



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

碩士學位論文

WRF 기상예측자료를 이용한
풍황분석 타당성 연구

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

許 收 榮

2012 年 12 月

WRF 기상예측자료를 이용한 풍황분석 타당성 연구

指導教授 許 鐘 哲

許 收 榮

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012 年 12 月

許收榮의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2012 年 12 月

Feasibility Study for Wind Characteristics
Analysis by using WRF Meteorological
Prediction Data

Sooyoung, Her
(Supervised by professor Jong-Chul Huh)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2012 . 12 .

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy

.....
Thesis director, Byung-Gul Lee, Prof. of Civil Engineering

.....
Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Mechanical Engineering

.....
Date

MULTIDISCIPLINARY GRADUATE SCHOOL PROGRAM FOR WIND ENERGY
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	iv
Nomenclature	v
Abstract	vi
I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 종래의 연구동향	2
3. 연구목적	4
II. WRF 모델 구축	5
1. WRF 모델 개요	5
2. WRF domain 설정	7
3. 상세지형자료 및 토지피복자료 생성	8
4. 기상 데이터의 초기 및 경계자료	14
5. WRF 물리과정	15
6. 하드웨어 구성	16
7. WRF output data 후처리	17
1) Wind speed	17
2) Wind direction	18
3) Geopotential meter	18
4) 풍속 보정	19
5) 후처리 프로그램 구현	20

III. 연구방법	21
1. 분석지점 선정	21
2. 분석방법	22
1) 선행연구 구현	22
2) WRF 모델을 이용한 예측	24
3. 분석기법	25
1) Weibull distribution	25
2) Wind Rose	26
3) Annual Energy Production	26
4) 통계적 방법	27
IV. 연구결과	29
1. 기상예측자료와 실측데이터간의 통계적 비교	30
2. 데이터 종류별 풍황분석 결과	31
1) 평대 기상탑 지점 풍황분석	31
(1) Weibull distribution, wind profile 비교 분석	31
(2) Wind rose 비교 분석	34
(3) 월별 평균풍속 비교 분석	35
2) 우도 기상탑 지점 예측	36
(1) Weibull distribution, wind profile 비교 분석	36
(2) Wind rose 비교 분석	39
(3) 월별 평균풍속 비교 분석	40
V. 결 론	41
VI. 참고문헌	42

List of Figures

Fig. 1	WRF modeling system flow chart	6
Fig. 2	WRF-domain setting	7
Fig. 3	Contour map of Jeju island provided by NGII	9
Fig. 4	Digital elevation map of Jeju island	9
Fig. 5	Altitude in WRF model	10
Fig. 6	Altitude difference between NGII and USGS data	11
Fig. 7	Land cover of USGS data	12
Fig. 8	Land cover map	13
Fig. 9	Flowchart of the microphysics processes in the WSM6 scheme	16
Fig. 10	Parallel computing cluster	17
Fig. 11	Flow chart of postprocessor	20
Fig. 12	The positions in the Northeastern part of Jeju island for this study	21
Fig. 13	Contour map in WindPRO	23
Fig. 14	Roughness map in WindPRO	23
Fig. 15	Example of arranged data in time domain	24
Fig. 16	Power curve of GE 900s(GE WIND ENERGY)	27
Fig. 17	Comparison of the measured and the predicted data of weibull distribution at Pyeongdae	31
Fig. 18	Comparison of the measured and the predicted data of wind profile at Pyeongdae	33
Fig. 19	Comparison of the measured and the predicted data of wind rose at Pyeongdae	34
Fig. 20	Comparison of the measured and the prediction data of monthly wind speed at Pyeongdae	35
Fig. 21	Comparison of the measured and the prediction data of weibull distribution at Udo	36
Fig. 22	Comparison of the measured and the predicted data of wind profile at UDO	38
Fig. 23	Comparison of the measured and the predicted data of wind rose at Udo	39
Fig. 24	Comparison of the measured and the prediction data of monthly wind speed at Udo	40

List of Tables

Table 1	WRF domain	8
Table 2	Description of land cover of USGS data	12
Table 3	Land cover parameters	13
Table 4	Physical process of WRF model	15
Table 5	Prediction positions and using data	22
Table 6	Using roughness length	24
Table 7	Statistical results for Pyeongdae and Udo Met.Mast	30
Table 8	Shape parameter, scale parameter, and annual mean wind speed at Pyeongdae	32
Table 9	Comparison of AEP at Pyeongdae	33
Table 10	Shape parameter, scale parameter and annual mean wind speed at Udo	37
Table 11	Comparison of AEP at Udo	37
Table 12	The power law exponent by each prediction way at Udo	38

Nomenclatures

c	척도계수(scale parameter)	[m/s]
$f(V)$	Weibull distribution	
g_0	지구 평균 중력	[m/s ²]
k	형상계수(shape parameter)	
n	멱지수	
$P(V)$	Power curve function	
V	풍속	[m/s]
V_x	x 방향 풍속	[m/s]
V_y	y 방향 풍속	[m/s]
V_h	h 높이의 풍속	[m/s]
V_z	z 높이의 풍속	[m/s]
$V_{m,1}$	1차 모멘트	
$V_{m,2}$	2차 모멘트	
Z	Geopotential meter	[m]
z	지표 높이	[m]
Γ	감마함수	
Ψ	Geopotential	[m ² /s ²]

Abstract

Wind resource assessment based on wind data derived from a Numerical Weather Prediction (NWP) model has been carried out in Jeju Island. Of NWP models, Weather Research and Forecasting (WRF) model was used for this investigation. Numerical contour map and Land Cover Map which were made in Korea were used for more accurate analysis.

The meteorological data which is used in WRF model has been chosen as a Global Forecast System (GFS) file. The 10-min wind data was generated on the basis of the model dynamics and physics. The wind data predicted by WRF and WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program) was compared with the measured data at Pyeongdae and Udo, which is located in the northeastern part of Jeju Island.

The result showed that the wind characteristics predicted by WRF model running were in good agreement with the measured wind characteristics. From this result, it may be possible to assess wind resource using WRF model whose original purpose is wind power forecasting. Though the predicted 10-min interval wind data did not match the measurements very well, the predicted wind characteristics such as annual and monthly mean wind speed roughly agreed with the real wind characteristics. That is, it may be well worth to analyze the wind data predicted by running WRF model when the measured wind data is not available or when a wind farm developer searches for a potential wind farm site before installing meteorological mast. It is needed to conduct more feasibility studies like this for various sites for the reliable result.

I. 서 론

1. 연구배경

현재 우리나라는 8대 중점관리 녹색기술 중 5개 분야의 녹색기술인 바이오에너지, 풍력에너지, 연료전지, LED 응용, 폐기물 에너지화를 선정하였다. 그리고 2010년부터 2023년까지 전라남도 서남부 도서·연안·해상지역에 5GW 풍력산업 프로젝트를 진행하고 있다. 이렇게 정부지원으로 풍력발전단지를 구축 하려는 활동이 활발하게 이루어지고 있다.

풍력발전단지를 구축하기 위해서 필요한 부분 중에 하나가 바로 풍력발전단지 입지선정이다. 풍력발전단지 입지선정 방법 중에는 기존에 선행된 인근 풍력자원 조사 보고서를 수집하거나 풍황자료를 수집하여 풍력자원을 분석한다.

풍력자원을 분석하기 위해서 다양한 방식을 통해 연구 및 분석을 하고 있다. 기상청 자료인 AWS(Automatic Weather System) 데이터를 이용하는 방법, 과거 해당지역에서 수집된 기상탑 데이터 또는 인근지역에서 수집된 기상탑 데이터를 이용하는 방법, 위공위성으로 기상자료를 수집하여 얻은 데이터를 이용하는 방법, 바람지도를 활용하는 방법, 기상수치모델을 이용하는 방법 등 다양한 방법으로 풍력자원을 연구 및 분석을 하고 있다.

위의 방법 중 기상수치모델은 예전부터 날씨를 예보하는 분야에 많이 쓰이고 있는 모델이다. 국내외로 이런 기상수치모델을 풍력분야에 도입함으로써 풍력발전량 예측 연구에 사용되기도 한다. 국내는 아직 국외 예측기술력에 비하면 미미한 수준이지만, 지속적으로 연구를 진행하고 있다.^[1~6] 박윤희 등(2010)^[3]이 기상수치모델인 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델을 이용해서 제주지역의 풍속 및 발전량을 예측하는 연구를 진행해왔다.

