delta\rho}{\rho}}{(\bar{u})^2} = \frac{g\alpha h(\Gamma h + T)}{u^2 + v^2}, \quad h\frac{\partial T}{\partial t} + (T + \Gamma h)\frac{\partial h}{\partial t} = + \frac{Q}{C_p\rho} \text{-----} (4-7)$$

여기서  $g$ 는 중력,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $\bar{u}$ 는 평균속도,  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $\Gamma$ 는 수온감률,  $T$ 는 온도,  $C_p$ 는 단위질량당 열용량,  $u$ 와  $v$ 는 수평속도,  $Q$ 는 수면을 통한 열유속이다.

#### 4.1.3. 접합모델을 활용한 해상풍 예측 프로세스

해상풍 및 이에 근거한 발전량 예측을 위한 수치모델의 수행 순서는 Fig. 4-15와 같다. 여기서는 두 개의 모델을 운영하는데, 대기모델인 WRF 모델과 대기-해양 접합모델인 WRF-OML 모델이다. 두 모델은 초기 입력장으로써 동일한 GFS 데이터를 사용하지만, 해수면온도자료는 WRF 모델은 RTG SST를, WRF-OML 모델은 HYCOM SST를 각각 사용한다. 전처리과정은 두 모델이 동일한 과정을 처리한다. 본격적인 수치모델 계산 과정에서는 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. 각 프로세스 별로 수행되는 세부적인 내용은 아래와 같다.

첫째, 초기자료의 입력 단계로써, 수치모델에 사용되는 대기, 해양의 초기 및 경계 자료의 확보가 중요하다. 또한, 해상풍 예측시스템에서 해수면 온도와 해양혼합층 모델에 이용되는 HYCOM 해양 3차원 자료를 실시간으로 확보하여야 한다. GFS 자료는 실시간으로 확보가 가능한데, 여기에는 기온, 상대습도, 바람, 기압 등 기상요인들이 포함된다. 한편, 두 종류의 해수면온도자료를 초기장으로 활용하는데, RTG SST는 WRF 모델 수행을 위해, HYCOM SST는 WRF-OML 모델 수행을 위한 초기장으로 입력된다.

둘째, 전처리 과정인 WPS(WRF Pre-processing System)는, 하나의 총괄 스크립트와 수치모델 수행에 필요한 여러 가지 파일을 만들어주는 세부 스크립트들로 구성되어 있다. 총괄 스크립트의 시작 부분은 예측이 시작되는 날짜가 결정되면 수치모델 수행에 필요한 대기 초기·경계 자료를 이용하기 위한 시작 날짜부터 예측이 끝나는 날짜를 계산한다. 다음으로, 주요 프로그램들(geogrid, ungrib, metgrid)을 수행하기 위한 여러 개의 namelist.wps 파일을 생성해주는 세부 스크립트를 실행한다. 여기서 생성된 namelist.wps 파일들을 이용하여 수치모델의 WPS 과정을 수행하게 된다. 이로써 수치모델 수행에 필요한 초기·경계 조건의 확보 및 수치적분을 위한 환경이 완성된다.

셋째, 이후 본격적인 수치모델 계산을 위한 namelist.input 파일을 생성하는 세부 스크립트가 작동하게 되고 미리 설정된 계산 노드에 의해 WRF 모델과 WRF-OML 모델이 수행된다. 이 과정에서는 두 모델 모두 기상장을 연직으로 내삽하고 물리과정을 적용하는 real.exe가 수행되고, 5개의 도메인에 대한 수치적분이 각각 이루어진다(wrf.exe). 한편, WRF-OML 모델에서는 이 과정에서 해수면온도 자료는 초기입력자료인 HYCOM 해수면온도자료로 대체하여 계산이 이루어지며, 추가적으로 oml.exe 과정을 통해 해양혼합층 모델이 수행된다.

넷째, 도메인별로 수치적분 계산이 끝나면 1시간 간격으로 저장된 여러 변수의 값들 중에서 필요한 변수만 선택하여 저장하는 MATLAB 프로그램이 수행되어 미리 지정된 디렉토리에 저장된다. 여기서는 최종적으로 바람 예측자료인 풍향과 풍속을 저장한다.

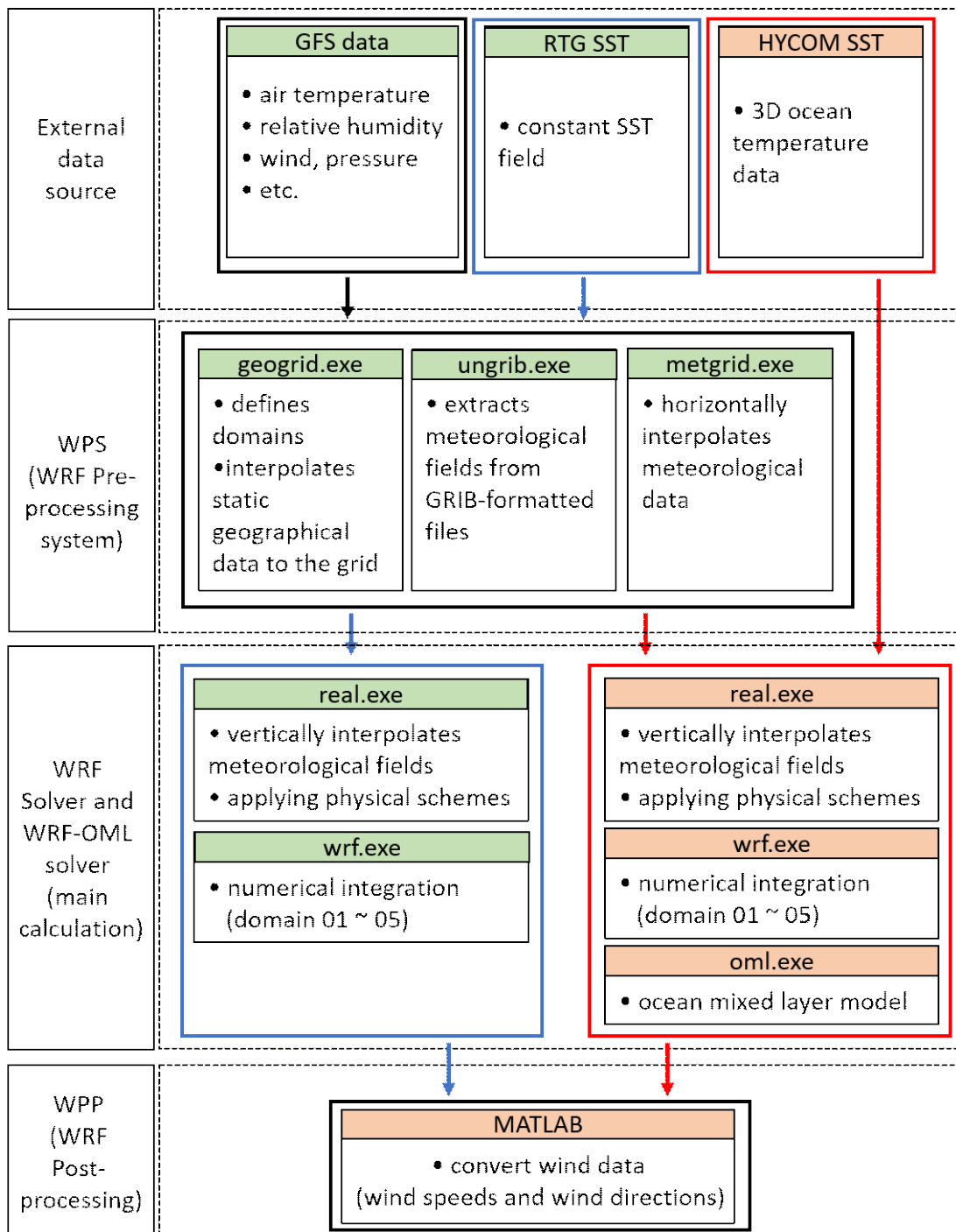


Fig. 4-15. Schematic diagram explaining the process of WRF and WRF-OML models for offshore wind prediction experiments. The blue arrows and boxes are for WRF process, and the red arrows and boxes for WRF-OML process, while the black arrows and boxes are for common process

## 4.2. 접합모델을 활용한 풍속 및 발전량 예측 결과

풍력발전은 태양에 의한 지구의 불균등 가열로 발생한 바람의 운동에너지를 블레이드의 공기역학적인 작용을 통해 회전에너지로 변환시키고, 이러한 기계적 에너지를 전기에너지로 변환시킨 후 전력계통에 제공하는 방식이다.

풍력발전 시스템의 출력은 이론적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \eta C_p \rho V^3 A \quad \text{-----}(4-8)$$

여기서  $\eta$  은 동력전달장치 및 발전기의 에너지변환 효율,  $C_p$  는 회전자의 동력계수,  $\rho$  는 공기밀도,  $V$  는 풍속,  $A$  는 블레이드 회전면적이다. 궁극적으로 풍력발전량은 풍속의 세제곱에 비례하므로 풍속의 정확한 예측은 풍력발전량 예측에 가장 중요한 요소이다.

풍력발전은, 시동풍속(cut-in wind speed) 이상에서 풍력발전 시스템이 가동하기 시작하며, 약 3.5 - 4.5 m/s 값이 일반적이다 [80].

시동풍속에서 정격풍속(rated wind speed) 사이에서는 출력특성은 풍속의 세제곱이 되며 정격풍속 이상에서는 정격출력이 유지되도록 제어된다. 정지풍속(cut-out wind speed) 이전까지 일정 출력이 유지되며 그 이상이 되면 운전이 정지된다. 정지풍속은 일반적으로 25 - 26 m/s 정도이다 (Fig. 4-16).

풍력발전량 예측정보는 풍력발전을 효율적으로 운영하기 위한 정보로써, 비용의 절감 뿐 아니라 매출의 증대 등 경제적 효과를 창출하는데 매우 중요한 역할을 한다.



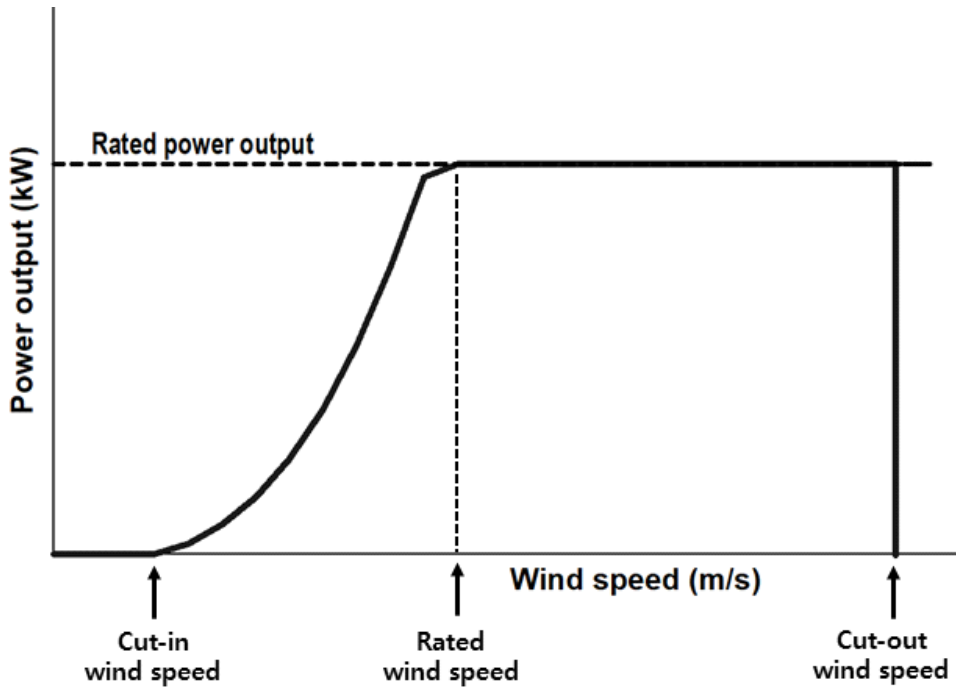


Fig. 4-16. Power curve of a wind turbine

모델 예측 결과와 관측 결과 사이의 연평균풍속을 검토하여, 풍황분석에서 많이 사용되는 와이블분포 비교를 통해 WRF-OML 모델의 풍속예측 타당성을 분석하였다. 다음으로 바람장미를 비교 분석하여 주풍향 판단을 위한 WRF-OML 모델의 타당성도 검토하였다.

WRF-OML 모델에서 예측한 바람값을 실제 기상탑에서 관측한 값과의 비교 및 검증을 위해서 모델의 10 m 예측값을 실제 관측이 이루어지는 높이의 예측값으로 보정하였다. 고도 보정을 위해서 사용된 풍속 보정식은 식 (4-9)와 같이 Deacon 방정식(즉, 멱법칙)을 이용하였다 [81-84].

$$\frac{U(Z)}{U(Z_a)} = \left( \frac{Z}{Z_a} \right)^\alpha \quad \text{-----(4-9)}$$

여기서,  $Z$ ,  $U(Z)$ 는  $Z$  높이 및  $Z$  높이에서의 풍속,  $Z_a$ ,  $U(Z_a)$ 는  $Z_a$  높이 및  $Z_a$  높이에서의 풍속이다. 또한  $\alpha$ 는 대기안정도를 나타내는 척도로써, 바람전단(wind shear) 혹은 풍속할증계수라고 한다. 풍속할증계수는 지형의 변화(계측지점을 기

준으로 기하평균높이)와 지면조도(Roughness)에 의해서 결정되며 이를 식으로 나타내면 식 (4-10)과 같다.

$$\alpha = a + b \ln [U(Z_a)]$$

$$a = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_0}\right)} + \frac{0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_a}{10}\right)} \quad \text{-----(4-10)}$$

$$b = - \frac{0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_a}{10}\right)}$$

여기서,  $Z_g$ 는 기하평균높이로써,  $\sqrt{Z \times Z_a}$  이며,  $Z_0$ 는 지면거칠기(지면조도),  $Z_a$ 는 풍속측정 높이에 해당한다.

#### 4.2.1. 대정사이트에서의 접합모델 예측성능

##### (1) 풍속 예측 성능

Fig. 4-17은 두 모델의 예측 결과를 보여주는 scatter plot이다. 모델값과 실측값 간 상관관계를 알 수 있는 결정계수  $R^2$ 은 WRF 모델과 WRF-OML 모델이 소수 셋째 자리에서 차이를 보일 정도로 거의 비슷했다. Table 4-5는 두 모델의 예측성능을 통계적으로 비교하기 위한 Bias 및 RMSE를 보여주고 있다. 예측값 및 관측값의 Bias는 WRF 모델은 1.09 m/s로써 양의 오차를 보이는 반면, WRF-OML 모델은 -0.07 m/s로 매우 작은 음의 오차를 보였다. RMSE는 WRF 모델은 2.88 m/s, WRF-OML 모델은 2.45 m/s로 나타나 0.4 m/s 이상의 오차율 차이가 발생하고 있음에 따라, WRF-OML 모델이 좋은 성능을 보이고 있다.