국외에서는 이미 기상수치모델인 KAMM(Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model)과 WASP(Wind Atlas Analysis and Application Program)을 결합하여 풍황을 추정하는 연구를 Risoe 연구소에서 수행하였다. WASP에서 기상현상을 제

대로 표현 못하는 단점을 KAMM을 사용함으로써 보완을 하였고 KAMM은 격자간격이 조밀하지 못하는 단점을 WASP를 사용함으로써 보완을 하였다.^[7]

국내에는 아직까지 기상수치모델을 도입하여 풍황분석을 하는 연구는 미미한 실정이므로 풍황분석을 할 때에는 주로 micrositing으로 분석을 하고 있다. micrositing은 오직 국소지역에 대해서 산학영향, 표면 거칠기 영향, 그리고 장애물 영향만 고려하기 때문에 국지적인 기상현상에 대한 영향은 고려되고 있지 않다는 것을 의미한다.^[8,9] 따라서 기상현상에 대한 영향을 고려해서 풍황분석을 하기 위해서는 기상수치모델 사용이 불가피하다.

2. 종래의 연구동향

국외에서는 AWS 데이터, 인접한 기상탑 데이터 및 위성 데이터를 사용한 풍황분석이 오래전부터 수행되었다. 거기다가 Brower Michael 등(2004)^[10]은 풍력자원을 평가하기 위해서 중규모 모델(Mesoscale model)을 사용하여 평균 5~7%의 오차율을 보여주었다.

일본에서는 Takeshi(2003)^[11~13]가 MASCOT(Microclimate Analysis System for Complex Terrain)라는 비선형 극소 풍력예측모델을 개발하여 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)과 결합하였다. 이 연구에서는 MASCOT 모델을 이용하면 연평균풍속을 기준으로 5%이하의 오차율을 보여준다고 결론을 지었다.^[11]

Risoe 연구소에서는 Frank 등(2001)^[7]이 KAMM/WASP Method 연구로 중규모모델과 소규모모델을 결합해서 풍황을 분석하는 연구를 진행했다. Risoe 연구소의 보고서에 의하면 U-wind speed가 모든 격자간격에 대해서 RMS 관계가 8% 이내의 결과를 나타내었다.

Munoz-Esparza(2012)은 WRF 모델을 가지고 각 PBL(planetary boundary layer)종류에 따라 해상 wind profile을 예측한 결과를 FINO1의 실측데이터와 비교했다.^[14,15] 이 연구는 FINO1의 측정센서 높이가 100m이므로, 그 이상 높이에 대한 측정 한계를 극복하기 위해 기상수치모델인 WRF 모델의 wind profile 예

측 능력을 각 PBL별로 나타내었다. 또한, Whale 등(2008)은 중규모모델을 사용해서 건물 지붕 위 wind system에 대해서 타당성 연구를 수행하였다.^[16]

국내에서도 풍력자원을 분석하기 위해서 다양한 방식을 통해 연구 및 분석을 하고 있다. 기상청 자료인 AWS 데이터를 이용한 경우에는 황윤석 등(2009)^[17]이 풍황자원 예측 시 기상청 풍황자료의 유효성을 연구하기 위해서 AWS 데이터를 사용 및 분석을 하여 10m 평균풍속에 대해서 15%의 오차율 결과를 도출하였다.

기상탑 데이터를 이용한 경우에는 김영찬 등(2006)^[18]이 전남 남해 지역에 기상탑을 설치하여 1년 동안 측정하여 풍황을 분석하였고, 오현석 등(2009)^[19]이 제주 북동부지역을 대상으로 한 WindPRO의 예측성능 평가를 연구하기 위해 인근 기상탑 데이터를 사용하였다.

위성데이터를 이용한 경우에는 경남호 등(2003)^[20]이 한반도 해역의 해상 풍력자원 평가를 하기 위해서 위성데이터인 QuikSCAT 위성 데이터를 사용하여 분석하였다. 김병민 등(2012)^[21]은 NCAR 데이터를 적용해서 해상풍력자원에 대한 예측을 수행했다. 평균풍속을 기준으로 1.01~8.94%로 비교적 높지 않은 오차율을 보여주었다.

국가바람지도를 사용하는 방법도 있다. 김현구 등(2009, 2010)^[22,23]은 국가바람지도 KIER-WindMapTM을 구축하였으며, 구축된 국가바람지도를 활용하는 연구를 지속적으로 개발 및 연구를 하고 있다. 이순환 등(2007)^[24]은 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석을 하기 위해서 기상수치모델인 MM5 모델을 사용하였고, 위성데이터인 QuikSCAT와 자료동화를 도입하여 한반도 전체에 대한 풍속 추정 정확도를 높이는 연구를 진행하였다.

이렇게 다양한 방법으로 풍력자원의 분석연구를 수행하고 있고 기존의 micro-siting 방식에서 추가적으로 기상수치모델에 대한 이점을 적용하고 있는 추세이다.

3. 연구목적

본 연구에서는 지식경제부 과제에 의해 수행된 “풍력발전단지의 발전량 예측시스템 구축”^[25] 사업에 의해 구축된 풍력발전량 예측시스템에서 생성된 기상예측자료를 사용하여 신뢰성 있는 풍황분석이 가능한지를 살펴보는 것에 목적을 두었다. 이 사업을 통해 진행된 연구로 김경보 등(2010)^[1,2]과 박윤희 등(2010)^[3]에 의해 풍력발전량 예측시스템의 구축 및 예측 정확도에 대한 결과는 나와 있다. 그러나 본 연구에서는 다음과 같은 부분을 수정 및 보완하여 연구를 진행하였다.

- (1) 기존 풍력발전량 예측시스템에서 사용되는 지형자료는 미국국립지리원에서 제공하는 위성자료로써 정밀도나 신뢰성이 조금 떨어지고 있다. 이를 보완하기 위해 국토지리정보원에서 제작된 등고선 전자지도를 사용하였다.
- (2) 기존 풍력발전량 예측시스템에서 사용되는 토지피복자료는 지형자료와 마찬가지로 미국국립지리원에서 제공하는 위성자료로써 과거 측정된 자료를 사용하고 있다. 이를 보완하기 위해 환경지리정보서비스에서 제공하는 토지피복자료를 사용하였다.
- (3) 기존 풍력발전량 예측시스템에서는 기상예측자료가 1시간 간격으로 생성되고 있다. 풍황을 분석할 때 1시간 간격으로 생성된 자료를 사용해도 되지 만, 실측데이터와 비교하기 위해서 10분 간격으로 기상예측자료를 생성하였다.

WRF 모델 구축 시 사용된 입력데이터 및 설정사항에 대해서 2장에 소개하였고 3장에서는 선정된 분석지점과 사용된 분석방법 및 분석기법에 대해서 소개하였다. 그리고 분석된 결과를 4장에 설명하고 5장에 최종 결론을 내렸다.

II. WRF 모델 구축

1. WRF 모델 개요

WRF(Weather Research and Forecasting) 모델은 국립 해양대기청(NOAA), 대기연구 국립센터(NCAR), 그리고 150개 이상의 미국 및 해외대학의 협력으로 만들어졌다. WRF는 다른 말로 The Advanced Research WRF(ARW)으로도 불리며 지금까지도 개발되고 있는 모델이다. 현재까지 나온 버전은 V3.4이다. 해석하는 규모는 수m에서 수km까지 해석이 가능한 중규모 모델로 분류되며, 해석하고 분석할 수 있는 분야로는 다음과 같다.^[26]

- Idealize simulations (e.g. LES, convection, baroclinic waves)
- Parameterization research
- Data assimilation research
- Forecast research
- Real-time NWP
- Hurricane research
- Regional climate research
- Coupled-model applications
- Teaching

Fig.1를 보면 처음에는 WPS(WRF Pre-Postprocessing System)으로 real-data simulations를 하기 위해서 모델에 입력 데이터들을 올려놓는 작업프로그램이다. WPS 작업은 아래와 같다.

- 시뮬레이션 도메인 정의
- terrestrial data 입력(terrain, landuse, and soil)

• meteorological data 입력

첫 번째로 시뮬레이션 도메인을 정의한 다음 정의된 도메인 안에 지형자료, 토지피복자료를 입력하여 그 위에 기상자료를 입력하는 과정이다. WPS에서는 다른 모델에서 나온 기상결과를 입력할 수도 있다. 이렇게 WPS를 통해 입력된 자료들은 ARW model로 넘어가면 초기 및 경계조건을 바탕으로 모델을 수행하게 된다.

Post-Processing & Visualization 부분은 ARW model에서 나온 결과를 시각적으로 보여주는 후처리 과정이다. IDV, VAPOR, NCL 등 다양한 프로그램이 있는데, 각각 사용 용도에 따라 쓰이거나, 사용자의 목적에 따라 사용되고 있다. 옵션으로 사용되는 WRFDA와 OBSGRID는 기존 기상자료에 유저의 실측데이터를 추가적으로 입력하여 모델 수행시 반영이 되게 해주는 프로그램이다. 본 연구에서는 WRFDA와 OBSGRID를 사용하지 않았다.

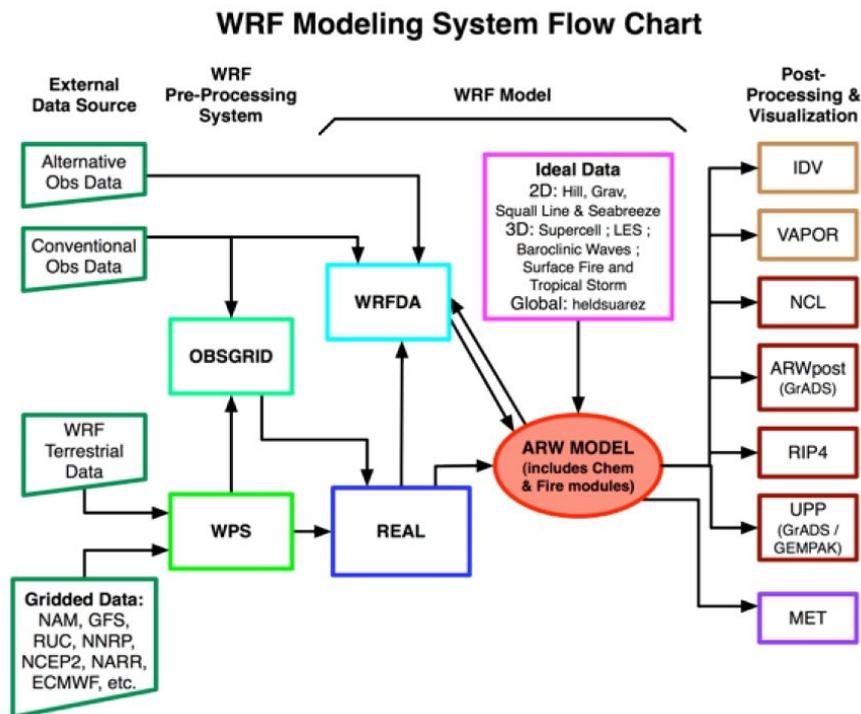


Fig. 1 WRF modeling system flow chart^[26]

2. WRF domain 설정

WRF 모델을 수행하기 위해서 첫 번째로 설정해야 할 부분으로 WRF domain 이 되겠다. domain 설정시 주의할 점은 모델을 수행하는 domain에서 지역적인 대기현상이 제대로 반영 되는지 확인해야 한다. 그리고 domain 설정에 따라 WRF 모델의 수행시간이 크게 달라지므로 신중하게 고려되어야 할 부분이다.^[27]

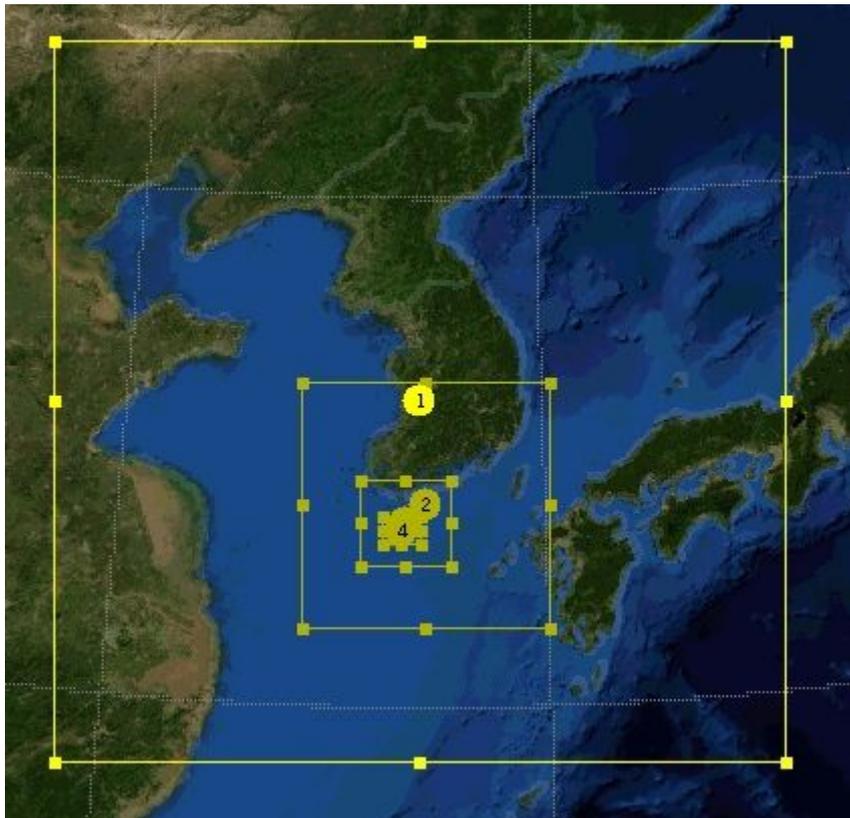


Fig. 2 WRF-domain setting

본 연구에서는 Fig. 2에서 보듯이 총 4개의 domain으로 구성하였다. domain 1은 격자 간격을 27km로 하여 한반도 전체를 포함하는 $1620\text{km} \times 1620\text{km}$ 영역으로 구성하였고, domain 2는 격자 간격을 9km로 설정하여 남한지역을 포함하는 $540\text{km} \times 540\text{km}$ 으로 구성하였다. domain 3은 격자 간격을 3km로 설정하여 남서해안과 제주도를 포함하는 $198\text{km} \times 189\text{km}$ 으로 구성하였고, 마지막으로 domain

4는 1km로 격자 간격을 구성하여 제주인근 해상까지의 바람을 모사할 수 있도록 84km × 60km로 선정하여 구성하였다. 각 영역에 대한 domain의 크기를 Table 1에 나타내었다. 최종 계산되는 영역은 domain 4이다.

Table 1 WRF domain

Domain	Grid size	Domain size
Domain 1	27km	1620km × 1620km
Domain 2	9km	540km × 540km
Domain 3	3km	198km × 189km
Domain 4	1km	84km × 60km

일반적으로 기상수치모델에서는 nesting 이라는 방법을 제공하고 있다. nesting 방법은 큰 domain에서 나온 결과를 바탕으로 초기 및 경계조건을 작은 domain에 입력하여 모델을 수행함으로써, 큰 domain에서 나타나는 현상을 작은 domain에 반영할 수 있다.^[28] 결론적으로 nesting 방식을 이용하여 domain을 4개로 구성하여 WRF 모델을 수행하였다.

3. 상세지형자료 및 토지피복자료 생성

WRF 모델에서 기본적으로 제공되는 지형자료가 있다. 미국국립지리원(USGS : United States Geological Survey)의 디지털 지형고도(DEM : Digital Elevation map) 자료를 제공하는데, 위성자료이므로 상세지형자료로 사용하기에는 지형고도의 표현이 부족한 점이 있다. 본 연구에서 구축된 domain 3까지는 격자 간격이 3km이므로 미국국립지리원에서 제공하는 지형자료를 바탕으로 구축하였다. 1km 격자 간격으로 된 domain 4는 상세한 지형자료를 구축하기 위해서 국토해양부 국토지리정보원에서 판매하고 있는 등고선 전자지도를 사용하였다.

Fig. 3은 국토지리정보원에서 제공하는 등고선 전자지도를 보여주고 있다. 미국국립지리정보원에서 제공하는 자료는 우도와 마라도에 대한 표현이 안 되고

있어서 표현이 잘 된 국토지리정보원의 등고선 전자지도를 이용하는 게 신뢰성이 있다고 판단된다.