**Table 4-5.** Bias and RMSE of WRF model and WRF-OML model at Daejeong offshore met-mast

Variable	WRF model	WRF-OML model
Bias [m/s]	1.0875	-0.0715
RMSE [m/s]	2.8775	2.4537

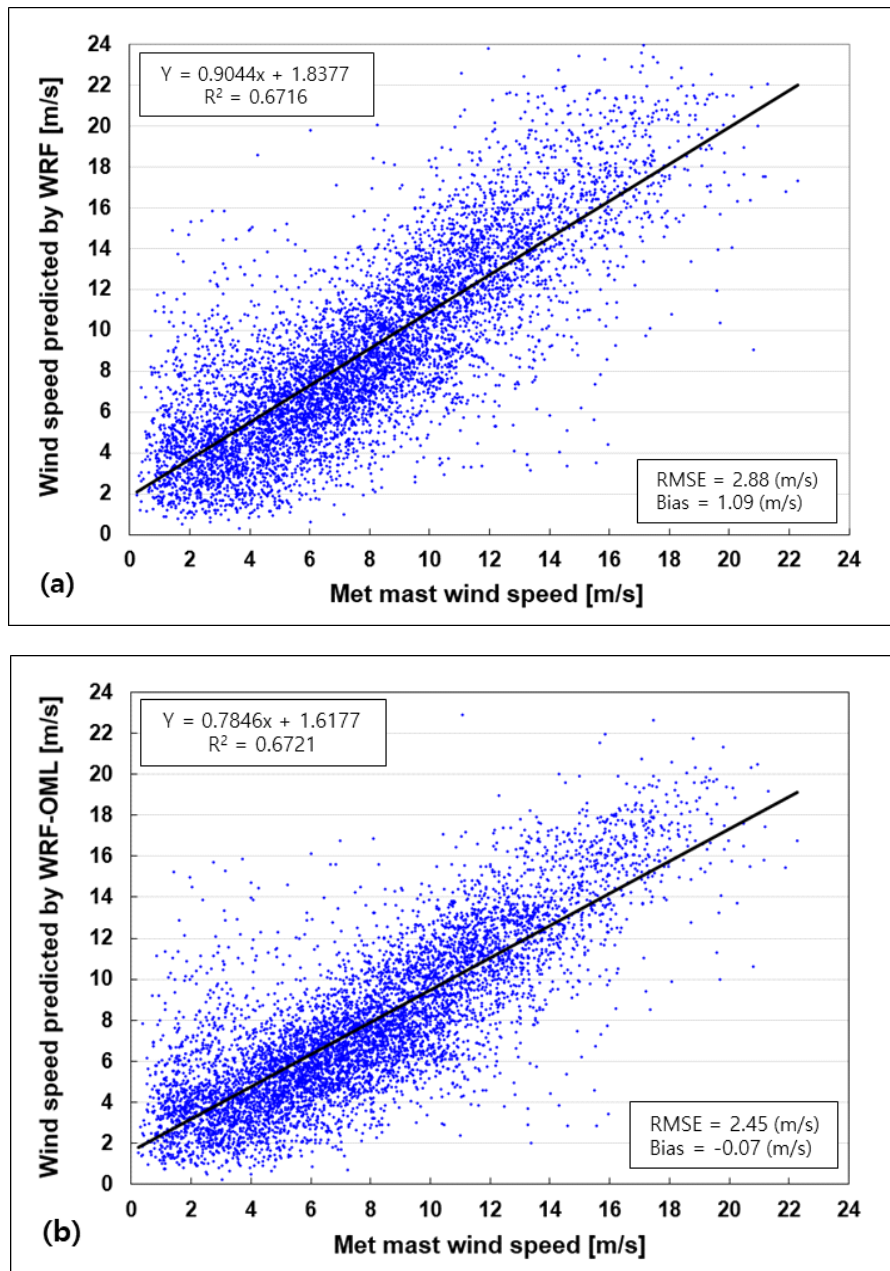


Fig. 4-17. Scatter plots of simulated results using (a) WRF and (b) WRF-OML (wind speed of 94m height) with observations at Daejeong offshore met-mast

Fig. 4-18은 대정 해상 기상탑에서의 관측데이터와 두 모델과의 월별 평균풍속을 비교하고 있다. 두 모델이 보이는 경향은 실측값과 매우 유사하지만, 실측값과의 오차는 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작다. 특히 8월부터 10월 및 3월부터 4월 사이에는 WRF-OML 모델과 실측값 간 매우 근소한 차이를 보이고 있어 모델의 정확도를 높이는 효과를 나타내고 있다.

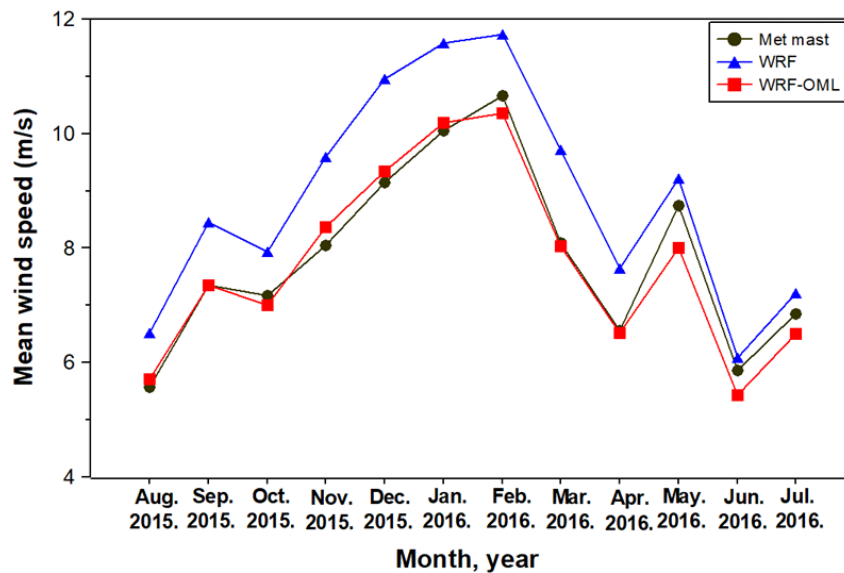


Fig. 4-18. Monthly mean wind speed of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast. Wind speeds at 94 m height

Fig. 4-19는 해상기상탑 94 m 높이에서의 바람장미를 보여주고 있다. 주풍향인 북서풍 계열의 바람(WNW, NW, NNW)의 빈도는 실측값이 42.8 %를 차지하였다. 한편, WRF 모델의 경우는 동일 계열의 바람의 빈도가 25.9 %를 차지하였으며, WRF-OML 모델의 경우 동일 계열의 바람의 빈도가 26.4 %를 차지함에 따라, 두 모델 모두 주풍향인 북서풍 계열의 바람을 모의하는데 있어서 실측값 대비 적은 빈도를 보이고 있다. 반면, 북동풍 계열(NNE, NE, ENE)의 바람은 실측값은 2.7 %에 비해 WRF 모델과 WRF-OML 모델 각각 17.1 %, 21.4 %를 차지하고 있다.

두 모델 모두 주풍향인 북서풍 계열의 바람을 적게 예측하는 반면 가장 빈도가 적은 북동풍 계열의 바람은 많이 예측함에 따라, 서풍에서 동풍에 이르는 바람의 경

우 시계방향으로 편향되어 예측하는 경향을 보이고 있다 (Table 4-6). 한편, 이런 경향은 기상학적으로 기압계의 패턴에 따라, 또는 상층 바람장의 효과에 따라 지상풍을 예측하였으나, 다른 이유로 인하여 실제 풍향이 다를 수 있으며, 비교적 장기간에 걸친 예측패턴이 확인된다면, 해당 풍향에 대한 적절한 모델 튜닝 등의 방법으로 모델 정확도를 높일 수 있다.

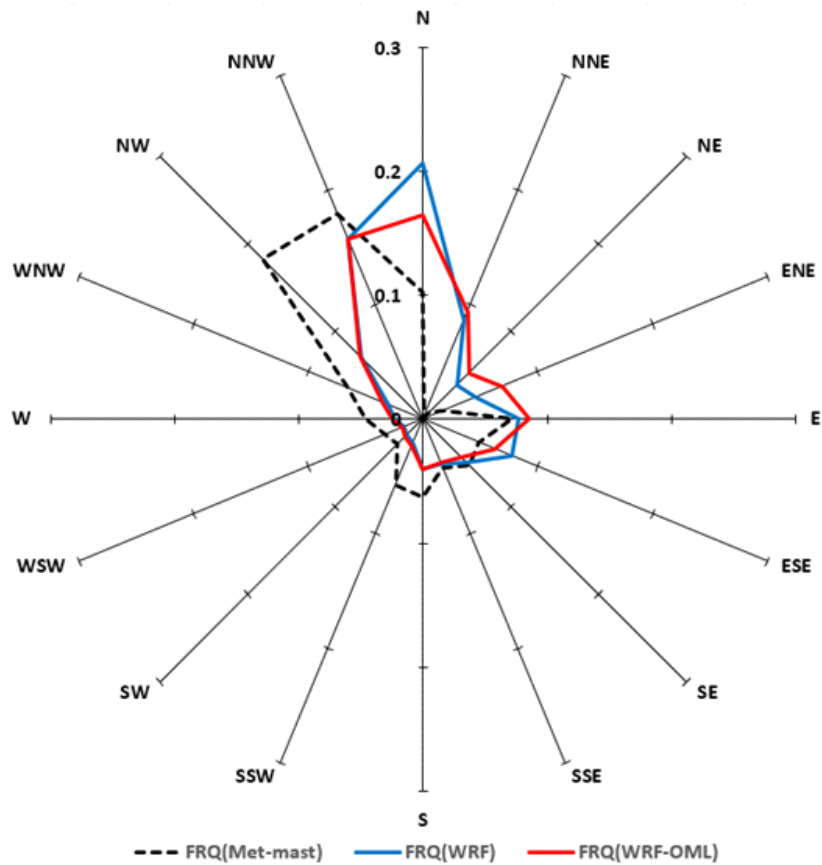


Fig. 4-19. Wind roses of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast. Wind speeds at 94 m height

**Table 4-6.** Frequency by wind directions of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast

Wind direction	Met-mast	WRF		WRF-OML	
	Frequency	Frequency	Ratio [%]	Frequency	Ratio [%]
N	0.103	0.206	201.3	0.165	160.4
NNE	0.002	0.086	4,970.0	0.093	5,351.6
NE	0.007	0.038	513.5	0.052	699.4
ENE	0.018	0.046	257.4	0.068	386.6
E	0.071	0.076	107.1	0.085	120.2
ESE	0.048	0.077	160.4	0.062	128.9
SE	0.052	0.050	96.3	0.043	83.3
SSE	0.042	0.039	92.7	0.038	91.6
S	0.063	0.040	63.7	0.040	63.4
SSW	0.057	0.021	37.7	0.023	41.0
SW	0.029	0.018	62.9	0.020	69.5
WSW	0.033	0.017	51.2	0.018	55.1
W	0.046	0.023	49.8	0.025	53.2
WNW	0.066	0.031	47.4	0.035	53.4
NW	0.182	0.071	38.9	0.072	39.7
NNW	0.180	0.157	87.5	0.015	87.2

Fig. 4-20은 대정 해상기상탑에서의 관측데이터와 두 모델과의 평균풍속을 하루 24시간에 따라 보여주고 있다. Met-mast 실측값에서는 03시, 09시, 16시 등의 시각에서 변곡점이 나타나고 있는데, WRF 모델은 이를 비교적 잘 모의하고 있으나, WRF-OML 모델은 그에 비하여 민감도가 다소 떨어지는 결과를 보여주고 있다. 한편, 실측값과의 오차는 WRF 모델은 시계열 전체에 걸쳐 1 m/s 이상의 오차를 보이는 반면, WRF-OML 모델은 실측값과의 오차가 매우 작다. 하루중 일사에 의한 해수면의 가열은 약 14시 이후이며 이에 따라 풍속이 증가하게 된다. 더불어, 일반적으로 해풍이 부는 시간이기도 하므로 두 가지 효과가 합해지면 풍속이 더 커질 수 있다. 한편, 밤에는 반대로 난류효과가 적어, 일반적으로 바람이 약하다. 두 모델은 이를 잘 반영하고 있으며, 특히 16시 이후 자정까지 WRF-OML 모델의 풍속 예측값이 실측값과 매우 유사하게 나타나고 있다.

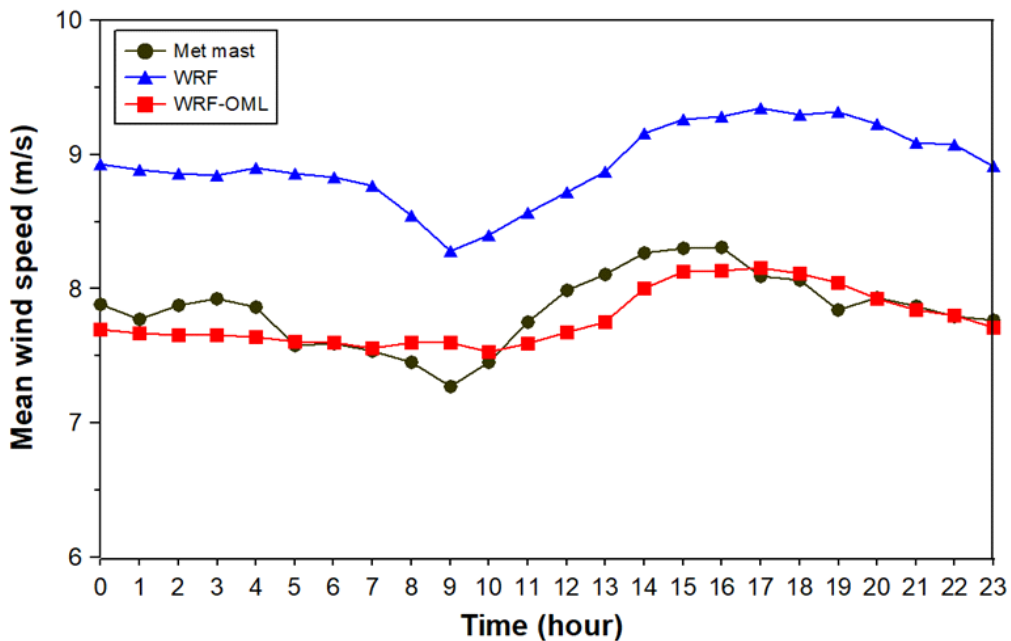


Fig. 4-20. Hourly mean wind speed of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast. Wind speeds at 94 m height



Fig. 4-21은 풍속별 Bias와 RMSE를 나타내며, 거의 전 구간에서 일관적으로 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작은 오차를 보이고 있다. Bias의 경우 두 모델 모두 저풍속 구간(less than 4 m/s)에서 과대모의 하고 있으며 20 m/s 이상을 제외한 모든 구간에서 WRF-OML 모델이 더 좋은 성능을 보이고 있다. RMSE는 두 모델 모두 저풍속 구간에서 오차가 다소 크게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 6 m/s - 16 m/s 사이에서 WRF-OML 모델은 안정적인 예측을 하는 반면, WRF 모델은 좀 더 큰 오차를 보이고 있다. 한편, 정격풍속인 13.0 m/s 이상의 풍속 구간에서 풍력에너지의 생산 효율이 가장 높기 때문에, 이 구간에서의 안정적인 풍속예측은 발전량 예측에 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다.

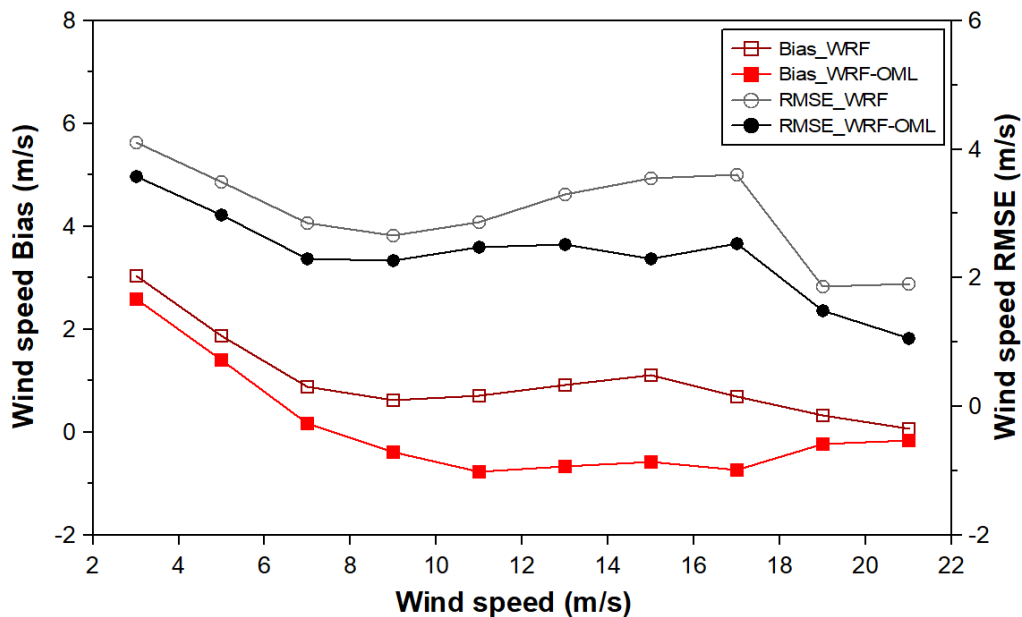


Fig. 4-21. Wind speed bias and RMSE with wind speed at Daejeong offshore met-mast

Fig. 4-22는 예측시간에 따른 Bias와 RMSE를 보여주고 있다. Bias는 두 모델 모두 예측시간 초기부터 오차의 증감을 반복하고 있다. 시간이 흐를수록 오차의 폭이 커지고 있으나, WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 평균적으로 0.27 m/s 작은 오차를 보이고 있다. RMSE도 예측시간이 길어질수록 오차가 증가하고 있으며 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 평균적으로 0.49 m/s 작은 오차를 보이

고 있다. 특히 모델 구동 직후 WRF 모델의 RMSE는 오차가 증가하는 반면 WRF-OML 모델은 오차 변동이 작게 나타나고 있으며, bias 역시 WRF 모델은 과대모의 폭이 늘어나는 반면, WRF-OML 모델은 오차가 작아지고 있다. 이후 - 방향으로 커졌지만 4시간 이후 다시 오차가 작아지는 경향을 보이고 있음에 따라, 해양혼합층모델의 반영에 따른 효과로 분석된다.