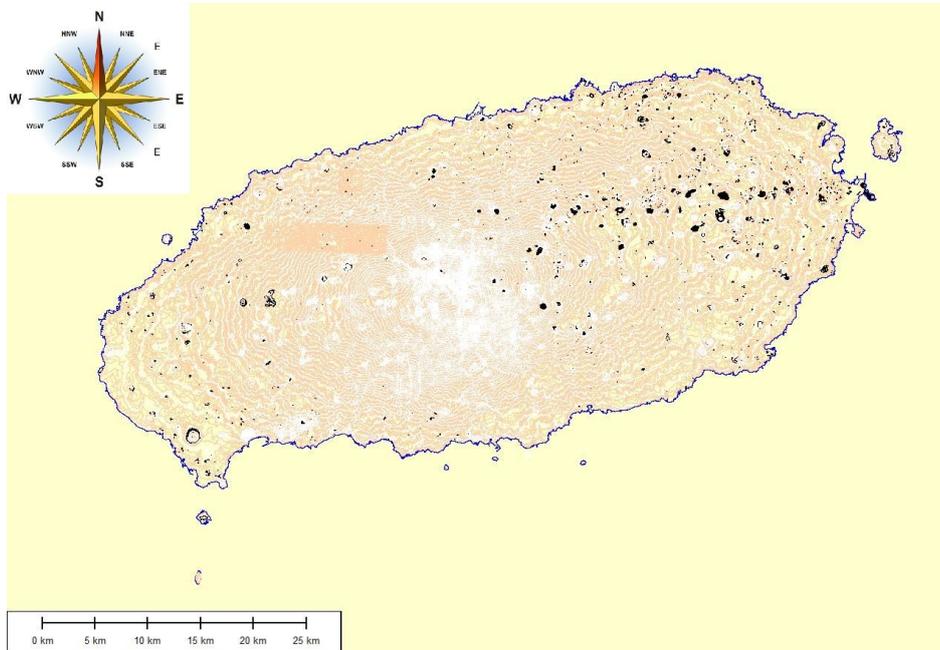


Fig. 3 Contour map of Jeju island provided by NGII

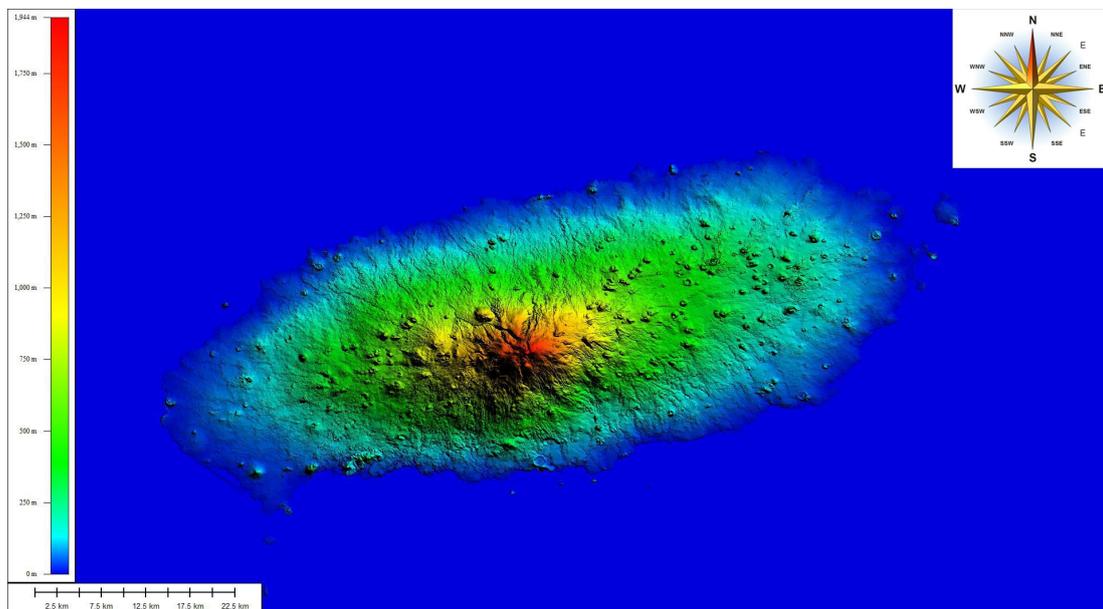


Fig. 4 Digital elevation map of Jeju island

WRF 모델에서는 벡터형식인 등고선 전자지도를 입력하지 못하기 때문에, 지형 프로그램(Global mapper)을 이용하여 벡터형식인 등고선 전자지도를 래스터(raster) 형식인 DEM(Digital Elecation Map)으로 재 생성하였다. 생성된 DEM을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5은 WRF 모델에 입력된 Fig. 4의 지형자료를 보여주고 있다. 우도를 포함하여 제주도 인근 주변에 있는 작은 섬까지 잘 표현되는 것을 알 수 있다. 그러나 여기에도 문제점은 존재한다. domain 격자 간격이 1km로 설정되어 있기 때문에, 1km 격자 간격이 같은 높이로 입력되고 있다. 즉 한라산 최고높이가 1950m 이지만, 정상 을 기준으로 1km 주변의 높이가 반영되어서 WRF 모델에 입력되는 최고 높이는 1752m로 표기되었다. 한라산의 정상 높이를 제대로 반영하기 위해서는 더 조밀한 격자 간격을 구성해야만 가능한 일이다.

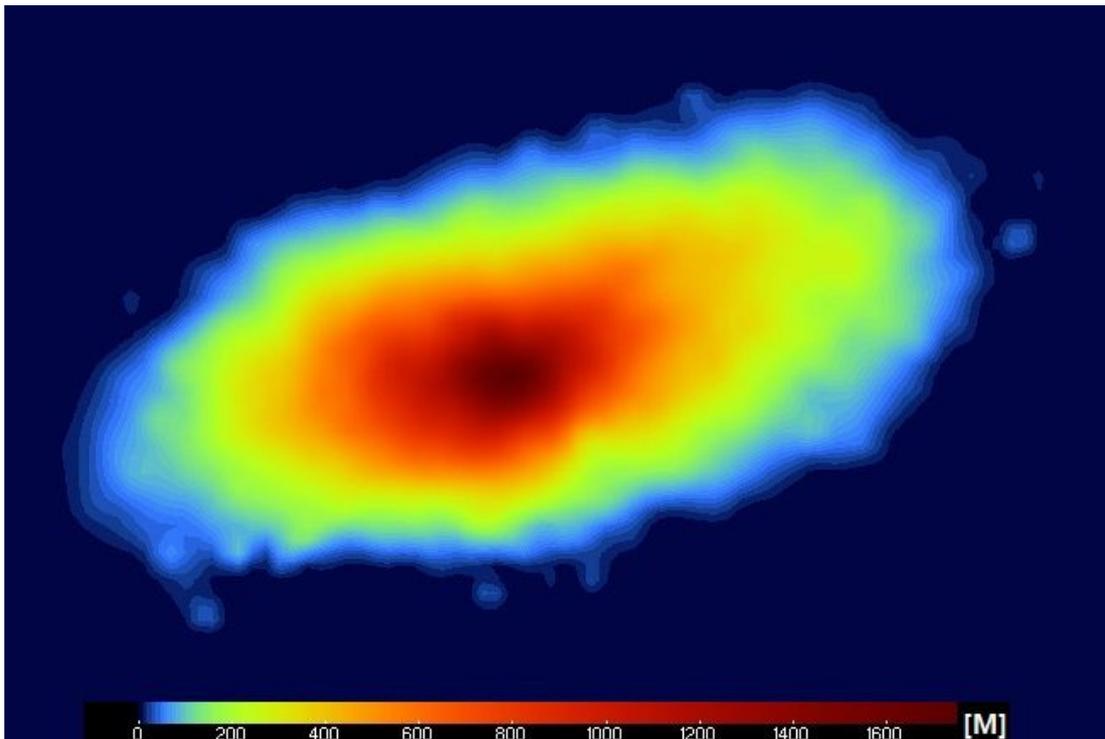


Fig. 5 Altitude in WRF model

Fig. 6은 국토해양부에 있는 국토지리정보원에서 제작한 DEM 자료와 미국국

립지리원에서 제공하는 DEM 자료의 차이를 보여주고 있다. 최대 45m까지 고도 차이를 보여주고 있다. Fig. 6에서 보이듯이 미국국립지리원에서 제공하는 DEM 자료에서는 성산일출봉, 또한 제주도 곳곳에 있는 오름 표현이 안 되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 사용된 상세지형자료는 제주도 지형을 잘 표현한 것이다.

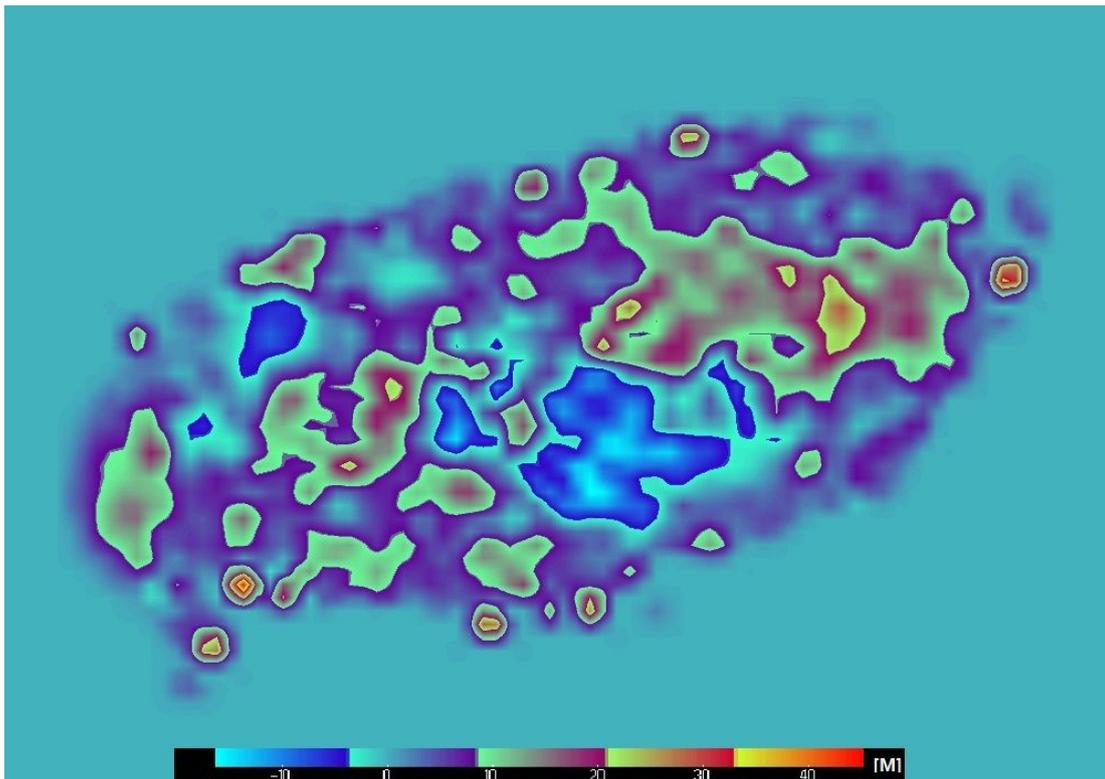


Fig. 6 Altitude difference between NGII and USGS data

토지피복자료(Land cover) 또한 USGS에서 위성데이터를 기반으로 제공하고 있다. Fig. 7에 USGS에서 제공하는 토지피복자료를 나타내었고 Table 2에 Fig. 7에 표현된 색상에 대한 의미를 기술하였다.

Fig. 7에서 보이듯이 도심지역(제주시, 서귀포시)이 산림지역 또는 관목지 지역으로 되어 있다. 이는 오래된 자료라서 현재의 제주도의 식물과 도심에 대한 표현이 제대로 되어 있지 않거나 잘못 표현되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 환경부에 있는 환경지리정보원에서 제공하는 토지피복자료를 사용하였다.

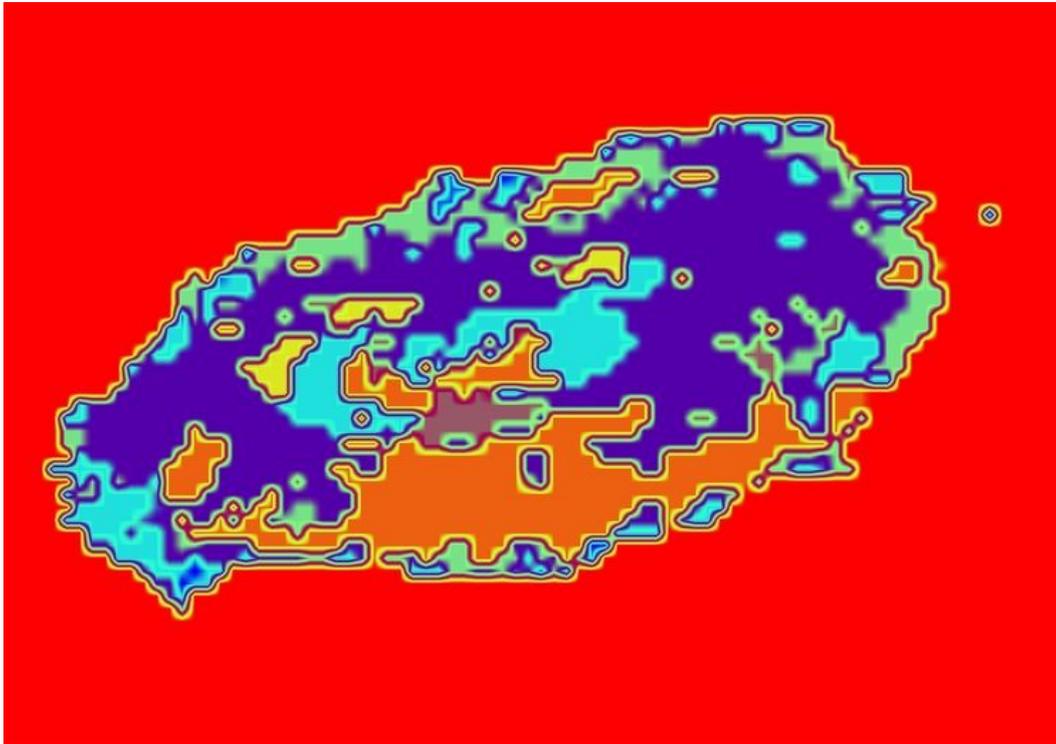


Fig. 7 Land cover of USGS data

Table 2 Description of land cover of USGS data

Color	Category no.	Description
Blue	2	Dryland cropland and pasture
Cyan	3	Irrigated cropland and pasture
Purple	6	Cropland/Woodland mosaic
Green	8	Shrubland
Brown	10	Savanna
Yellow	14	Evergreen needleleaf forest
Orange	15	Mixed forest
Red	16	Water Bodies

Fig. 8은 환경지리정보원에서 제공하는 토지피복자료를 보여주고 있다. 사진에서 보이듯이 빨간색은 도시 및 건조지역, 노란색은 농업지역, 진한 녹색은 산림지역, 보라색은 습지, 하늘색은 나지, 파란색은 수역을 나타내고 있다. 이렇게

2000년도에 총 7개로 분류하여 생성된 토지피복자료이다. 비록 분류도가 7개로만 구분되었지만, USGS의 토지피복자료 보다는 최신 자료이기 때문에, 도시지역이나 농업지역에 대해서 잘 표현되었다.

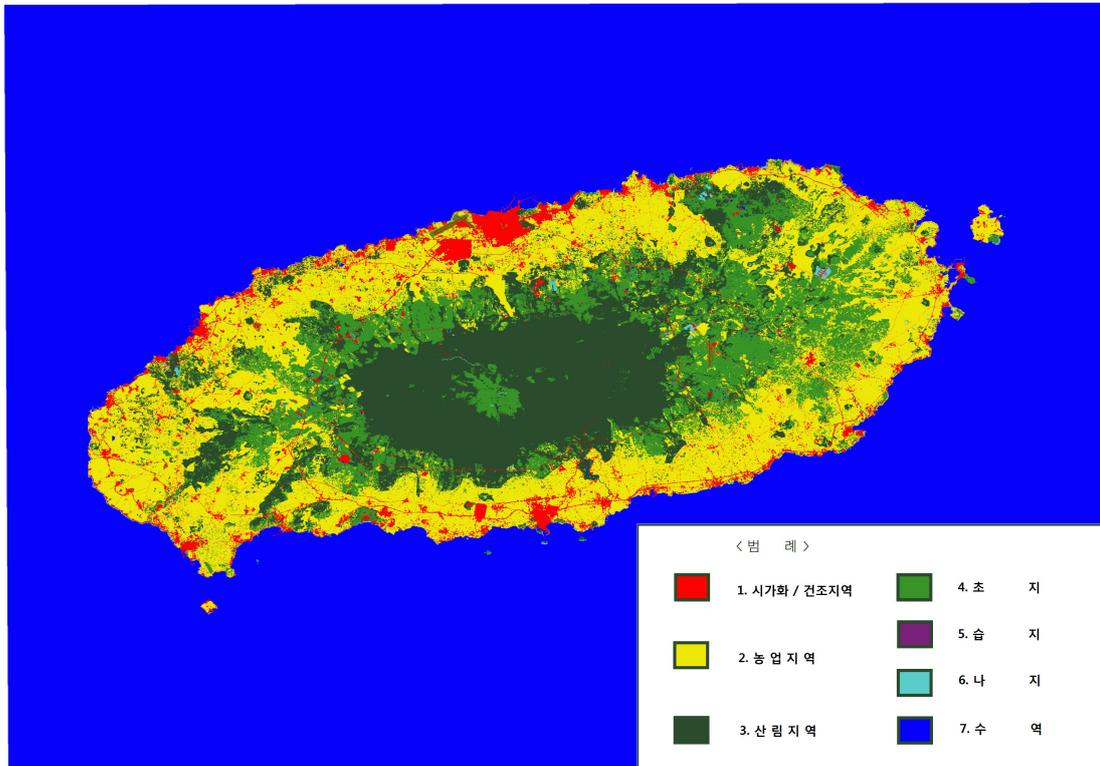


Fig. 8 Land cover map

Table 3 Land cover parameters

Legend	Category no.	Albedo(%)	Z ₀ (m)
시가화 / 건조지역	1	15	1.00
농업지역	2	19	0.07
산림지역	15	12	0.80
초지	9	23	0.05
습지	17	12	0.04
나지	23	17	0.03
수역	16	19	0.001

Table 3는 환경지리정보서비스에서 제공하는 토지피복자료의 범례를 바탕으로 USGS category의 parameter들을 선택하였다. USGS category의 대표적인 값은 Albedo와 roughness length로 Albedo는 빛을 반사하는 정도를 수치로 나타낸 것이며, roughness length는 지표면의 형태에 따라 결정된 거칠기 길이를 말한다.

유럽에서는 지형적인 영향에 의한 roughness length의 범위를 정리하여 The guideline for assigning roughness length value(European Wind Atlas, 1989)^[29]를 발표하였다. 유럽에서 산정된 roughness length는 국내지형에 맞지 않으므로 국내 지역에 적합한 조도계수를 산정할 필요가 있다.^[30] 그러나 아직 해양, 농작지, 농촌마을에 대해서만 연구되어 있으므로 본 연구에서는 일반적으로 WRF 모델에서 사용되는 USGS category에 맞춰서 토지피복자료를 생성하였다.