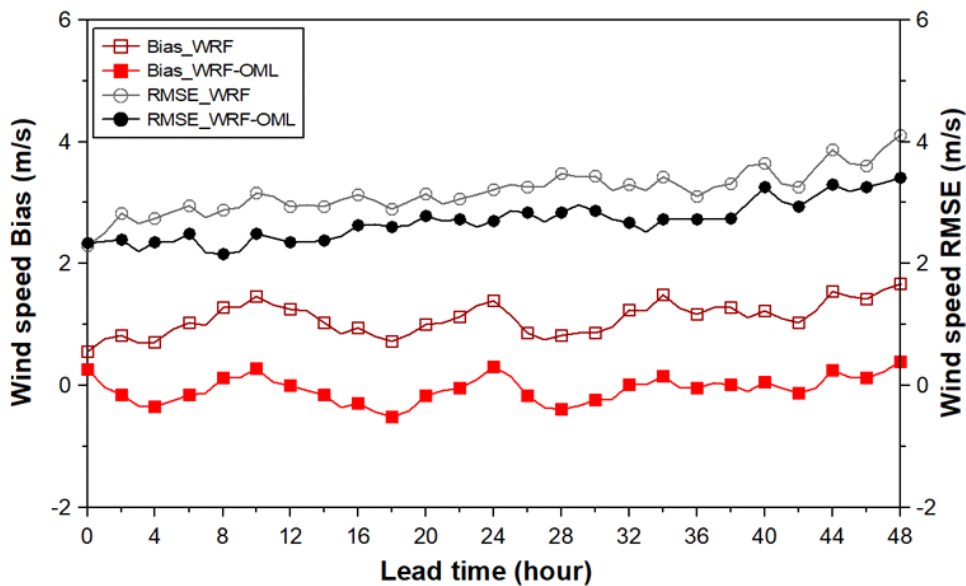


Fig. 4-22. Wind speed bias and RMSE with lead time at Daejeong offshore met-mast

계절별 Bias와 RMSE를 Fig. 4-23에 보여주고 있다. WRF-OML 모델의 Bias는 매우 근소한 차이로 음의 오차를 보이고 있으나, WRF 모델의 Bias는 지속적으로 실측값과 1 m/s 내외의 양의 오차가 발생하고 있다. RMSE는 두 모델간 크게 차이가 나지는 않으나 4계절 모두 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 실측값에 더 가까운 예측을 하고 있다. 특히 여름철에서 가을철 사이는 해수면 가열과 관련하여, 풍속의 변화가 심할 수 있는데, 이 시기에 WRF-OML 모델은 WRF 모델보다 예측정확도가 더 높아, 해양혼합층 모델을 적용한 효과로 분석된다.

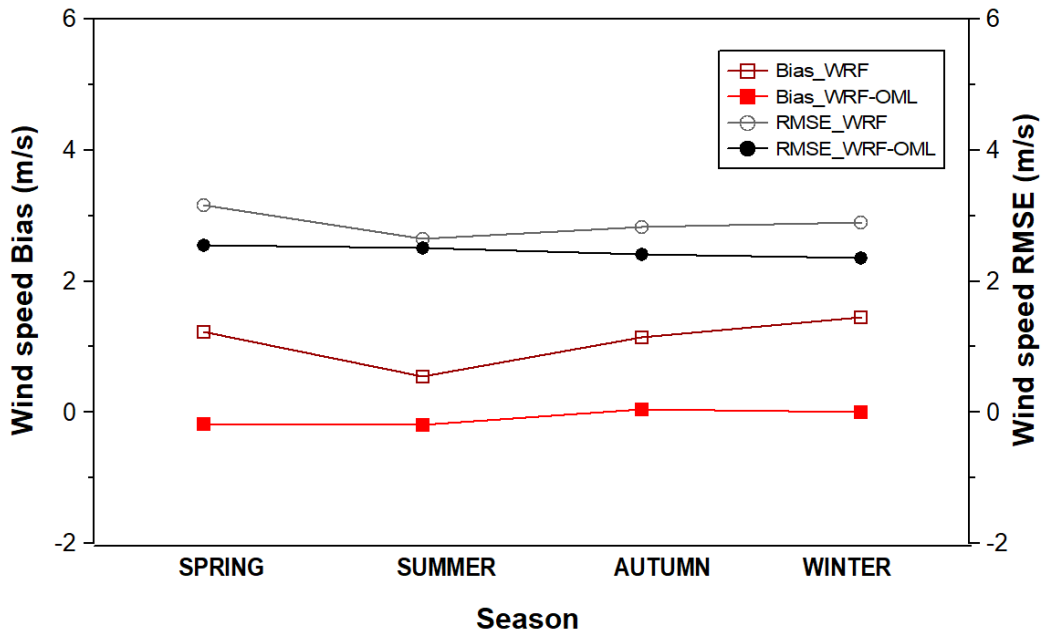


Fig. 4-23. Wind speed bias and RMSE with seasons at Daejeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November, and winter is December to February

Table 4-7은 대정해상기상탑에서 측정된 풍속과 두 종류의 모델로부터 예측된 풍속을 월별로 보여주고 있다. 대정해상기상탑에서 측정된 평균풍속은 7.85 m/s이며, WRF 모델에 의한 평균풍속은 8.89 m/s로써 13.2 % 과대 추정을 하는 반면, WRF-OML 모델로부터 예측된 평균풍속은 7.74 m/s로써, 1.4 % 과소 추정하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, WRF-OML 모델이 월평균풍속 0.93 m/s 및 11.8 %의 낮은 오차율을 보임에 따라, WRF 모델보다 더 좋은 성능을 보여주고 있다. 전체 기간 동안, WRF 모델은 과대모의를 하는 반면, WRF-OML 모델은 측정값과 더 가까운 값을 예측하고 있음을 알 수 있다.

**Table 4-7.** Monthly mean wind speed from the observation data and from the models for the filtered data at Daejeong offshore met-mast

Period	Met-mast	WRF		WRF-OML	
	Wind speed [m/s]	Wind speed [m/s]	Ratio [%]	Wind speed [m/s]	Ratio [%]
Aug. 2015	5.60	6.52	116.4	5.71	102.0
Sep. 2015	7.45	8.57	115.0	7.48	100.4
Oct. 2015	7.12	7.88	110.7	6.92	97.2
Nov. 2015	8.06	9.56	118.6	8.34	103.5
Dec. 2015	9.16	11.00	120.1	9.41	102.7
Jan. 2016	10.09	11.64	115.4	10.24	101.5
Feb. 2016	10.62	11.68	110.0	10.32	97.2
Mar. 2016	8.07	9.63	119.3	7.95	98.5
Apr. 2016	6.53	7.65	117.2	6.53	100.0
May 2016	8.85	9.36	105.8	8.13	91.9
Jun. 2016	5.91	6.11	103.4	5.45	92.2
Jul. 2016	6.71	7.14	106.4	6.44	96.0
Total	7.85	8.89	113.2	7.74	98.6

## (2) 발전량 예측 성능

Fig. 4-24는 기상탑과 두 모델의 와이블 분포함수 및 이 연구에서 사용된 A사의 5.56 MW 풍력발전기의 Power curve를 보여주고 있다. WRF-OML 모델에서는 해상기상탑의 실측데이터와 유사한 풍속밀도를 보이고 있으나, WRF 모델에서는 상대적으로 높은 풍속의 빈도가 많은 경향이 있으며, 특히 10 m/s 이상 고풍속의 예측 빈도가 높다. 한편, met-mast 평균풍속은 앞서 언급한 고도별 와이블분포에서의 동일 높이인 94 m에서의 평균풍속과 차이를 보이는데, 이는 데이터 회수율의 차이이다. 두 종류의 모델과 비교하기 위해 관측데이터는 모델데이터와 일대일 대응이 필요하며, 이를 위해 필터링된 모델데이터의 시간과 동일한 시간의 관측데이터를 제외하고 비교 분석한 결과이다.

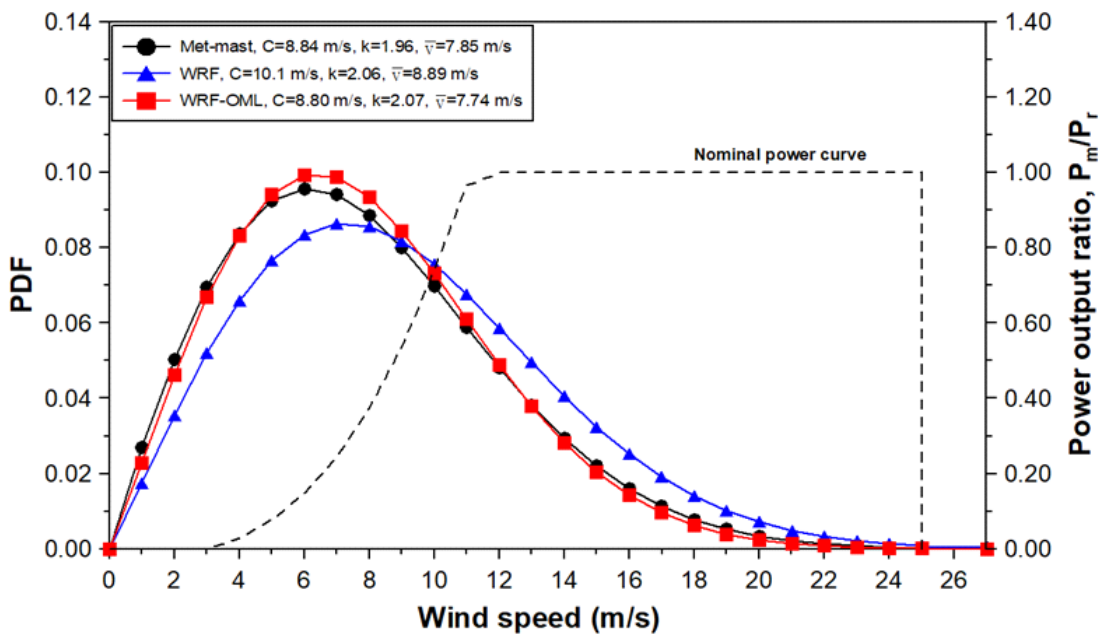


Fig. 4-24. Weibull Distribution of observations and predictions from WRF and WRF-OML, and power curve of the wind turbine at Daejeong offshore met-mast.  $\bar{v}$  is mean wind speed,  $P_m$  is measured power and  $P_r$  means rated power

Fig. 4-25는 1년간 Met-mast에서 실측한 풍속값으로부터 산출된 발전량에 대한 에너지밀도 및 두 개의 예측모델로에서 예측한 풍속값으로부터 산출된 발전량에 대한 에너지밀도이다. 에너지밀도는 바람빈도와 매우 밀접하다. 주풍향인 북서풍계열(NNW, NW, WNW)을 모델에서 덜 예측하는 경향과 유사하게, 에너지밀도 역시 실측값 대비 낮은 경향을 보인다. 북서풍계열의 경우, met-mast 실측값을 근거로 한 에너지밀도는 55.2 %인데 비해, WRF 모델은 35.6 %, WRF-OML 모델은 39.3 %를 보였다. 반면 북동풍 계열(NNE, NE, ENE)은 met-mast 기준 에너지밀도가 0.5 %인데 비해 WRF모델, WRF-OML 모델은 각각 13.0 %, 16.0 %를 보였다.

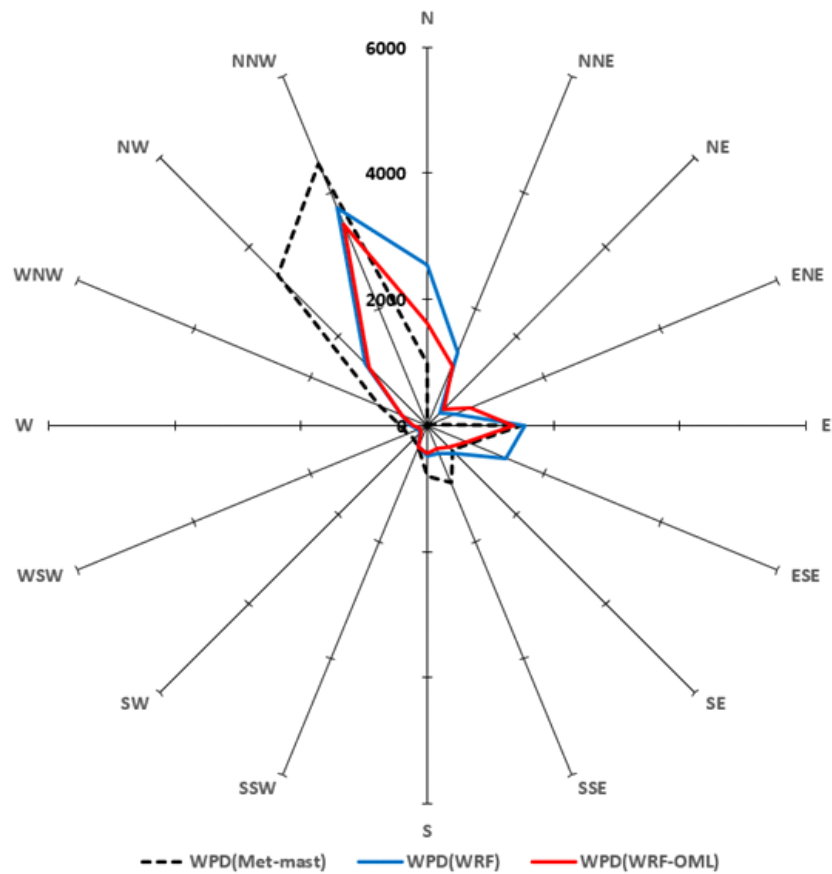


Fig. 4-25. Energy roses of observations and predictions from two models at Daejeong offshore met-mast

Fig. 4-26은 예측된 평균풍속으로부터 산출된 월별 발전량을 보여주고 있다. WRF 모델에 의해 예측된 발전량은 5월부터 7월까지의 3개월은 met-mast에서 실측된 풍속에 의해 계산된 발전량과 매우 유사하게 모의하고 있으나, 그 외의 기간에서는 트렌드는 유사하게 나타나고 있는 반면 양에서 비교적 많은 차이를 보이고 있다. 반면, WRF-OML 모델에 의해서 예측된 발전량은 met-mast의 풍속에 근거하여 산출된 발전량과 비교했을 때, 트렌드 및 양에서 크게 차이가 나지 않고 있다.

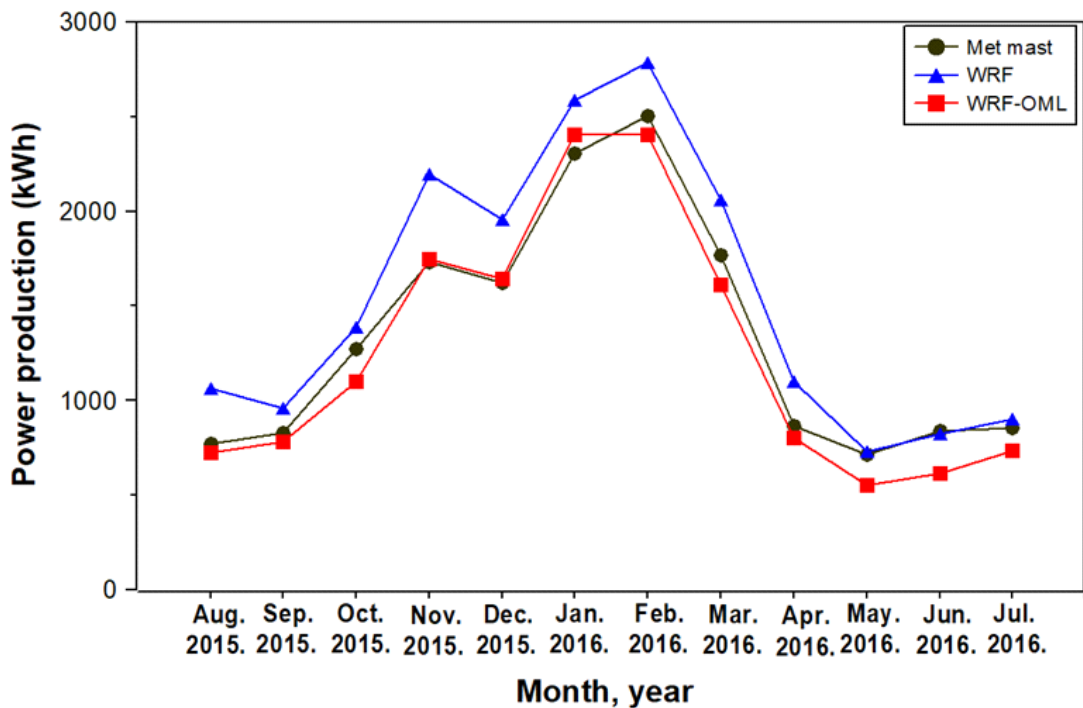


Fig. 4-26. Monthly power production at Daejeong offshore met-mast

Fig. 4-27은 WRF 모델과 WRF-OML 모델에서 예측한 발전량의 월별 오차에 대한 분석결과이다. 두 모델의 Bias는 유사한 경향을 보이고 있으나, WRF 모델이 비교적 큰 폭의 음의 bias를 줄곧 유지하는 반면 WRF-OML 모델은 비교적 작은 폭으로 음과 양의 bias를 보이고 있다. 5월부터 7월까지의 3개월을 제외하고 WRF-OML 모델이 WRF 모델에 비해 매우 우수한 예측을 하고 있음을 알 수 있다. RMSE는 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 거의 전 구간에 걸쳐 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 정확도가 높다. 한편, 5월 - 7월은 다른 기간에 비해 모델데이터

의 회수율이 낮은 기간(5월 32.3 %, 6월 83.3 %, 7월 64.5 %)으로써 해당 기간 동안 모집단의 수가 적어 분석결과에 영향을 준 것으로 추정된다.

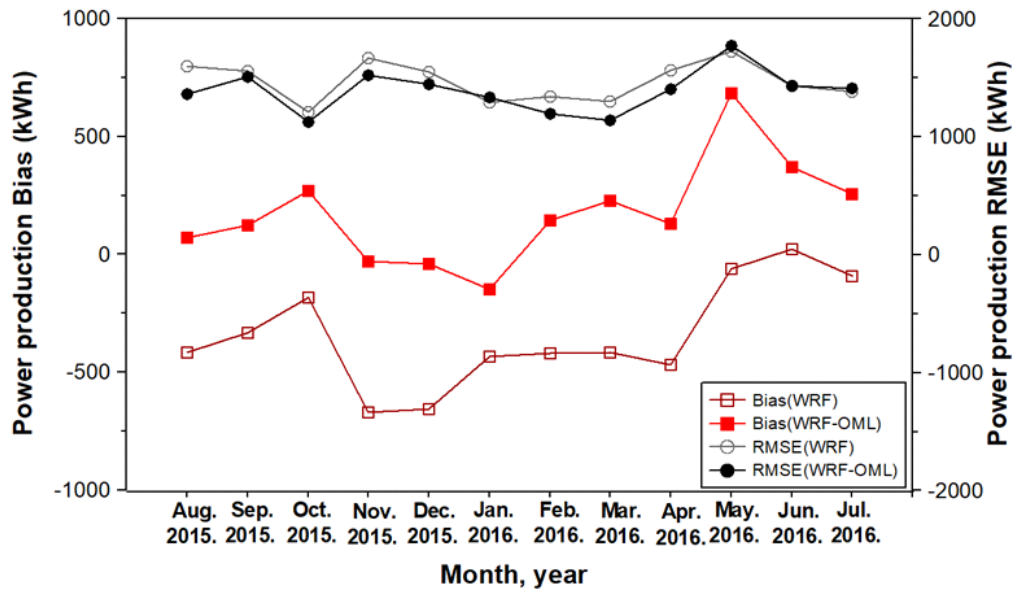


Fig. 4-27. Power production bias and RMSE at Daejeong offshore met-mast

Fig 4-28은 두 모델과 실측값과의 계절별 발전량 오차를 나타낸다. Bias는 WRF 모델이 계절평균 360 kWh로 지속적으로 양의 오차를 보이는 반면, WRF-OML 모델은 계절평균 -151 kWh로 봄·여름·가을은 음의 오차, 겨울은 매우 작은 양의 오차를 보이고 있다. RMSE는 WRF-OML 모델은 계절평균 1.39 MWh로써, WRF 모델의 계절평균 1.47 MWh보다 전 계절에 걸쳐 작은 오차를 보이고 있다.



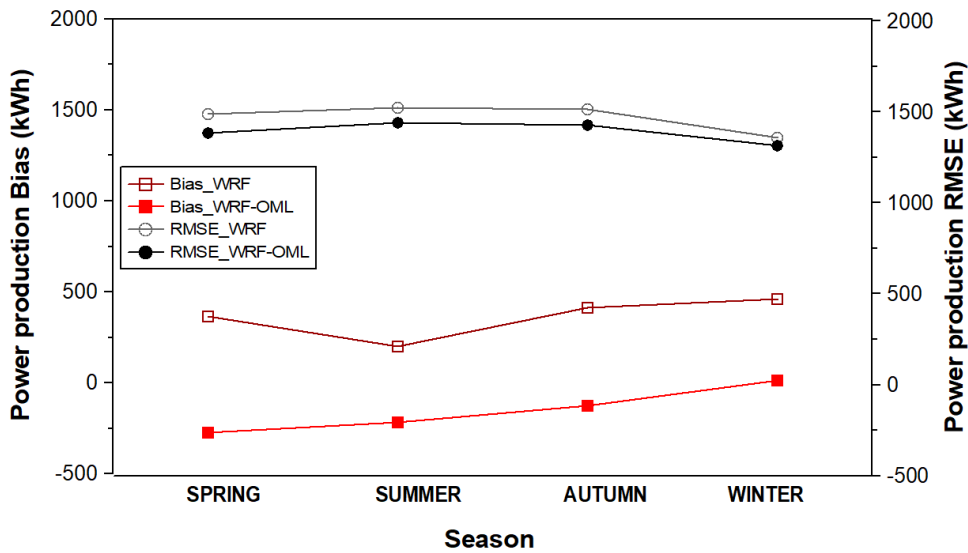


Fig. 4-28. Power production bias and RMSE with seasons at Daejeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November, and winter is December to February

Fig 4-29는 일중 시간변화에 따른 모델별 평균 오차에 대한 분석결과이다. Bias는 일관되게 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 더 좋은 성능을 보여주고 있다. 특히 오전 8시 - 12시 사이에는 WRF-OML 모델은 거의 오차가 zero인 수준인데 비해 WRF 모델은 오히려 과소모의 폭이 더 커지고 있다. 04시와 18시를 전후하여 WRF 모델이 일시적으로 실측값과 유사한 경우가 있으나 전반적으로 WRF-OML 모델보다 큰 오차를 보여주고 있다. WRF 모델은 일평균 약 360 kWWh의 전력량을 과소모의 하는 반면 WRF-OML 모델은 140 kWWh를 과대모의 하고 있어, 두 모델간 뚜렷한 차이를 보이고 있다. RMSE는 두 모델이 유사한 트렌드를 보여주고 있으며 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작은 오차율을 유지하고 있다. Bias와 마찬가지로, 7시 - 11시 사이에 두 모델 간 오차는 더욱 격차가 크게 나타나고 있으며 18시를 전후하여 WRF 모델이 일시적으로 실측값과 유사한 경우를 보이고 있기도 하다. 일 평균 WRF 모델은 1.45 MWh, WRF-OML 모델은 1.36 MWh의 RMSE를 보이고 있어, 전반적으로 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 높은 정확도를 보여주고 있다.

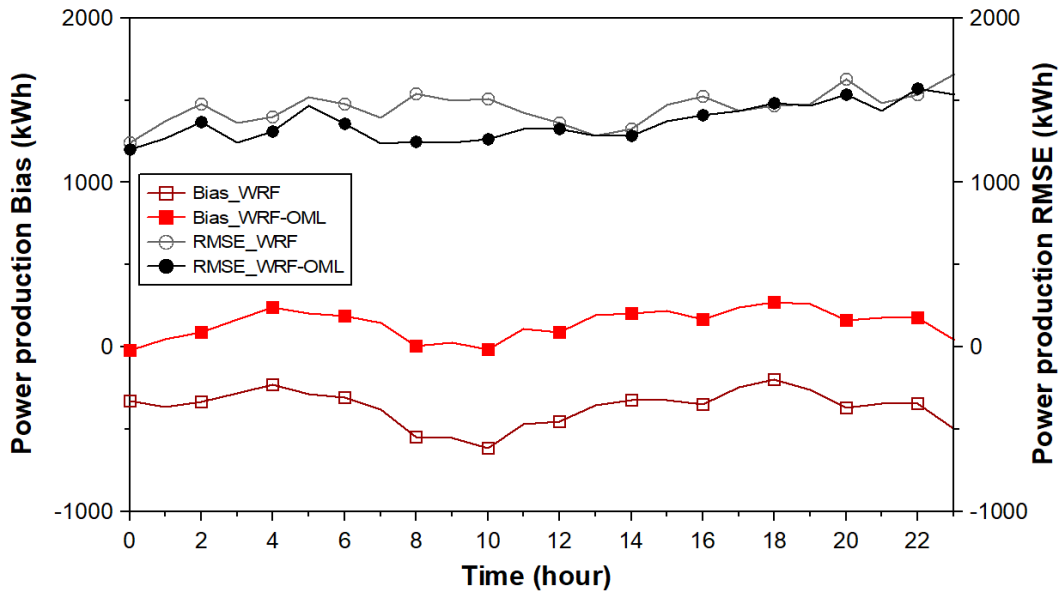


Fig. 4-29. Power production bias and RMSE with time at Daejeong offshore met-mast

Fig 4-30은 예측시간에 따른 풍력발전량의 평균 오차에 대한 분석결과이다. Bias는 두 모델이 비슷한 트렌드를 유지하고 있으나 WRF 모델은 평균오차 289 kWh로써 과대모의하는 반면, WRF-OML 모델은 평균오차가 -87 kW로써 매우 작게 과소모의하고 있다. WRF 모델의 Bias는 일관적으로 양의 값을 보이고 있음에 따라 풍속을 과다예측하는 경향과 동일하며, WRF-OML 모델의 Bias는 zero를 중심으로 작은 오차 값을 갖고 진동하는 형태를 보이고 있다. 예측시간에 따른 RMSE는 32시간부터 40시간 사이를 제외하고 두 모델이 비슷한 트렌드를 유지하고 있으며, WRF-OML 모델의 평균오차는 1.2 MWh로써, 1.4 MWh인 WRF 모델보다 작은 오차값을 보이고 있다. 일반적으로 물리적 방법을 활용한 수치모델기법에서, 예측시간이 길어질수록 예측정확도는 이론적으로 낮아질 수밖에 없으며, RMSE는 이러한 논리적인 결과를 비교적 잘 반영하고 있다.

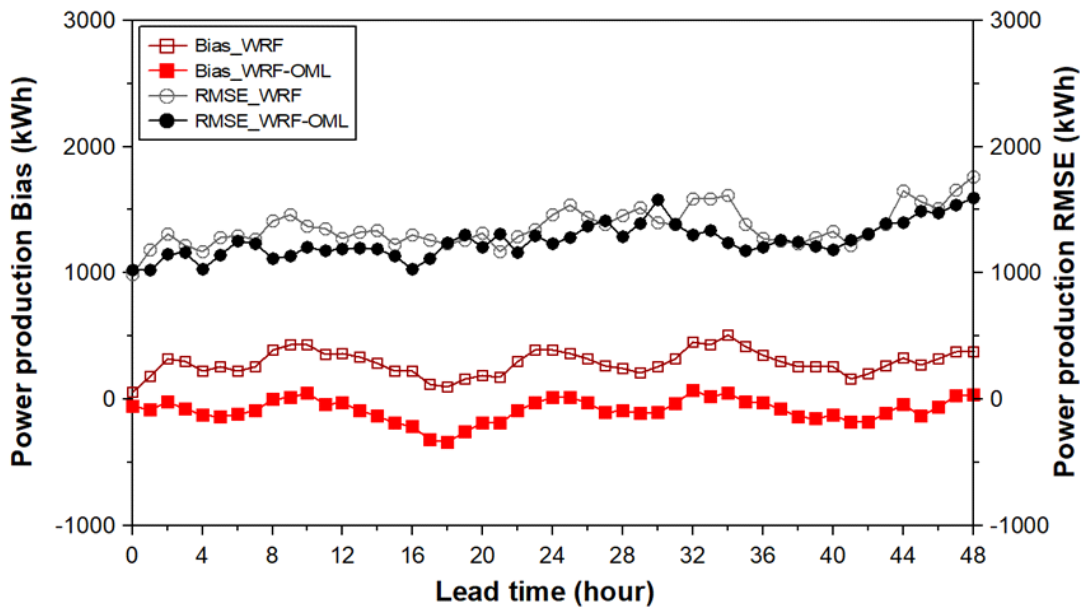


Fig. 4-30. Power production bias and RMSE with lead time at Daejeong offshore met-mast

Table 4-8은 두 모델에서 풍속값으로부터 도출된 발전량과 실측된 풍속값으로부터 도출된 발전량을 비교한 것이다. 월별 발전량을 비교하면, WRF-OML 모델은 실측값과 비교하여 매우 유사한 결과를 보여준다. 반면, WRF 모델의 결과는 6월을 제외하고 전체 기간동안 발전량을 과대모의하고 있다. 연간 발전량을 비교해 볼 때, WRF 모델은 15.3 %를 과대모의하고 있으며 WRF-OML 모델은 5.9 % 적게 모의하고 있다. 두 모델 모두 풍속 예측정확도가 높은 구간은 발전량 예측정확도가 높은 구간과 일치하여, 풍속 예측정확도와 발전량 예측정확도 간의 직접적인 관계를 보여주고 있다. 결과적으로, WRF-OML 모델에 의해 예측된 풍속 및 발전량은 WRF 모델에 의해 예측된 값보다 각각 8.6 % 및 9.4 % 더 실제 값에 근접한 것으로 분석되었다.

**Table 4-8.** Monthly wind power production from the met-mast observation data and from the prediction data of the models at Daejeong offshore met-mast

Period	Met-mast	WRF		WRF-OML	
	Power production [kWh]	Power production [kWh]	Ratio [%]	Power production [kWh]	Ratio [%]
Aug. 2015	774.29	1062.87	137.3	724.95	93.6
Sep. 2015	831.77	959.53	115.4	784.92	94.4
Oct. 2015	1,271.69	1,386.24	109.0	1,102.76	86.7
Nov. 2015	1,729.84	2,196.71	127.0	1,749.55	101.1
Dec. 2015	1,623.35	1,954.01	120.4	1,643.49	101.2
Jan. 2016	2,306.01	2,586.51	112.2	2,402.99	104.2
Feb. 2016	2,502.44	2,784.71	111.3	2,406.58	96.2
Mar. 2016	1,769.73	2,058.19	116.3	1,611.97	91.1
Apr. 2016	866.58	1,102.16	127.2	801.11	92.4
Ma. 2016	716.08	730.40	102.0	551.74	77.1
Jun. 2016	837.99	823.95	98.3	616.03	73.5
Jul. 2016	855.70	900.81	105.3	733.62	85.7
Total	16,085.47	18,546.09	115.3	15,129.71	94.1

## 4.2.2. 김녕사이트에서의 접합모델 예측성능

### (1) 풍속 예측 성능

Fig. 4-31은 두 모델의 예측 결과를 보여주는 scatter plot이다. 결정계수  $R^2$ 는 WRF 모델 및 WRF-OML 모델 각각 0.239, 0.496의 값을 나타내, WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 약 2배에 가까운 상관도를 보이고 있다. Table 4-9는 두 모델의 Bias 및 RMSE를 보여주고 있다. 예측값과 관측값의 Bias는 WRF 모델은 0.57 m/s 만큼 과소모의하고 있으며, WRF-OML 모델은 0.16 m/s 만큼 과대모의 하고 있다. WRF 모델은 약 2개월을 제외하고 전반적으로 음의 bias를 보이는 반면, WRF-OML 모델은 낮은 크기로 양의 bias와 음의 bias를 보였다.

RMSE는 WRF 모델은 4.41 m/s, WRF-OML 모델은 3.54 m/s로써 WRF-OML 모델이 0.87 m/s 낮은 오차를 보였다.