4. 기상 데이터의 초기 및 경계자료

본 연구에서 사용되는 WRF model의 초기 및 경계 입력자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 GFS(Global Forecast System) 자료를 이용하였다.

GFS 자료는 위·경도 격자 간격이 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 해상도를 가지며 온도, U-Component of Wind speed, V-Component of Wind speed, 상대습도(Relative Humidity)에 대한 자료가 1,000mb에서 10mb까지 26개의 연직층 마다 데이터가 존재하고 있다.

GFS 자료는 하루에 4번(00UTC(Universal Time Coordinated), 06UTC, 12UTC, 18UTC) 재분석된 자료를 NCEP에서 관리하는 FTP 서버에 자료를 업로드 하여 제공하고 있다. 본 연구에서는 18UTC 자료를 가지고 하루 24시간 동안의 기상변환을 모델링하였다.

5. WRF 물리과정

WRF 모델은 모델에 입력되는 초기 및 경계조건을 바탕으로 선택된 물리과정을 기반으로 모델을 수행한다. 그러므로 선택된 물리과정 마다 나오는 결과 값이 다르게 나오므로, 물리과정 선택이 WRF 모델 수행에 중요한 선택사항 중 하나이다. 본 연구에서는 이러한 물리과정을 통한 최적화는 수행하지 않았고, WRF 모델에서 기본적으로 선택된 물리과정을 사용하여 계산을 수행하였다. 다음 Table 4에 선택된 물리과정을 나타낸다.

Table 4 Physical process of WRF model

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

Microphysics에서 선택된 scheme은 WSM6로 WSM5 scheme에서 사라진 (graupel)과정을 추가적으로 포함한 scheme이다. Fig. 9에 WSM6의 flowchart를 묘사하였다. WSM6는 크게 water vapor, cloud water, cloud ice, graupel, rain, snow으로 6가지의 물리과정으로 분류되며 각각의 물리과정은 서로 상호작용의 관계를 이루고 있다.^[31]

Longwave radiation에서 선택된 scheme은 RRTM이다. RRTM은 MM5 모델로부터 사용되어온 물리과정으로써 water vapor, ozone, CO₂에 의해 발생하는 장파과정을 재현하는 scheme이다.^[32] shortwave radiation에서 선택된 scheme은 Dudhia로 1989년에 Dudia의 이론을 기반으로 만들어진 것으로 MM5 모델 때부터 사용된 scheme이다.^[33] Planetary boundary layer는 YSU PBL^[34]로 선택하였으며, surface layer는 YSU PBL과 함께 사용되는 MM5 Monin-Obukhov^[35]을 선

택하였다. 마지막으로 land surface는 간단하게 설계된 5-layer thermal diffusion 을 선택하였다.^[34]

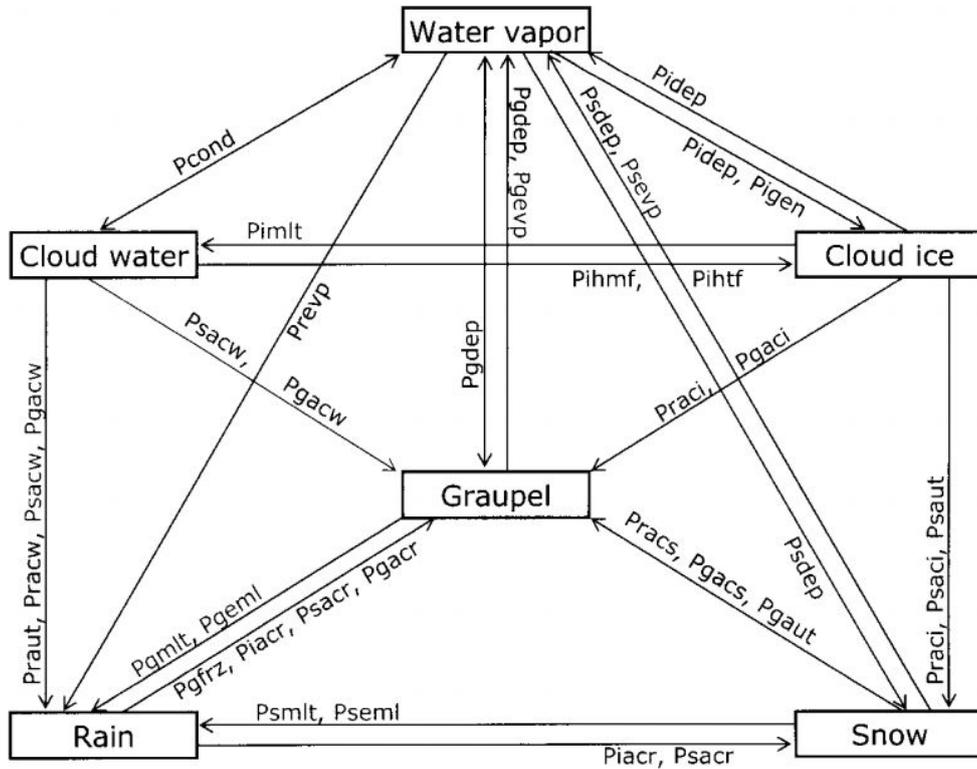


Fig. 9 Flowchart of the microphysics processes in the WSM6 scheme^[31]

6. 하드웨어 구성

본 연구에서 사용되는 WRF 모델의 클러스터 구성은 Fig. 10에 나타내고 있다. Master node 1개와 Slave node 7개로 구성되어 있으며, 대용량 저장장치를 구성할 수 있는 Storage가 탑재되어 있다. 또한 UPS(무정전 전원공급 장치)를 설치하여 전원 차단 시에 안전하게 시스템을 구동 및 종료를 할 수 있다. Fig. 10과 같이 구성된 클러스터 시스템은 WRF 모델과 같은 대규모 병렬처리계산에 적합하도록 구성되어 있다. WRF 모델을 수행하기 위해서 사용된 컴파일러는

PGI complier를 사용하였다.

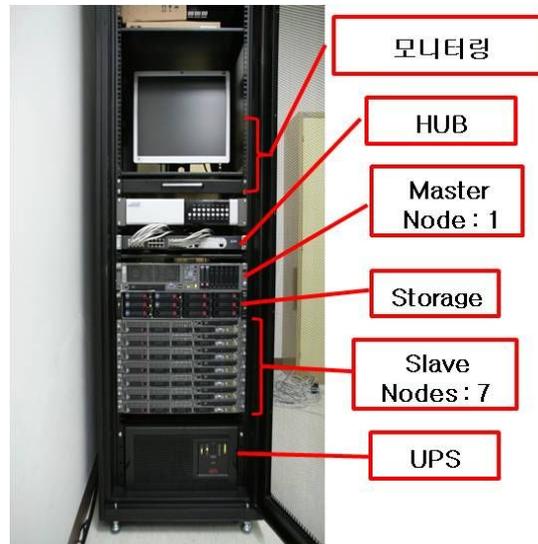


Fig. 10 Parallel computing cluster

7. WRF output data 후처리

WRF에서 나오는 결과 값들은 정리되지 않은 raw data 형식으로 나오기 때문에, 후처리가 필요하다. 그러므로 추출된 결과 값들에 대한 데이터 형식은 다음에 설명되는 과정을 통해 산출하였다. 모든 결과 값들은 10분 간격으로 추출하여 산출하였다.

1) Wind speed

WRF 모델에서는 풍속이 X방향 풍속, Y방향 풍속, Z방향 풍속으로 나오기 때문에 본 연구에서 사용되는 합성벡터인 풍속으로 바꾸기 위해 후처리 계산이 필요하다. X방향은 동서방향, Y방향은 남북방향, Z방향은 대기층의 상하방향을 의미한다. 여기서 실질적으로 필요한 X, Y방향의 풍속만 추출하여 풍속을 식 (1)을 사용하여 구하였다.

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (1)$$

2) Wind Direction

WRF 모델에서는 풍향을 직접적으로 모델링하지는 않는다. 그러므로 위에서 언급한 X방향 풍속과 Y방향 풍속을 가지고 풍향을 산출해야 한다. 식 (2)에 풍향을 산출하는 식을 나타내었다. 결과 값은 degree(°) 값으로 나오게 하여 다른 프로그램에서 쉽게 입력하거나 육안으로 인식할 수 있도록 하였다.

$$\begin{cases} \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right) \times \frac{180}{\pi}, V_x < 0, V_y < 0 \\ \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \times \frac{180}{\pi} + 90, V_x < 0, V_y > 0 \\ \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right) \times \frac{180}{\pi} + 180, V_x > 0, V_y > 0 \\ \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \times \frac{180}{\pi} + 270, V_x > 0, V_y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

3) Geopotential meter^[37]

Geopotential은 지구의 위도와 높이에 따라 변화하는 단위질량당 위치에너지를 정의한 것이다. Geopotential은 어떤 위도에 해당하는 중력에 해수면에서부터 임의의 z까지의 높이를 적분해서 구한다. Geopotential의 식은 다음 식 (3)에 나타내었다.

$$\Psi(z) = \int_0^z g dz \quad (3)$$

WRF 모델에서는 이와 같은 방식으로 Geopotential을 구하여 모델 수행시 변수로 사용되고 있다. 중력가속도 g는 위도에 따라 변하기 때문에

Geopotential meter는 식 (4)에서 나타낸 것과 같이, Geopotential에서 지구 평균 중력 g_0 을 나눠주면 Geopotential meter를 구할 수 있다.

$$Z = \frac{\Psi(z)}{g_0} \quad (4)$$

Ψ : geopotential

g_0 : the standard gravity at mean sea level

Geopotential meter는 평균 해수면을 기준으로 기하학적인 높이를 말한다. 실질적으로 Geopotential meter는 기하학적 높이를 의미하는 것이 아니고 비에너지(specific energy)의 단위를 의미하고 있다. 그러나 이렇게 정의된 비에너지는 수치적으로 미터로 표시되는 기하학적 높이와 근접하도록 정의되고 있다. Geopotential meter는 추후 풍속 보정 시 이용된다.