**Table 4-9.** Bias and RMSE of WRF model and WRF-OML model at Kimnyeong offshore met-mast

Variable	WRF model	WRF-OML model
Bias	-0.5737	0.1616
RMSE	4.4140	3.5440

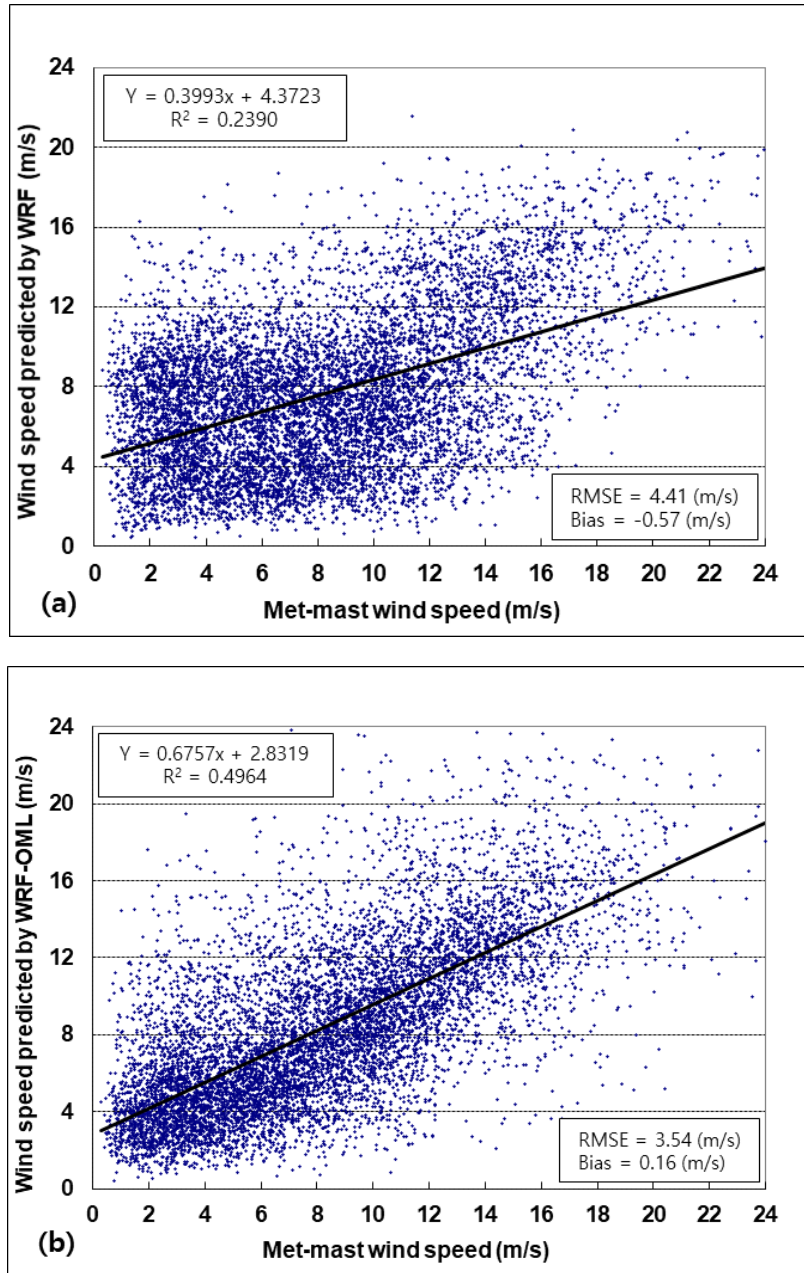


Fig. 4-31. Scatter plots of simulated results using (a) WRF and (b) WRF-OML (wind speed of 68m height) with observations at Kimnyeong offshore met-mast

Fig. 4-32는 관측데이터와 두 모델과의 월별 평균풍속을 비교하고 있다. WRF-OML 모델이 met-mast의 실측값과 비교적 유사한 트렌드를 유지하면서 met-mast 실측값 대비 월평균 +1.9 %의 오차를 보이는 반면, WRF 모델은 트렌드가 유사하지 않으면서 월평균 -7.05 %의 오차를 보여주고 있다. WRF 모델은 7월과 8월을 제외한 전 구간에서 실측값보다 낮은 풍속을 예측하고 있으며, WRF-OML 모델은 7월과 8월에 20 % 이상 높은 풍속을 예측하는 것을 제외하고 10 % 이내로 크거나 작은 풍속분포를 보이고 있다.

Fig. 4-33은 바람의 빈도를 보여주고 있다. 68 m 높이에서의 실측값은 북서풍 계열의 바람(WNW, NW, NNW)의 빈도가 40.9 %를 차지하였다. WRF 모델의 경우는 동일 계열의 바람의 빈도가 23.0 %를 차지하였으며, WRF-OML 모델의 경우 33.8 %를 차지함에 따라 WRF-OML 모델이 주풍향인 북서풍 계열을 더 가깝게 모의하고 있다. WRF 모델은 북서풍 계열의 바람(NNW, NW, WNW)은 덜 예측하는 대신 N, NNE, NE풍의 바람을 더 많이 예측하고 있어, 실측값 대비 주풍계열의 바람이 시계 방향으로 편향되는 경향이 뚜렷하다. 남서풍 계열의 바람(SSW, SW, WSW) 빈도는 실측값은 2.6 %인데 비해, WRF 모델은 17.9 %, WRF-OML 모델은 14.0 %의 빈도를 보이고 있으며, 남풍계열(SSW, S, SSE)은 13.0 %, 23.3 %, 15.9 %의 빈도를 보이고 있어 남서풍 및 남풍계열의 바람을 두 모델 모두 과다 모의하는 가운데 WRF 모델의 과다예측 경향이 더 크다.

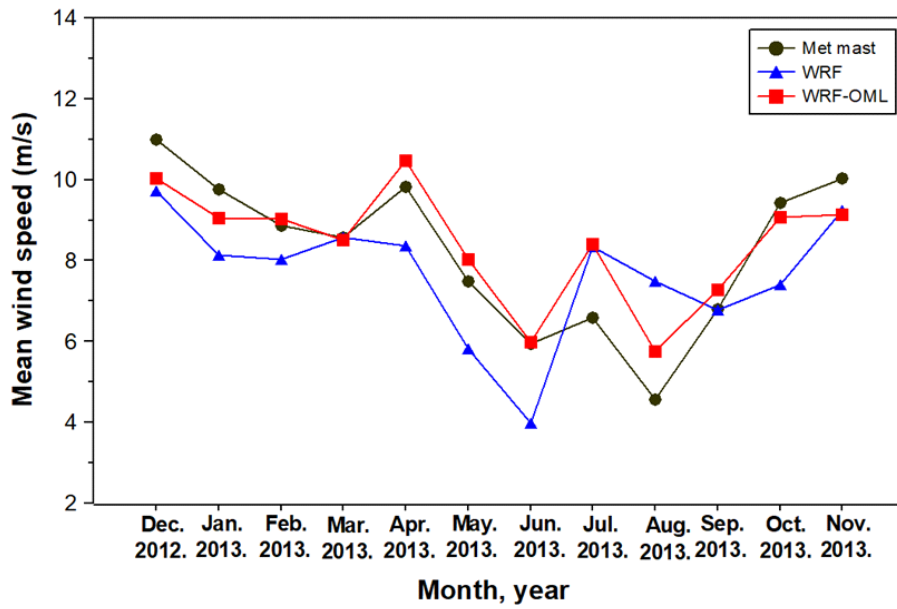


Fig. 4-32. Monthly mean wind speed of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast. Wind speeds at 68 m height

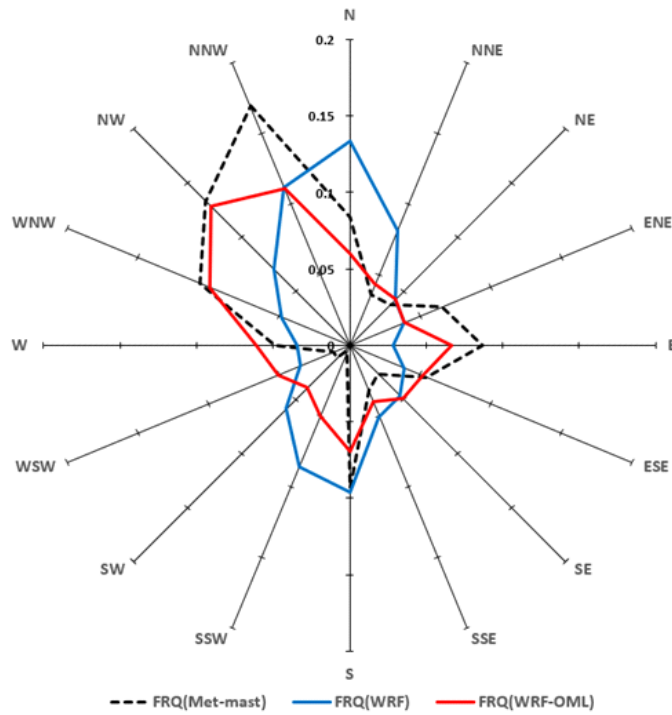


Fig. 4-33. Wind roses of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast. Wind speeds at 68 m height



**Table 4-10.** Frequency by wind direction of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast

Wind direction	Met-mast	WRF		WRF-OML	
	Frequency	Frequency	Ratio [%]	Frequency	Ratio [%]
N	0.083	0.133	159.3	0.059	71.2
NNE	0.036	0.081	225.7	0.043	120.3
NE	0.037	0.042	111.9	0.042	112.8
ENE	0.065	0.038	59.4	0.039	59.9
E	0.087	0.028	32.7	0.067	76.7
ESE	0.054	0.039	71.5	0.052	94.8
SE	0.026	0.047	177.5	0.049	187.9
SSE	0.032	0.051	157.0	0.040	122.5
S	0.093	0.096	103.2	0.069	74.1
SSW	0.004	0.086	2,217.6	0.050	1,297.1
SW	0.012	0.058	507.9	0.039	339.6
WSW	0.011	0.034	315.6	0.050	460.4
W	0.048	0.034	70.5	0.061	125.9
WNW	0.106	0.048	44.9	0.098	92.8
NW	0.133	0.070	53.0	0.128	96.2
NNW	0.169	0.112	65.8	0.111	65.6

Fig. 4-34는 관측데이터와 두 모델과의 평균풍속을 하루 24시간 시계열로 보여주고 있다. WRF-OML 모델은 6시까지는 실측값보다 0.2 m/s 내외로 낮은 풍속을 보이고 있으며, 이후 20시까지 0.6 m/s 내외로 높은 풍속을 보이다가 이후 0.1 m/s 이내로 낮게 예측을 하는 등의 차이를 보이지만 전체적으로 실측값과 유사한 경향을 보이고 있다. WRF 모델은 9시까지는 0.1 m/s 내외로 낮은 풍속을 보였으나, 이후 1 m/s 내외의 오차를 보이고 있다.

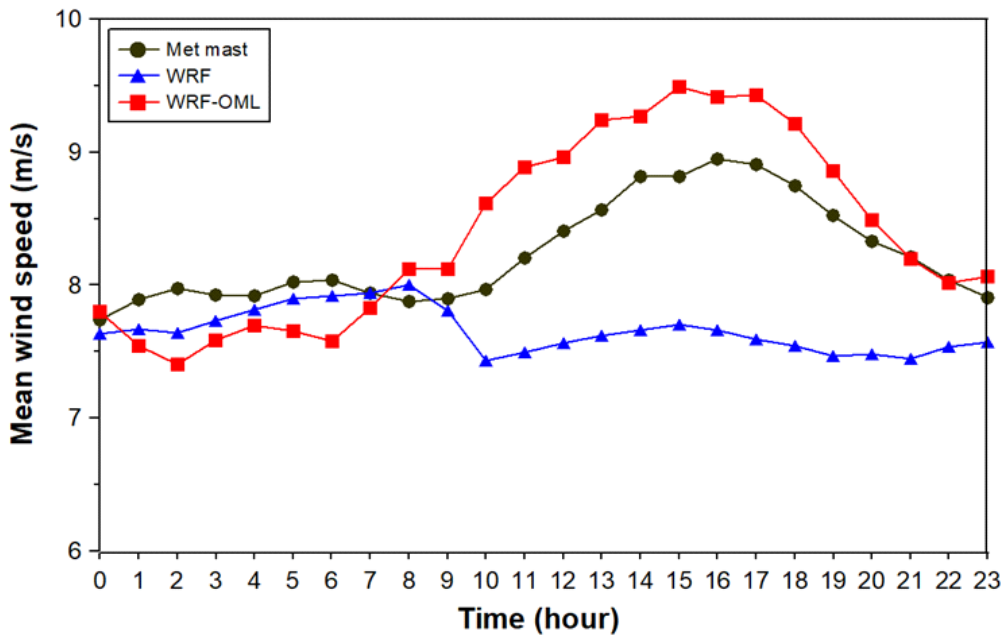


Fig. 4-34. Hourly mean wind speed of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast. Wind speeds at 68 m height

Fig. 4-35는 풍속별 Bias와 RMSE를 나타내고 있다. RMSE는 전 구간에서 WRF 모델보다 WRF-OML 모델이 평균 1.2 m/s 작은 오차를 보이고 있다. Bias는 두 모델 모두 10 m/s 까지 과대모의를 하고 있으며, WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 적은 양의 오차가 발생하고 있다. 10 m/s 이상의 풍속 구간에서는 두 모델 모두 과소모의를 하고 있으나 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 절대오차가 작다. 전체적으로 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 실측값에 1.6 m/s 가깝다. Bias 및 RMSE 모두 거의 전 풍속 구간에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

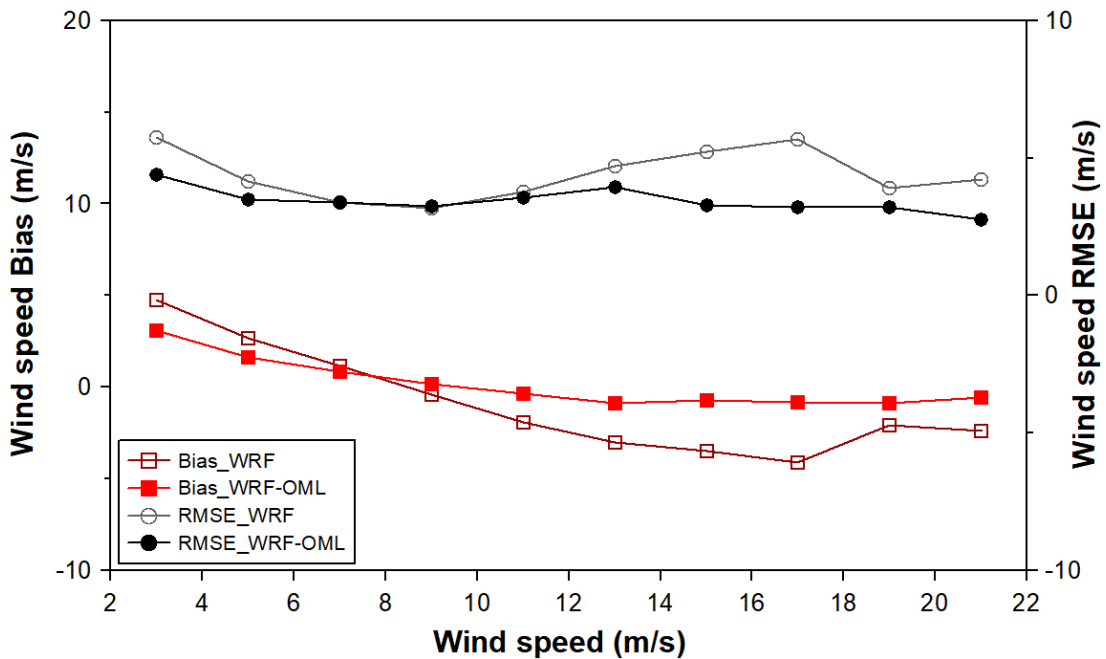


Fig. 4-35. Wind speed bias and RMSE with wind speed at Kimnyeong offshore met-mast

Fig. 4-36은 예측시간에 따른 Bias와 RMSE를 보여주고 있다. 24시간 예측까지 WRF 모델은 과소모의, WRF-OML 모델은 과대모의를 하고 있으며 그 폭은 거의 비슷하다. 24시간 이후 38시간까지 WRF-OML 모델은 매우 작은 양의 오차를 보이는 반면 WRF 모델은 음의 방향으로 오차의 폭이 커지고 있으며, 이는 40시간까지 이어지고 있다. 한편, RMSE는 모든 구간에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 0.6 m/s 정도의 차이로 일관적으로 좋은 성능을 보여주고 있다.

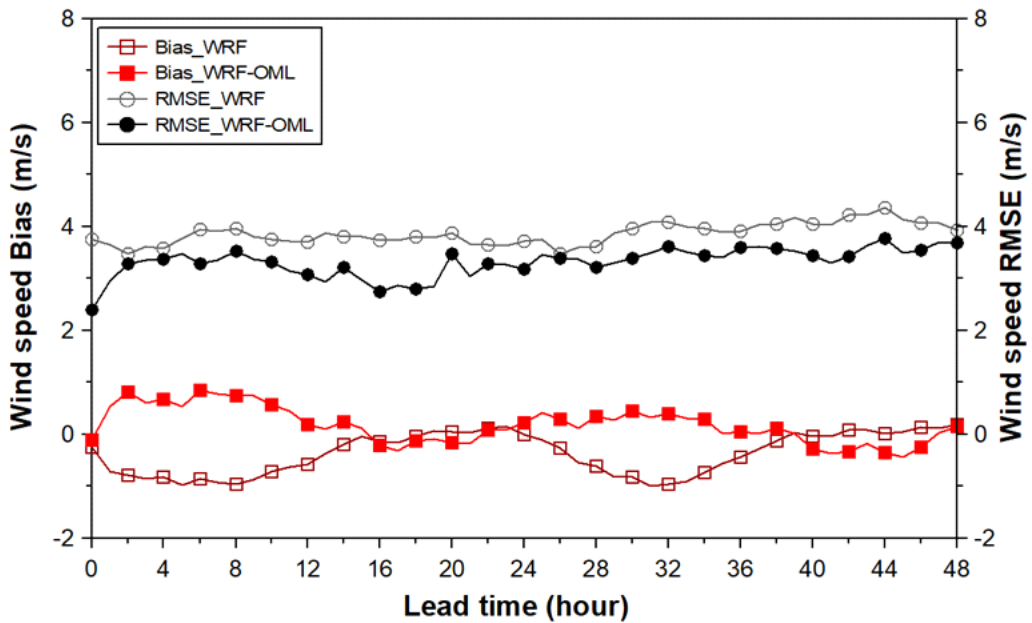


Fig. 4-36. Wind speed bias and RMSE with lead time at Kimnyeong offshore met-mast

계절별 Bias와 RMSE를 Fig. 4-37에 보여주고 있다. RMSE는 모든 계절에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 작은 양의 오차율을 보이고 있다. 한편, Bias는 봄철에는 WRF 모델은 과소모의, WRF-OML 모델은 과대모의 하고 있으나 절대값은 WRF-OML 모델이 작으며, 여름철에는 WRF 모델이 근소한 차이로 WRF-OML 보다 적게 과대모의하고 있다. 가을과 겨울은 두 모델 모두 과소모의 하고 있으나 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 0.7 m/s 내외로 적은 오차율을 보이고 있다.

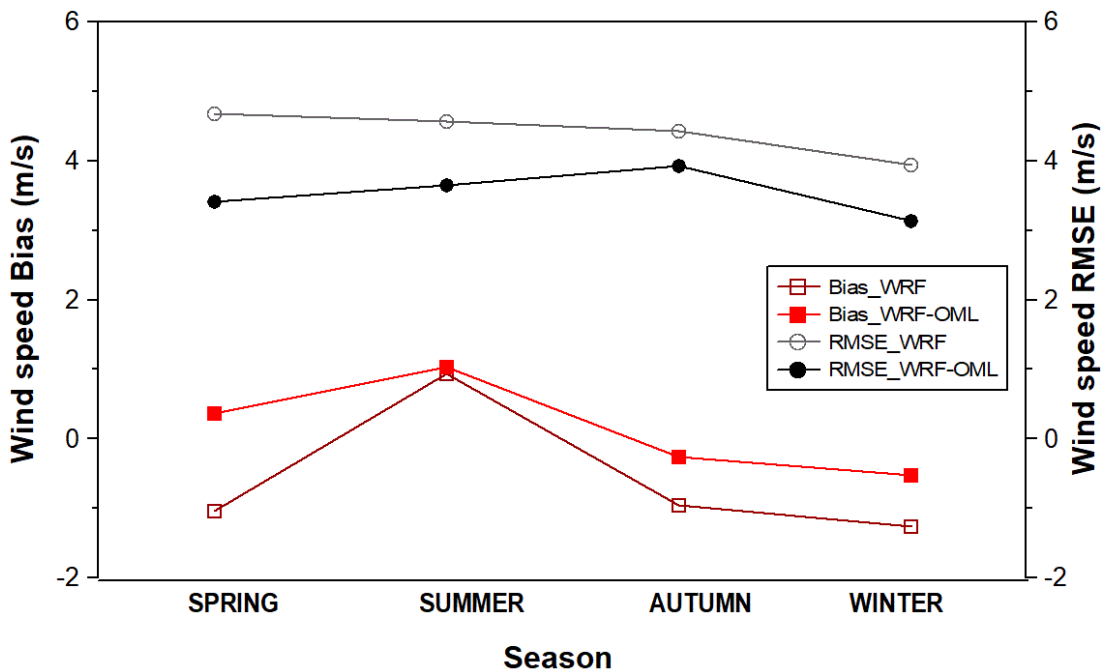


Fig. 4-37. Wind speed bias and RMSE with seasons at Kimnyeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November, and winter is December to February

**Table 4-11.** Seasonal Bias and RMSE of WRF model and WRF-OML model at Kimnyeong offshore met-mast

Season	Bias		RMSE	
	WRF	WRF-OML	WRF	WRF-OML
Spring	-1.0368	0.3692	4.6708	3.4048
Summer	0.9378	1.0288	4.5655	3.6535
Autumn	-0.9593	-0.2594	4.4312	3.9271
Winter	-1.2556	-0.5203	3.9438	3.1317

Table 4-12는 김녕해상기상탑에서 측정된 풍속과 두 종류의 모델로부터 예측된 풍속을 보여주고 있다. 김녕해상기상탑에서 측정된 평균풍속은 8.23 m/s이며, WRF 모델에 의한 평균풍속은 7.66 m/s로써 7.05 % 낮게 예측하는 반면, WRF-OML 모델로부터 예측된 평균풍속은 8.39 m/s로써, 1.95 % 높게 예측하고 있음을 알 수 있다.

**Table 4-12.** Monthly mean wind speed from the observation data and from the models at Kimnyeong offshore met-mast

Period	Met-mast	WRF		WRF-OML	
	Wind speed [m/s]	Wind speed [m/s]	Ratio [%]	Wind speed [m/s]	Ratio [%]
Dec. 2012	10.99	9.72	88.41	10.04	91.32
Jan. 2013	9.75	8.14	83.50	9.05	92.83
Feb. 2013	8.87	8.03	90.49	9.03	101.80
Mar. 2013	8.57	8.57	99.95	8.52	99.38
Apr. 2013	9.82	8.36	85.08	10.47	106.60
May 2013	7.48	5.82	77.90	8.03	107.31
Jun. 2013	5.94	3.99	67.15	5.99	100.80
Jul. 2013	6.59	8.34	126.57	8.42	127.75
Aug. 2013	4.57	7.49	163.97	5.75	125.81
Sep 2013	6.80	6.78	99.67	7.27	106.93
Oct. 2013	9.42	7.41	78.55	9.08	96.24
Nov. 2013	10.03	9.23	92.05	9.14	91.11
Total	8.23	7.66	92.95	8.39	101.95

## (2) 발전량 예측 성능

Fig. 4-38은 기상탑과 두 모델의 와이블 분포함수 및 이 연구에서 사용된 A사의 5.56 MW 풍력발전기의 Power curve를 보여주고 있으며, 여기서 응용되는 풍력발전기는 대정해상기상탑에서 사용된 발전기와 동일한 모델로 선정했다. Met-mast의 연평균풍속은 8.23 m/s이지만, 3 - 6 m/s 풍속구간에 밀도가 가장 높게 나타나고 있으며, WRF 모델과 WRF-OML 모델은 각각 4 - 7 m/s, 5 - 8 m/s 풍속구간에서 가장 높은 밀도를 보이고 있다.

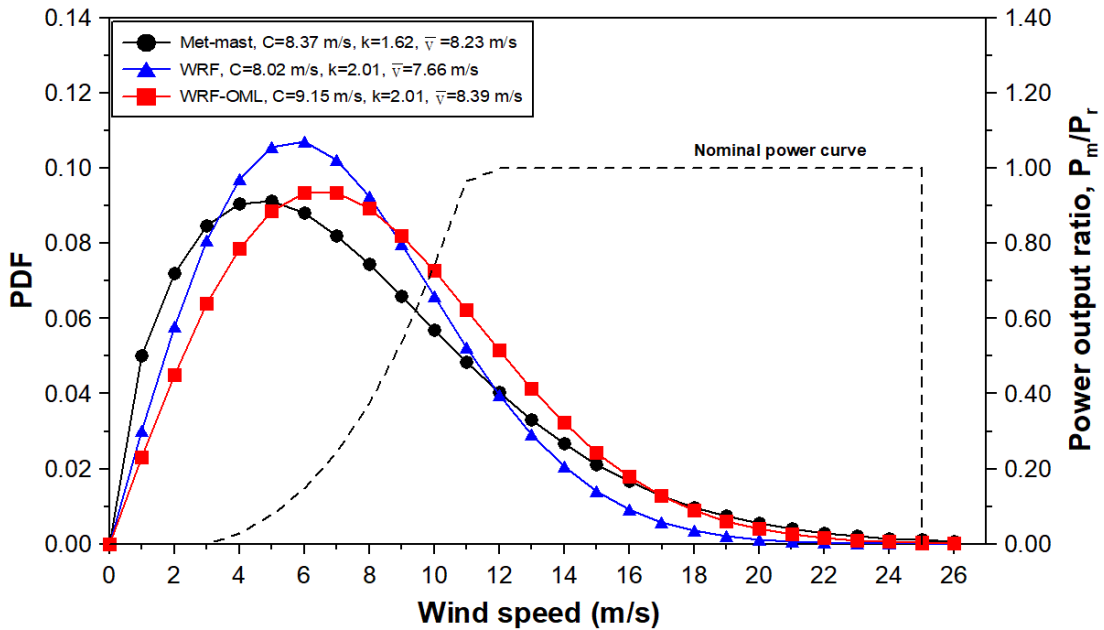


Fig. 4-38. Weibull Distribution of observations and predictions from WRF and WRF-OML, and power curve of the wind turbine at Kimnyeong offshore met-mast.  $\bar{v}$  is mean wind speed,  $P_m$  is measured power and  $P_r$  means rated power



Fig. 4-39는 1년간 김녕해상에 설치된 met-mast에서 실측한 풍속값으로부터 산출된 발전량에 대한 에너지밀도 및 두 개의 예측모델이 예측한 풍속값으로부터 산출된 발전량에 대한 에너지밀도를 보여주고 있다. Met-mast에서 가장 높은 바람빈도를 보이는 NNW풍은 에너지밀도에도 가장 높다. 특히 바람빈도는 40.9 %지만, 에너지밀도는 54.4 %를 보이고 있으며, 두 모델에서도 바람빈도에 비해 10 % 이상 높은 에너지밀도를 보이고 있다. 그 외의 풍계에서는 바람빈도에 비해 낮은 에너지밀도를 보이고 있다. 남풍계열의 바람과 남서풍계열의 바람을 두 모델이 높게 모의하고 있는 경향이 있으나, WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 실측값에 가까운 빈도를 보인다. 한편, 북북서풍에 대해서는 두 모델 모두 작은 빈도를 보이며, 북풍에 대해서는 WRF 모델은 큰 빈도를, WRF-OML 모델은 작은 빈도를 보인다.

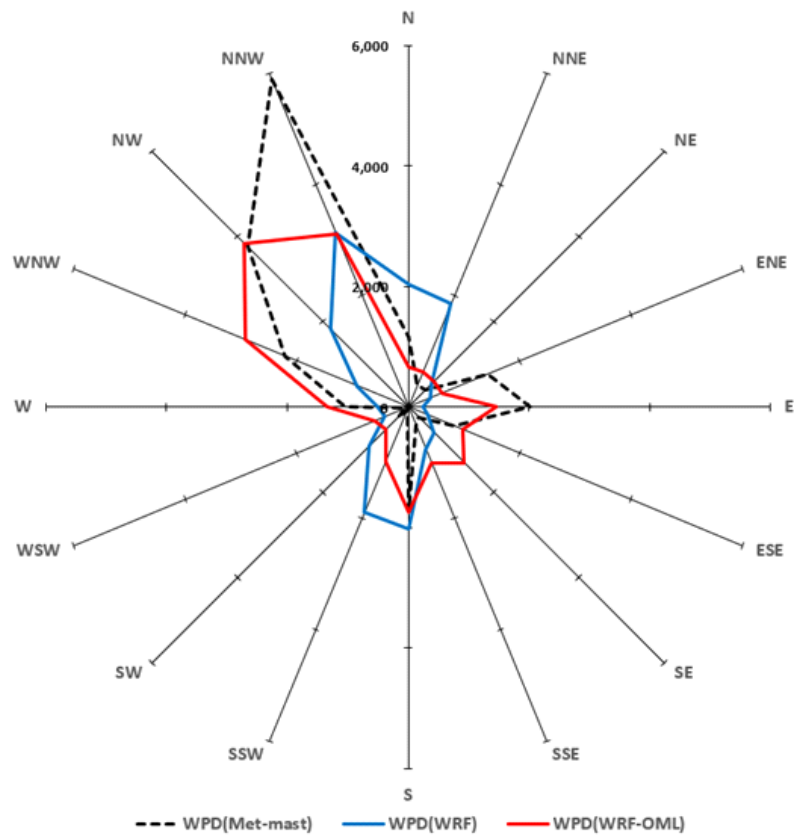


Fig. 4-39. Energy roses of observations and predictions from two models at Kimnyeong offshore met-mast

월별 발전량은 김녕 해상기상탑에서 산출된 모델값에 A사 5.56 MW 풍력발전기의 Power curve를 적용하여 두 모델로부터의 연간발전량을 추정하였으며, 이를 김녕 해상기상탑 자료로부터 추정한 연간발전량과 비교 분석하였다(Fig. 4-40). 이 풍력발전기는 대정에서와 동일한 기종인 풍력발전기이다. 월별 발전량을 비교하면, WRF 모델 및 WRF-OML 모델 모두 실측값과 비교하여 7월과 8월에 실측값 대비 높게 나타났으며, WRF-OML 모델은 실측값 대비 1.3 - 1.8배, WRF 모델은 실측값 대비 1.4 - 2.7배의 발전량을 보였다. 한편, WRF 모델은 6월에는 실측값 대비 60.0 %로 매우 적게 발전량을 예측하였으며, 이는 풍속을 예측한 결과 (-67.1 %)에서와 유사한 경향을 보인다. 전체기간 동안 WRF 모델은 -10.9 %, WRF-OML 모델은 -0.2 %의 오차를 보였다.

Fig 4-41은 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.

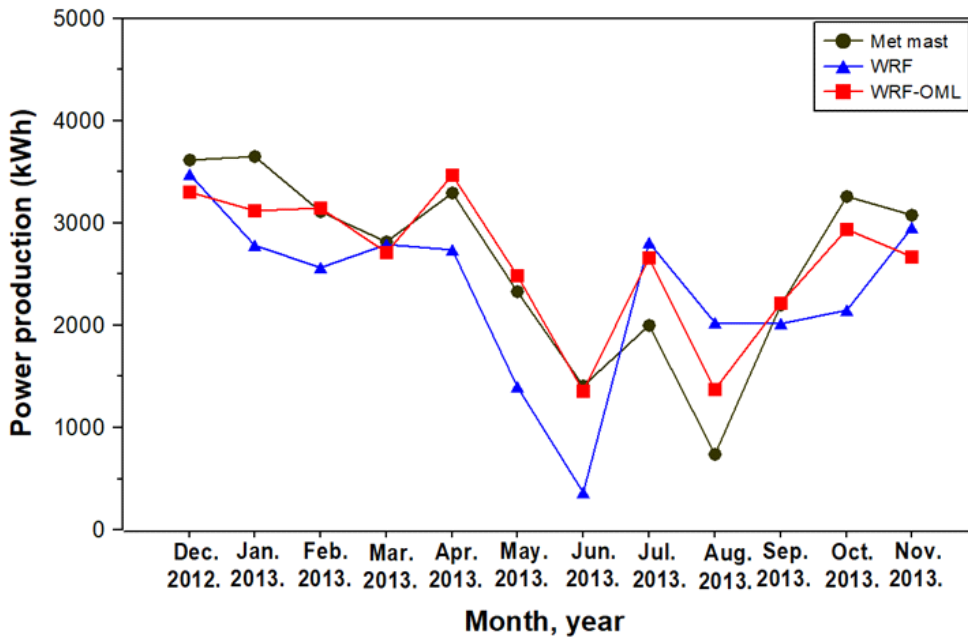


Fig. 4-40. Monthly power production at Kimnyeong offshore met-mast

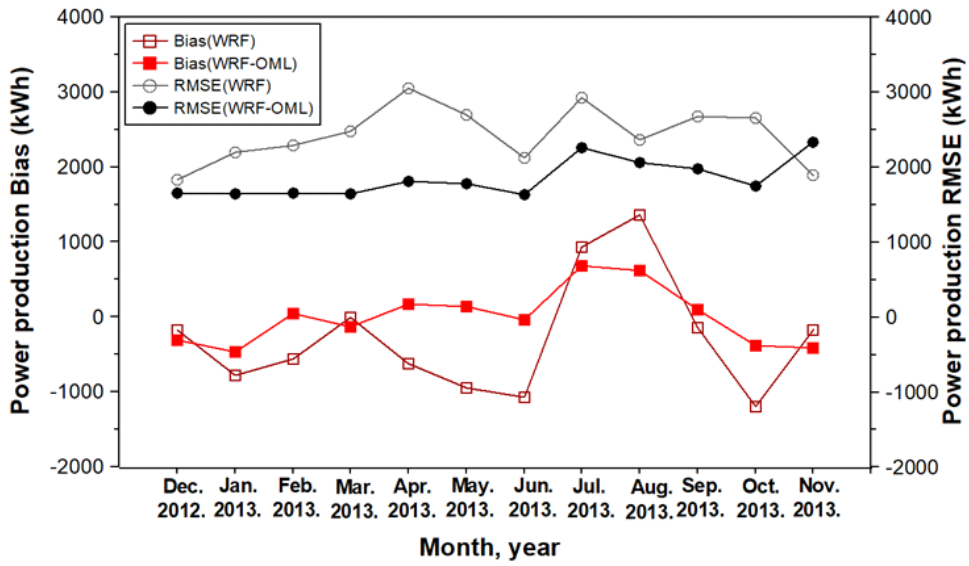


Fig. 4-41. Power production bias and RMSE at Kimnyeong offshore met-mast

Fig. 4-42는 두 모델과 실측값과의 계절별 발전량 오차를 나타낸다. WRF-OML의 RMSE는 계절 평균 1.8 MWh의 오차를 보이는 반면, WRF 모델은 계절평균 2.4 MWh의 오차를 보이고 있다. WRF-OML의 bias는 계절 평균 31 kWh 과소모의를 하는 반면, WRF 모델은 계절평균 243 kWh 과소모의하고 있다. RMSE 및 Bias 모두 WRF-OML 모델의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