4) 풍속 보정

WRF 모델에서 수직층 분석 높이를 Eta coordinate에^[36] 준하여 설정되었지만, 압력분포가 지속적으로 변화하기 때문에 본 연구에서 분석하고자 하는 기하학적 높이가 변하게 된다. 그러므로 WRF에서 나온 결과 값은 기하학적으로 Eta coordinate에 설정된 정확한 높이가 아니다.

본 연구에서는 풍속 보정을 하기 위해서 Geopotential meter를 구해서 모델에서 계산되는 기하학적 높이를 구한 후, 식 (5)에 나타낸 멱법칙(power law)^[38]을 이용하여 분석하고자 하는 높이의 풍속으로 보정하였다.

$$V_z = V_h \left(\frac{z}{h} \right)^\alpha \quad (5)$$

V_h : the known wind speed at a reference height h

α : the exponent

풍속 보정은 각각의 10분 간격 데이터마다 계산하였다.

5) 후처리 프로그램 구현

WRF output data의 후처리 과정을 적용하기 위해서 후처리 프로그램을 구현하였다. 프로그램 언어는 Fortran 90을 사용하였으며, 각각 처리하는 프로그램 간의 연결은 리눅스의 셸 스크립트를 통해 연결하였다.

후처리 프로그램에 대한 flow chart는 Fig. 11에 나타내었다. 후처리 프로그램은 처음에 WRF output data에서 분석할 지점에 대한 데이터를 추출한다. 두 번째로는 WRF 모델에서의 시간은 UTC(Universal Time Coordinated)를 기준으로 하기 때문에 이를 KST(Korea central Standard Time)로 변경하는 작업을 한다. KST는 UTC보다 9시간 빠른 동경 135도를 기준으로 하고 있다. 그 다음은 후처리 프로그램의 가장 중요한 부분인 Wind speed, wind direction, geopotential meter를 구하여, 최종적으로 풍속을 보정한다. 후처리 프로그램은 WRF가 모델링이 끝날 때마다 자동적으로 실행하도록 연결하여, 편의성 또한 구현하였다.

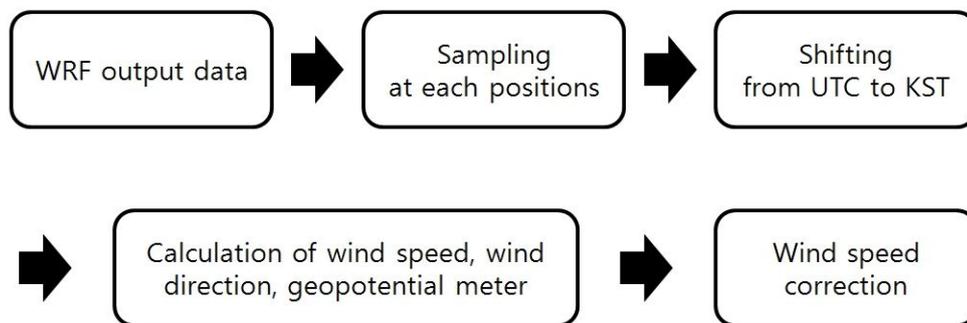


Fig. 11 Flow chart of postprocessor

Ⅲ. 연구방법

1. 분석지점 선정

분석지점은 제주도를 중심으로 WRF 기상예측자료의 데이터 기간과 기상탑 데이터 기간이 서로 일치되는 지점을 선정하였다. 그리고 선행 연구된 인근 기상탑을 사용하여 추정된 방법을 구현하기 위해서 기상탑 지점은 두 지점이 선정되었다. Fig. 12에 분석 지점을 그림에 표시하였다.



Fig. 12 The positions in the Northeastern part of Jeju island for this study

선정된 지점에 대한 분석기간은 2011. 1. 1 ~ 2011. 12. 31이다. 예외적으로 평대 기상탑 데이터만 8월 센서고장으로 인해 데이터 손실이 발생하였다. 그러므로 평대 기상탑 데이터에서 8월(8.1 ~ 8.31) 데이터는 제외하고 사용되었다. 분석된 기상탑의 높이는 지면으로부터 60m이다.

2. 분석방법

본 연구에서는 기준이 되는 데이터를 우도 기상탑과 평대 기상탑으로 선정하였다. 수치기상모델이 아무리 뛰어나도 실측에 의한 데이터 보다는 정확할 수는 없기 때문이다. WRF 모델에서 나온 결과 값을 기존 선행된 연구와 비교하기 위해서 선행된 연구를 본 연구 환경에 맞게 재구현하여 비교·분석하였다.

1) 선행연구 구현

기존 선행된 방법을 구현하기 위해서 우도 기상탑 데이터를 이용하여 평대 기상탑 지점을 추정하였고 평대 기상탑 데이터를 이용하여 우도 기상탑 지점을 추정하였다. 선행된 연구에서는 WindPRO(WAsP solver)를 사용하였으므로 본 연구에서도 WindPRO(WAsP solver)를 사용하여 선행 연구를 재구현하였다. 다음 Table 5에 위와 같은 사항을 나타내었다.

Table 5 Prediction positions and using data

Prediction Position	Prediction using Met.Mast data of another positions	
	Met.Mast	Distance
Udo Met.Mast	Pyeongdae Met.Mast	10,202m
Pyeongdae Met.Mast	Udo Met.Mast	10,202m

WindPRO에서 사용된 roughness map과 contour map은 WRF 모델에서 사용된 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도와 환경지리정보서비스에서 제공하는 토지피복자료를 바탕으로 입력하였다. Fig.13과 Fig.14에 나타난 그림은 WindPRO에 적용한 contour map과 roughness map이다. Table 6에 WindPRO에 적용한 거칠기 길이를 나타내었다. 이는 WRF 모델에 입력된 거칠기 길이와 같다.