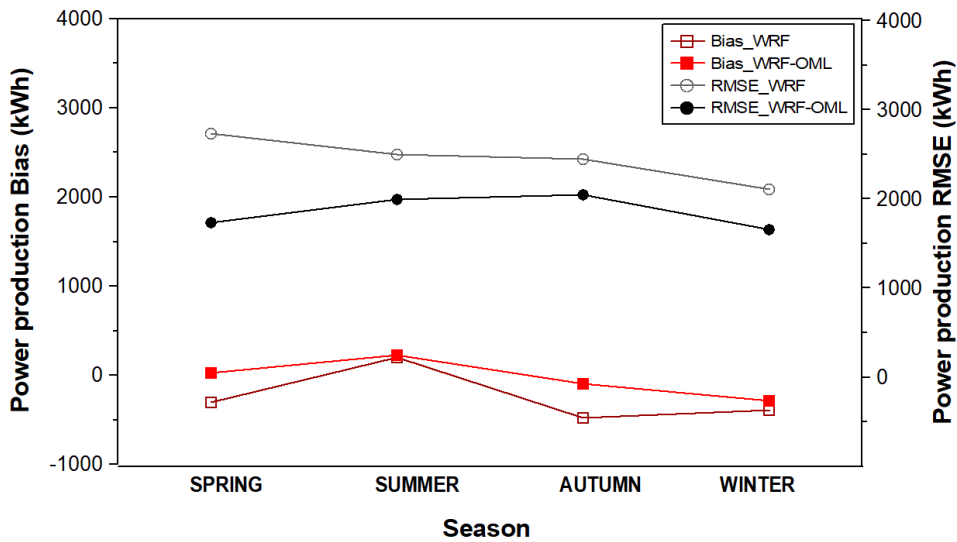


Fig. 4-42. Power production bias and RMSE with seasons at Kimnyeong offshore met-mast. Spring is March to May, summer is June to August, autumn is September to November and winter is December to February

Fig 4-43은 예측시간에 따른 발전량의 평균 오차에 대한 분석결과이다. WRF 모델은 지속적으로 음의 bias를 보이고 있으며, 시간당 평균 267.5 kWh 과소모의하고 있다. WRF-OML 모델은 양의 bias와 음의 bias를 반복하고 있으며, 시간당 평균 28.5 kWh 과소모의 하고 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.

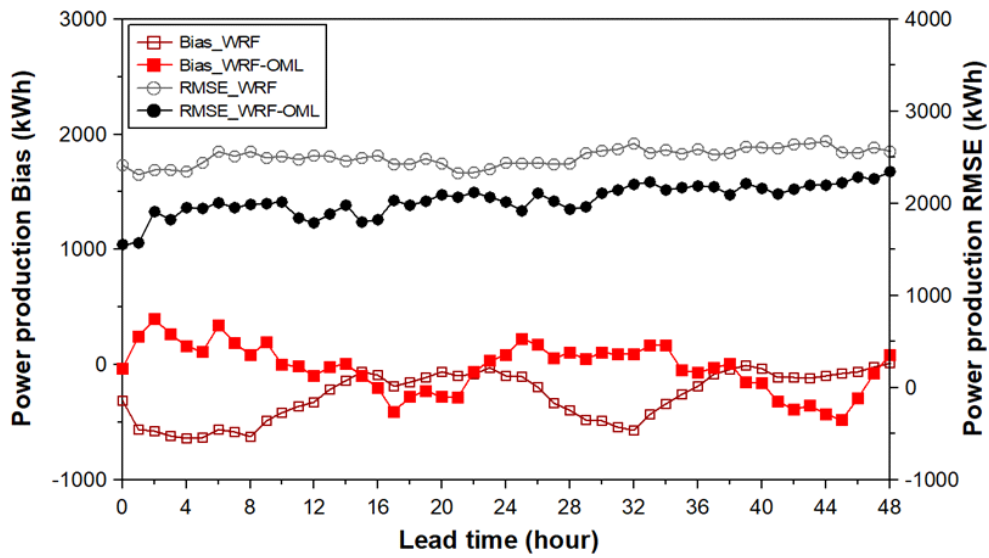


Fig. 4-43. Power production bias and RMSE with lead time at Kimnyeong offshore met-mast

Table 4-13은 두 모델에서 풍속값으로부터 도출된 발전량과 실측된 풍속값으로부터 도출된 발전량을 비교한 것이다. 기상탑에서 실측된 평균풍속에 의한 연간 발전량은 31.51 GWh이며, WRF 모델 및 WRF-OML 모델로부터 예측된 평균풍속에 의해 계산된 연간 발전량은 각각 28.07 GWh, 31.46 GWh였다. 연간 발전량을 비교해 볼 때, WRF 모델은 10.9 % 과소 모의하고 있는 반면, WRF-OML 모델은 0.2 % 과소모의하고 있음에 따라, WRF-OML 모델이 더 높은 예측성능을 보이고 있다.

**Table 4-13.** Monthly wind power production from the met-mast observation data and from the prediction data of the models at Kimnyeong offshore met-mast

Period	Met-mast	WRF		WRF-OML	
	Power production [kWh]	Power production [kWh]	Ratio [%]	Power production [kWh]	Ratio [%]
Dec. 2012	3,617.79	3,474.39	96.0	3,301.57	91.3
Jan. 2013	3,649.66	2,784.56	76.3	3,121.62	85.5
Feb. 2013	3,116.60	2,565.16	82.3	3,149.52	101.1
Mar. 2013	2,815.85	2,791.24	99.1	2,713.12	96.4
Apr. 2013	3,299.40	2,741.22	83.1	3,470.19	105.2
May. 2013	2,331.62	1,400.15	60.1	2,486.28	106.6
Jun. 2013	1,411.54	364.30	25.8	1,359.99	96.4
Jul. 2013	1,997.36	2,805.19	140.4	2,656.96	133.0
Aug. 2013	738.66	2,025.02	274.2	1,369.81	185.4
Sep. 2013	2,198.25	2,016.34	91.7	2,220.65	101.0
Oct. 2013	3,256.11	2,144.32	65.9	2,941.30	90.3
Nov. 2013	3,076.86	2,957.04	96.1	2,667.51	86.7
Total	31,509.71	28,068.93	89.1	31,458.52	99.8

## 제5장. 요약 및 결론

본 논문에서는 해상풍 및 해상에서의 풍력발전량 예측을 위해 대기모델(WRF) 및 대기-해양모델(WRF-OML)을 비교하였다. WRF-OML 모델은 대기모델과 해양혼합층 모델(OML)을 접합하고 여기에 HYCOM 해양 3차원 수온 자료를 초기장으로 입력하였다. 논문의 목적이 두 모델 간 풍력 및 발전량 예측결과를 검증하는 데 있으므로, 정확도를 높일 수 있는 자료동화 과정은 수행하지 않았으며, 결과적으로 발전량 예측의 관점에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 더 높은 정확도를 보였다.

해상풍 및 발전량 예측데이터 검증을 위해 대정 해상기상탑 및 김녕 해상기상탑의 관측 자료를 이용하였으며, 대정은 해상기상탑 94 m 높이, 김녕은 해상기상탑 68 m 높이에서의 두 모델의 예측데이터를 관측데이터와 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 대정해상에서의 풍속 예측성능을 비교한 결과, WRF 모델과 WRF-OML 모델의 bias는 각각 1.09 m/s, -0.07 m/s를 보이고, RMSE는 WRF 모델과 WRF-OML 모델이 각각 평균 2.88 m/s, 2.45 m/s를 보이고 있어, WRF 모델보다 WRF-OML 모델이 통계적으로 더 좋은 예측성능을 보여주고 있다. 한편, 김녕해상에서의 풍속 예측성능을 비교한 결과, WRF 모델과 WRF-OML 모델의 bias는 각각 -0.57 m/s, 0.16 m/s를 나타내고 있으며, RMSE는 WRF 모델과 WRF-OML 모델 각각 4.41 m/s, 3.54 m/s의 값을 보이고 있다. 김녕해상에서도 WRF 모델보다 WRF-OML 모델이 통계적으로 예측성능이 더 좋은 결과를 보여주고 있다.

대정해상에서는 WRF 모델이 과대모의하는 반면, WRF-OML 모델은 과소모의를 하고 있으며, 김녕해상에서는 이와 반대 경향을 보이고 있다. 한편, 대정해상과 김녕해상에서 두 모델의 RMSE 차이는 각각 0.43 m/s, 0.87 m/s의 차이로써, WRF-OML 모델의 오차가 적게 나타나고 있음에 따라 풍속 예측성능 평가에 있어서 대기-해양 접합모델의 정확도가 높음을 보여주고 있다.

2) 대정과 김녕 해상 모두 WRF 모델과 WRF-OML 모델은 저풍속(4 m/s 이하) 구간에서 과대모의하고 있으며, bias 절대값 기준으로 WRF-OML 모델이 더 작은 오차를 보인다. RMSE는 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 전 구간에서 작은 오차를 보이고 있으며, 대정해상과 김녕해상 각각 WRF-OML모델이 WRF 모델에 비해 월평균 0.58 m/s, 1.28 m/s 더 작은 오차를 보이고 있다.

3) 예측시간에 따른 풍속변화는 수치모델의 특성상, 예측시간이 길어질수록 오차는 더 커지는 경향을 보이는데, 두 모델 모두 이를 만족하고 있다. 대정해상과 김녕해상 각각에서 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 0.49 m/s, 0.55 m/s 더 작은 RMSE를 보이고 있다.

4) 대정해상과 김녕해상 모두 겨울철인 12월 또는 1월에 가장 풍속이 높고 여름철인 7월에 풍속이 가장 낮게 나타나고 있다. 모델의 경향도 유사하게 나타나고 있으나, WRF-OML 모델이 WRF 모델에 비해 월평균 RMSE는 대정해상과 김녕해상 각각 0.42 m/s, 0.87 m/s 더 작아, 집합모델의 성능이 우수함을 보여주고 있다.

5) 발전량 예측성능을 예측시간별로 비교한 결과, 대정해상에서의 WRF-OML모델과 WRF모델의 월평균오차는 Bias 201 kWh, RMSE 107 kWh의 차이로써, WRF-OML이 더 좋은 성능을 보이고 있다. 김녕해상에서의 두 모델 간 월평균오차는 Bias 239 kWh, RMSE 463 kWh의 차이로, 대정해상과 마찬가지로 WRF-OML 모델이 WRF 모델에 비해 좋은 성능을 보이고 있다.

6) 대정 해상기상탑을 대상으로 모델 검증 결과, WRF 모델은 기상탑 측정값에 비해 풍속 및 연간발전량을 각각 13.2 %, 15.3 % 높게 모의하고 있는 반면, WRF-OML 모델은 기상탑 측정값 대비 풍속 및 연간발전량을 각각 1.4 %, 5.9 % 낮게 모의하고 있다. 결과적으로 WRF-OML 모델이 WRF 모델 대비 풍속 및 발전량 예측에 있어 각각 11.8 %, 9.4 % 더 정확함을 보이고 있다. 김녕 해상 기상탑의 경우, WRF 모델은 실측값에 비해 풍속 및 연간발전량을 각각 7.0 %, 10.9 % 낮게 모의하고 있는 반면, WRF-OML 모델은 풍속 및 연간발전량을 각각 2.0 % 과대모



의 및 0.2 % 과소모의 하고 있다. WRF-OML 모델이 WRF 모델 대비 풍속 및 발전량 예측에 있어 각각 5.0 %, 10.7 % 더 정확한 결과를 보이고 있다.

7) OML 모델의 활용목적은 해양혼합층 깊이(MLD) 초기장 및 MLD에서의 수온감률, 해수면에서의 바람응력에 기초하여 해수면온도의 일변화를 계산하고, 이를 WRF 모델에 반영함으로써 풍속의 예측정확도를 높이고, 결국 해상 풍력발전량의 예측정확도를 높이기 위함이다. 예측 선행시간에 따른 풍속과 발전량 예측결과, 예측 초기에 WRF-OML 모델이 WRF 모델보다 통계적으로 우수한 성능을 보이는 이유는 이와 같은 해양조건이 반영된 결과로 분석된다.

8) 해상풍력단지 건설을 위한 후보지 선정 시, 기본적으로 met-mast를 설치하고 1년 이상의 실측을 거쳐 풍황이 우수한 곳을 선정하게 되는데, 이에 따르는 경제적 비용과 시공간적 비용은 매우 크다. 본 논문에서 제안한 WRF-OML 모델을 활용하여 해상풍력자원을 사전에 예측한다면, 별도의 met-mast 설치 없이, 또는 최소한의 설치만으로도 해상풍력단지 건설을 위한 최적의 후보지 선정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

많은 연구결과에서 기존의 WRF 모델의 기상예측 정확도를 우수하게 평가하고 있으며, 이는 풍력발전단지를 운영하는 현장에서 증명되고 있다. 본 논문에서는 해상에서의 보다 더 정확한 풍력자원 예측을 위해, 해수의 혼합과정 및 이로 인한 해수면온도의 변화를 고려한 대기-해양혼합층 접합모델의 활용이 필요함을 연구결과로 보여주고 있다. 단, 본 과제는 제주도에서의 특정 포인트를 대상으로 실험을 한 결과이며, 각 사이트마다 고유한 특성이 있으므로 이를 반영한 해상풍력발전단지의 설계가 필요할 것으로 사료된다.

## References

- [1] C. Chancham, J. Waewsak, Y. Gagnon, Y, Offshore wind resource assessment and wind power plant optimization in the Gulf of Thailand, *Energy*. 2017, 139, 706-731, (2017)
- [2] 산업통상자원부, 한국에너지공단, 2018 신재생에너지 백서, (2019).
- [3] 제주특별자치도, “에너지자립도 실행을 위한 신재생에너지 통합보완 CFI 2030 계획” , (2019)
- [4] <http://kredc.kier.re.kr/kierflex/>
- [5] 이동일 등, 풍력자원지도 개발 연구보고서, 기상청, (2007).
- [6] Global wind report anual market update, GWEC, p. 63, (2016).
- [7] Y. H. Wang, R. K. Walter, C. White, H. Farr, H. B. I. Ruttenberg, Assessment of surface wind datasets for estimating offshore wind energy along the Central California Coast, *Renew. Energ.* 2019, 133, 343-353, (2019)
- [8] D. Carvalho, A. Rocha, M. Gó mez-Gesteira, C. Santos, A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy, *Environmen. Model. Softw.* 2012, 33, 23-34, (2012)
- [9] D. Cavalho, A. Rocha, M. G. Gesteira, C. S. Santos, Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore area in the Iberian Peninsula, *Appl. Energ.* 2014, 135, 234-246, (2014)
- [10] C. Mattar, D. Borvarian, Offshore wind powers simulation by using WRF in the central coast of Chile, *Renew. Energ.* 2016, 94, 22-3, (2016)
- [11] Z. Di, J. Ao, Q. Duan, J. Wang, W. Gong, C. Shen, Y. Gan, Z. Liu, Improving WRF model turbine-height wind-speed forecasting using a surrogate-based automatic optimization method, *Atmos. Res.* 226, 1-16, (2019).

- [12] 이화운, 김민정, 이순환, 김동혁, 김현구, 공간해상도에 따른 풍력자원 지도의 예측정확도 특성 분석, 한국대기환경학회, 추계학술대회 논문집, (2009).
- [13] Victor S Indasi, Lynch M, McGann B, Sutton J, Wind resource assessment using WRF model in complex terrain, *International Journal of Latest Engineering Research and Applications*, 02 (3) (2017) 91-98.
- [14] 이영미, 김경보, 고경남, 허종철, 풍력발전량 예측시스템 개발을 위한 기상예보시스템 구축, 한국풍력에너지학회, 춘계학술발표회, (2008).
- [15] R.A. Pielke, *Mesoscale Meteorological Modeling*, 2nd ed., International Geophysics Series vol. 78, Academic Press, San Diego, (2002).
- [16] A. R. Henderson, C. Morgan, B. Smith, H. C. Sorensen, R. J. Barthelmie, B. Boesmans, Offshore wind energy in Europe - A review of the state-of-the-art, *Wind Energy* 2003;6(No 1):35-52, (2003).
- [17] M. J. Devorak, C. L. Archer, M. Z. Jacobson, California offshore wind energy potential, *Renewable Energy* 2010;35(No 6):1244-54, (2010).
- [18] K. R. Rosen, B. R. Van, K. Garbesi, Wind energy potential of coastal Eritrea: an analysis of sparse wind data, *Solar Energy* 1999;66(No 3):201-13, (1999).
- [19] L. JunShin, O. Ki-Young, K. Ji-Young, K. Keum-Seok, Preliminary evaluation of appropriate sites for offshore wind farm design, KEPCO Research Institute, TR.KO2.P2009.06248-9, (2009).
- [20] P. A. Jimez, J. F. Gonzalez-Rouco, J. P. Montavez, E. Garcia-Bustamante, J. Navarro, J. Dudhia, Analysis of the long-term surface wind variability over complex terrain using a high spatial resolution WRF simulation, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1326-z, (2012).
- [21] D. H. Kim, H. W. Lee, S. H. Lee, Evaluation of wind resources using numerically optimized data in the Southwestern Korean Peninsula. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci*, 46, 393-403, (2010).

- [22] P. Rae Seol, C. Yang-Ki, C. Byoung-Ju, S. Chul Han, Implications of sea surface temperature deviations in the prediction of wind and precipitable water over the Yellow Sea, *J. Geophys. Res.*, 116, D17106, (2011).
- [23] L. R. Schade, K. A. Emanuel, The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere-ocean model, *J. Atmos. Sci.* 1999, 56, 642-651, (1999).
- [24] Y. Kawai, K. Otsuka, H. Kawamura, Study on diurnal sea surface warming and a local atmospheric circulation over Mutsu Bay, *J. Meteor. Soc. Japan* 2006, 84, 725-744, (2006).
- [25] A. Dai, K. E. Trenberth, The diurnal cycle and its depiction in the community climate system model, *J. Clim.* 2003, 17, 930-951, (2003).
- [26] N. Yign, L. Eunjeong, K. Dong-Hoon, H. Song-You, K. Mee-Ja, O. Mi-Lim, Prediction of the diurnal warming of sea surface temperature using an atmosphere-ocean mixed layer coupled model, *J. Geophys. Res.* 2011, 116, C11023, doi:10.1029/2011JC006970, (2011).
- [27] S. W. Chang, R. A. Anthes, The mutual response of the tropical cyclone and the ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 1979, 9, 128-135, (1979).
- [28] L. Chia-Ying, S. C. Shuyi, Symmetric and asymmetric structures of hurricane boundary layer in coupled atmosphere-wave-ocean models and observations, *J. Atmos. Sci.* 2012, 69, 3576-3594, (2012)
- [29] K. Porter, J. Rogers, Central wind power forecasting programs in North America by regional transmission organizations and electric utilities, Subcontract Report NREL/SR-550-46763, (2009).
- [30] K. Porter, J. Rogers, Status of centralized wind power forecasting in North America, NREL/SR-550-47853, (2010).

- [31] I. Marti, G. Kariniotaki, P. Pinson, I. Sanchez, T. S. Nielsen, H. Madsen, G. Giebel, J. Usaola, A. M. Palomares, R. Brownsword, J. Tambke, U. Focken, M. Lange, G. Sideratos, G. Descombes, Evaluation of advanced wind power forecasting models – The results of the ANEMOS Project, In Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Athens, Greece, 27/2-2/3, (2006).
- [32] T. Kumano, Accuracy improvement in one-day ahead wind power output prediction by computational fluid dynamics calculation, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, (2012).
- [33] 이창훈, 조지혜, 윤정호, 화석연료 대체에너지원의 환경·경제성 평가(II): 재생에너지 발전원을 중심으로, 한국환경정책평가연구원, (2014).
- [34] 고동휘, 정신태, 강금석, 한국 서해안의 해상풍력발전 부존량 평가, 한국해양해양공학회 논문집, 제27권 제4호, pp 266-273, (2015).
- [35] W. Young-Min, Short-term wind farm power forecasting using multivariate analysis to improve wind power efficiency, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 29(7), (2015).
- [36] H. Cheol-Un, L. YongSeob, L. Eun-Jeong, Spatial distribution of wind map over Korea using meteorological resources, Atmosphere, 20(2), 63-71, (2010).
- [37] H. Mi-Yeong, J. Cheng Hao, Y. Unil, K. Kwang-Deuk, R. Keun Ho, Building of prediction model of wind power generation using power ramp rate, Journal of the Korea Society of Computer and Informataion, Vo. 17, No. 1, (2012).
- [38] I. Waldl, G. Kariniotakis, The ANEMOS wind power forecasting platform, Im Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Athens, Greece, 27/2-2/3 (2006).
- [39] M. Henrik, A. N. Henrik, The State-of-the-art of wind power forecasting in europe, IAWIND symposium, Iowa, (2010).

- [40] J. Y. Byon, Y. J. Choi, B. K. Seo, Characteristics of a wind map over the Korean peninsula based on mesoscale model WRF, Atmosphere(In Korean with English abstract), 20, 195-210, (2010).
- [41] R. Goo-Hyun, K. Ki-Su, K. Jae-Chul, S. Kyung-Bin, A study on estimation of wind power generation using weather data in Jeju island, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 12, (2009).
- [42] S. Y. Her, B. S. Kim, J. C. Huh, Verification of the validity of WRF model for wind resource assessment in wind farm pre-feasibility studies, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 39, No. 9, (2015).
- [43] K. Kyoung-Bo, Y. Kyung-Bu, P. Yun-Ho, M. Chang-en, P. Jiong-Keun, H. Jong-Chul, A study on the real-time monitoring system of wind power in Jeju, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vo. 30, No. 3, (2010).
- [44] K. Kyoung-Bo, P. Yun-Ho, P. Jiong-Keun, K. Kyung-Nam, H. Jong-Chul, Feasibility study on wind power forecasting using MOS forecasting result of KMA, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vo. 30, No. 2, (2010).
- [45] K. Hyun-Goo, L. Yung-Seop, J. Moon-Seok, Cluster analysis and Meteor-Statistical model test to develop a daily forecasting model for Jeju wind power generation, Journal of the Environmental Sciences, Vo. 19, No. 10, (2010).
- [46] P. Yun-Ho, K. Kyoung-Bo, H. Soo-young, L. Young-Mi, H. Jong-Chul, A study on the wind data analysis and wind speed forecasting in Jeju area, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vo. 30, No. 6, (2010).
- [47] K. Y. Oh, J. Y. Kim, J. K. Lee, M. S. Ryu and J. S. Lee, An assessment of wind energy potential at the demonstration offshore wind farm in Korea, Energy, 46 (2012) 555-63.

- [48] S. Y. Park, Y. J. Lim, B. C. Choi, Analysis of meteorological change around wind farm using WRF model, The Korean Society for New and Renewable Energy, 2014. 05, 41-41, (2014).
- [49] B. K. Seo, S. Y. Lee, J. Y. Byon, Y. S. Park, Y. J. Choi, Estimation of sensibility using WRF model over the offshore wind farm, The Korean Society for New and Renewable Energy, 2012. 11, 27-27, (2012)
- [50] M. S. Jeong, C. J. Moon, K. P. Jo, C. J. Yang, The offshore wind farm feasibility study based on the analysis of wind conditions, The society of Naval Architects of korea, 2011.6, 2386-2386, (2011).
- [51] J. Tambke, C. Poppinga, L. Von Bremen, L. Claveri, M. Lange, U. Focken, J.A.T. Bye, F. O. Wolff, Advanced Forecast Systems for the Grid Integration of 25GW Offshore Wind Power in Germany, (per reviewed) Proc. of the Scientific Track of the European Wind Energy Conference EWEC, Athens, (2006).
- [52] R. J. Barthelmie, F. Muraya, S. C. Pryor, The economic benefit of short-term forecasting for wind energy in the UK electricity market, Energy Policy, 36, pp 1676-1696, (2008).
- [53] H. Holtinen, Optimal electricity market for wind power, Energy Policy, (2005).
- [54] S. S. Saurabh, Z. Hamidreza, A Review of Wind Power and Wind Speed Forecasting Methods With Different Time Horizons, (2010).
- [55] S. Soman, H. Zareipour, O. Malik, P. Mandal, A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons, North American Power Symposium (NAPS), 1-8, (2010).
- [56] B. Lange, H. P. Wladl, R. Barthelmie, A. G. Guerrero, D. Heinemann, Modelling of offshore wind turbine wakes with the wind farm program FLap, Wind Energy, 6:87 - 04, (2003).
- [57] M. Lange, D. Heinemann, Accuracy of short term wind power predictions depending on meteorological conditions, In Proc. Global Wind Power Conf., Paris, (2002).

- [58] W. Leonhard, K. Muller, Balancing fluctuating wind energy with fossil power stations - here are the limits?, *Electra (CIRES)*, 204:14 - 8, (2002).
- [59] 이순환, 이화운, 김동혁, 김민정, 김현구, 한반도 풍력자원지도의 공간해상도가 풍력자원 예측정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구, *한국환경과학지* 제18권 제8호 pp 885-897, (2009).
- [60] T. S. Nielsen, H. A. Nielsen, H. Madsen, Advanced Statistical Modeling and Uncertainty Assessment for Wind Power Forecasting, In Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Athens, Grece, 27/2-2/3, (2006).
- [61] P. Pinson, G. Kariniotakis, On-line assessment of prediction risk for wind power production forecasts, *Wind Energy Journal*, 7, 119-132, (2004).
- [62] P. Pinson, T. Ranchin, G. Kariniotakis, Short-term wind power prediction for offshore wind farms - Evaluation of fuzzy-neural network based models, CD-Rom Proceedings of the Global Wind Power 2004 Conference, Chicago, Illinois, USA, March 28-31, (2004).
- [63] L. Hui, T. Hong-Qi, C. Chan, L. Yank-fei, A hybrid atatistical method to predict wind speed and wind power, *Renewable Energy*, 1857-1861, (2010).
- [64] W. Wei, B. Cindy, D. Michael, D. Jimmy, G. Dave, Lin. Hui-Chuan, M. John, R. Syed, Z. Xin, ARW Version3 Modeling System User' s Guide, National Center for Atmospheric Research, (2008).
- [65] WRF-ARW V3.9 User' s Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, (2017).
- [66] G. L. Mellor, T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982, 20, 851-875, (1982).



- [67] P. A. J. Jiménez, J. Dudhia, J. F. González-Rouco, J. Navarro, J. P. Monteáñez, E. García-Bustamante, A revised scheme for the WRF surface layer formulation, *Mon. Weather Rev.* 2012, 140, 898–918, (2012).
- [68] F. Chen, J. Dudhia, Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling system, Part II: Preliminary model validation. *Mon. Weather Rev.* 2001, 129, 587–604, (2001).
- [69] E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, S. A. Clough, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- $k$  model for the longwave, *J. Geophys. Res. Atmos.* 1997, 102, 16663–16682, (1997).
- [70] J. Dudhia, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.* 1989, 46, 3077–3107, (1989).
- [71] J. F. Price, R. A. Weller, R. Pinkel, Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing, *J. Geophys. Res.* 1986, 91, 8411–8427, (1986).
- [72] J. F. Price, Upper ocean response to a hurricane, *J. Phys. Oceanogr.* 1981, 1, 153–175, (1981).
- [73] G. M. Mohan, C. V. Srinivas, C.V. Naidu, R. Baskaran, B. Venkatraman, Real-time numerical simulation of tropical cyclone Nilam with WRF: experiments with different initial conditions, 3D-Var and ocean mixed layer model, *Nat. Hazards* 2015, 77, 597–624, (2015).
- [74] C. C. Wu, W. T. Tu, I. F. Pun, I. I. Lin, M. S. Peng, Tropical cyclone–ocean interaction in Typhoon Megi (2010)–A synergy study based on ITOP observations and atmosphere–ocean coupled model simulations, *J. Geophys. Res.* 2016, 121, 153–167, (2016).
- [75] R. T. Pollard, P. B. Rhines, R. Y. Thompson, The deepening of the wind-mixed layer, *Geophys. Fluid Dyn.* 1973, 3, 381–404, (1973).

- [76] J. F. Manwell, A. L. Rogers, J. G. McGowan, B. H. Bailey, An offshore wind resource assessment study for New England, *Renew. Energ.* 2002, 27, 175-187, (2002).
- [77] M. D. Powell, P. J. Vickery, T. A. Reinhold, Reduced drag coefficient for high wind speed in tropical cyclones, *Nature*, 422, 279-283, (2003).
- [78] Yablonsky, R.M. and Ginis, I, Limitation of one-dimensional ocean models for coupled hurricane-ocean model forecasts, *Monthly Weather Review*, 137, 4410-4419, (2009).
- [79] C. A. Davis, W. Wang, S. S. Chen, Y. Chen, K. Corbosiero, M. DeMaria, J. Duhia, G. Holland, J. Klemp, J. Michalakes, H. Reeves, R. Rotunno, C. Snyder, Q. Xiao, Prediction of landfalling hurricanes with the advanced hurricane WRF model, *Monthly Weather Review*, 136, 1990-2005, (2008).
- [80] D. Cabezon, L. Marti, M. J. Sanisidro, Comparison of Methods for Power Curve Modeling, *Proceedings of the Global Wind Power Conference*, Chicago, Illinois, USA, March 28-31, (2004).
- [81] K. T. Valsaraj, *Elements of environmental engineering thermodynamics and kinetics*, 3rd edition, CRC Pres, 2009; pp 454-456, ISBN 978-1-4200-7820-6, (2009).
- [82] C. Eui-Heang, M. Chae-Joo, J. Moon-Seon, J. Kyu-Pan, P. Gui-Yeol, The study for calculating the geometric average height of Deacon equation suitable to the domestic wind correction methodology. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 30, (2010).
- [83] 고경남, 허종철, “풍력공학입문”, 문운당, (2006).
- [84] Wind pro 2.5 User Guide book, (2006)

## 감사의 글

박사과정을 마무리하기까지 수도 없이 되뇌었던, ‘공부는 젊을 때 해야지, 늦어서 하니 너무 힘들다’ 라는 한숨 섞인 불안과 걱정에도 불구하고 이 논문의 완성과 함께 과정을 마무리할 수 있었습니다. 비록 늦게 시작한 학위과정이었으나, 인생에서의 새로운 도전이었으며, 아름다운 결과를 맺게 해주신 모든 분께 감사를 드리며, 스스로에게도 고생했다고 위안을 합니다.

특히 지도교수 고경남 교수님은 SCIE 논문 통과 및 학위논문 내용 전반에 걸쳐 세심한 도움을 많이 주셨습니다. 김범석 교수님과 배윤혁 교수님은 유익한 강의와 함께 학위논문의 질을 높일 수 있는 조언을 많이 하여주셨습니다. 정지현 교수님은 마지막까지 공학적인 표현에 대한 조언을 아끼지 않았으며, 이영미 대표님은 기상학적 내용과 기상수치모델의 활용에 관한 수준을 높일 수 있게 많은 도움을 주셨습니다.

신동헌 박사, 이건우, Tumenbayar Undarmaa, 문경록, 현진석, 고인이 된 강동범 등 풍력단지설계 연구실의 많은 선배님들로부터 논문의 구성과 데이터 분석 과정에서 수준 높은 도움을 받았습니다. 수치모델링과정에서 많은 도움을 준 김민영에게도 고마운 마음을 전합니다.

김경보 박사, 박성식 박사, 강봉조 박사, 김은지 연구원, 양한승 연구원, 박한별 연구원 등 물심양면으로 많은 도움과 용기를 준 동료들에게도 고마운 마음을 드립니다.

학위과정에서 가장 고마우면서도 미안함을 느끼는 것은 사랑하는 가족입니다. 처음부터 끝까지 응원해주고 지원해준 처 이숙희는 제 인생의 등불입니다. 처를 이 세상에 있게 해주신 장모님께도 감사의 말씀을 드립니다. 주말에도 논문을 쓰느라 같이 시간을 보내지 못해, 막내딸 채은에게는 더욱더 아빠의 역할을 많이 해야겠다고 다짐합니다. 명품아들 건혁과 진품아들 주혁은 언제나 아빠의 도전을 응원해주는 든든한 후원자였습니다. 가족들이 있기에 이 논문의 가치가 비로소 의미가 있음을 크게 느낍니다.

이찬구 대부님, 조민기 대자님, 신비로사리오 19기 친구들과 강형민 다니엘 신부님, 김석주 베드로 신부님의 응원과 기도가 많은 도움이 되었습니다. 박사 학위논문의 완성이 있기까지 많은 어려움과 고비가 있었으나, 기도를 통해 용기를 얻고 지친 몸과 마음이 치유되는 계기가 되었습니다.

박사과정을 시작하면서 아버님과 어머님이 가장 좋아하셨습니다. 좀 더 일찍 시작했더라면 생전에 드릴 수 있었을 이 논문을, 하늘에 계신 아버님과 어머님께 감사의 마음을 담아서 드립니다.