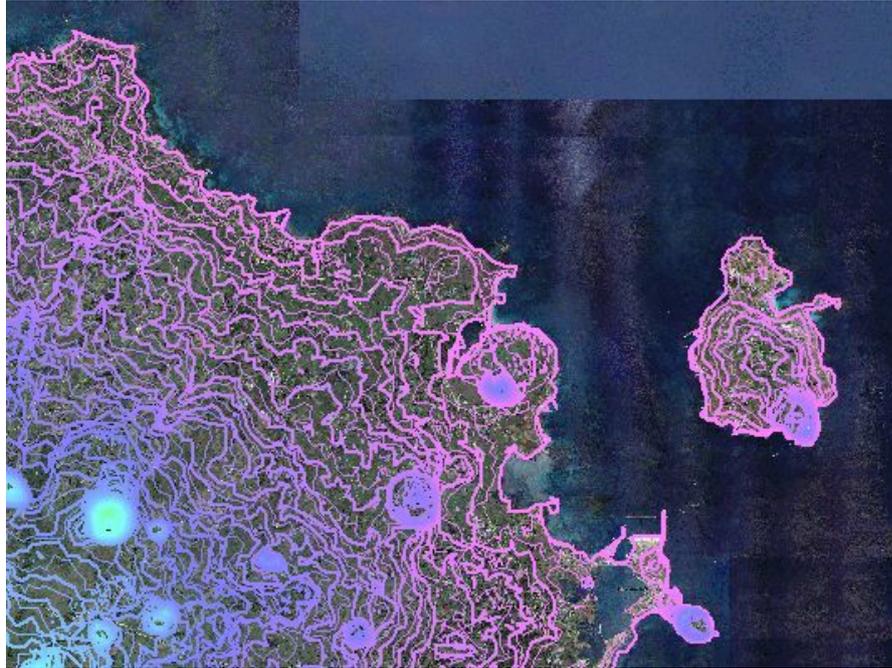


Fig. 13 Contour map in WindPRO

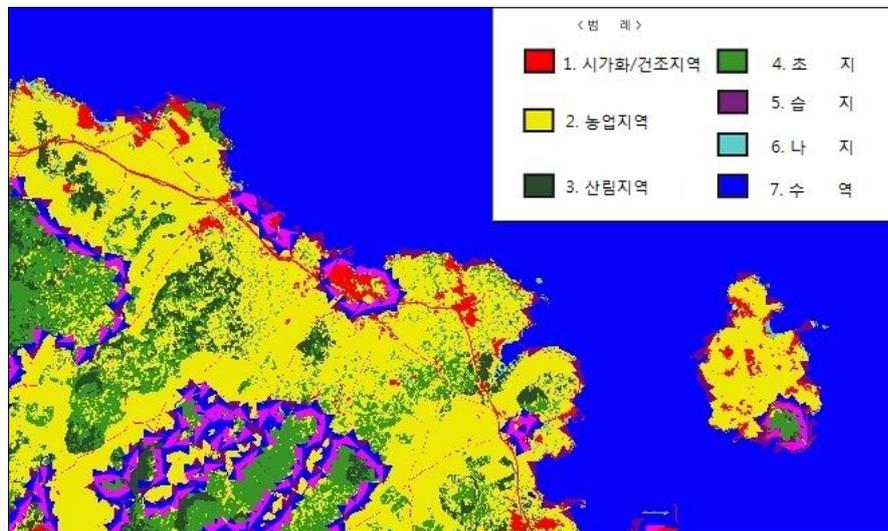


Fig. 14 Roughness map in WindPRO

Table 6 Using roughness length

Legend	$Z_0(m)$
시가화 / 건조지역	1.00
농업지역	0.07
산림지역	0.80
초 지	0.05
습 지	0.04
나 지	0.03
수 역	0.001

2) WRF 모델을 이용한 기상예측자료 생성

WRF 모델에서는 총 1년간의 풍속, 풍향을 예측하기 위해서 초기 및 경계 자료인 GFS 데이터를 기반으로 24시간 모델 예측을 하여 총 365번의 모델을 수행하였다. 모델 수행에서 나온 WRF output data는 후처리 프로그램을 통해 우도 기상탑 지점과 평대 기상탑 지점에서의 최종 보정된 풍속, 풍향을 추출하였다. WRF 모델에서 최종적으로 나온 데이터 배열방법을 Fig. 15에 나타내었다.

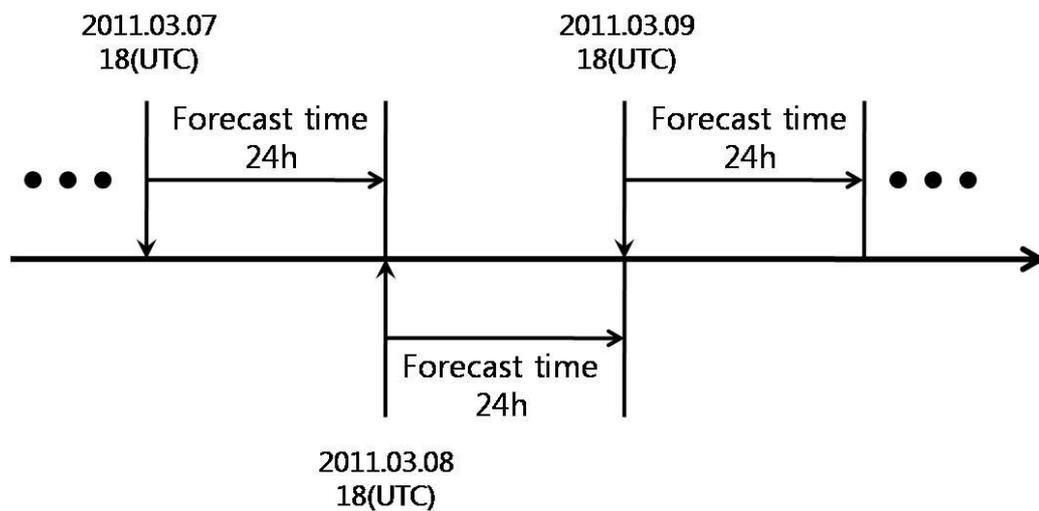


Fig. 15 Example of arranged data in time domain

3. 분석기법

1) Weibull distribution

기본적으로 풍황 분석 시 가장 많이 사용되는 분석기법인 Weibull distribution 적합방식을 사용하였다. Weibull distribution은 식 (6)에 나타내었다.^[38,39]

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (k > 0, V > 0, c > 1) \quad (6)$$

WindPRO에서는 Weibull distribution의 파라미터 값인 형상계수 k (shape parameter)와 척도계수 c (scale parameter)를 구하기 위해 모멘트법(method of moments)을 사용하여 구한다.^[8] 모멘트법은 다른 방법에 비해 계산시간(computing time)이 길지만, 정확도 측면에서는 우수하다. 모멘트법으로 형상계수 k 와 척도계수 c 를 구하는 식을 식 (7), (8), (9)에 표현하였다.^[8,39,40]

$$V_{m,b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^b \quad (7)$$

$$\frac{V_{m,2}}{V_{m,1}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (8)$$

$$c = \frac{V_{m,2}}{V_{m,1}} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (9)$$

식 (8)에서 수치해석을 통해 형상계수 k 를 구하고, 구한 형상계수 k 를 (9)식에 대입하여 척도계수 c 를 구한다. 이렇게 구한 형상계수 k , 척도계수 c 를 Weibull distribution에 대입하여 실측데이터와 예측데이터를 그래프로 나타내었다.

2) Wind Rose

Wind rose는 측정한 바람에 대한 자료를 바람의 방향에 따라 빈도수를 방사상의 그래프로 나타낸 것이다. 일반적으로 12등분이나 16등분으로 표현하며 높은 확률로 부는 바람의 방향을 알기 위해 쓰이고 있다. 본 연구에서는 22.5° 간격으로 16등분된 wind rose로 표현하였다.

3) Annual Energy Production

AEP(Annual Energy Production)는 풍력발전기에서 연간 발전량을 산출하는 것으로 풍력발전단지의 경제성을 좌우하는 가장 중요한 인자이다. AEP는 연간 8,760시간에 대해서 실측 데이터를 통해 산출된 weibull distribution과 풍력발전기 제작사에서 제공하는 Power curve를 가지고 계산을 한다. 즉 AEP는 weibull distribution에 따라 변화하는 결과 값이므로 AEP를 통해 weibull distribution의 형상계수 및 척도계수의 차이에 의한 편차를 알 수 있다. 식 (10)^[38]에 AEP를 산출하는 식을 표현하였고, Fig. 16에 본 연구에서 AEP를 산출하기 위해 사용된 GE 900s의 power curve를 그래프로 나타내었다.

$$AEP = \sum_{i=1}^n (P(V_i) \times f(V_i) \times 8,760) \quad (10)$$

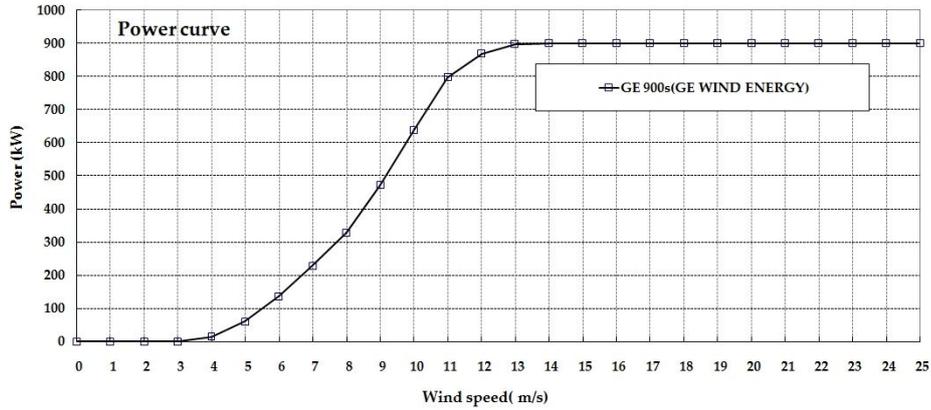


Fig. 16 Power curve of GE 900s(GE WIND ENERGY)

본 연구에서 예측하는 높이는 60m이므로, 실제로 허브높이가 60m인 풍력발전기를 선정하였다. GE 900s는 시동풍속이 4m/s이고, 정격풍속은 14m/s, 중단풍속은 25m/s인 풍력발전기이며 정격발전량은 900kW이다.

4) 통계적 방법

각 데이터마다 추정 정확도가 어느 정도인지 확인하기 위해서 통계적인 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용되는 식은 (11)~(15)에 나타내었다.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (F_t - A_t) \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |F_t - A_t| \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{F_t - A_t}{A_t} \right| \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (F_t - A_t)^2}{n}} \quad (14)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{\sum_{t=1}^n (|F_t - \bar{A}| + |A_t - \bar{A}|)} \quad (15)$$

A_t 는 실측데이터이고 F_t 는 예측데이터이다. Bias값이 양의 경우에는 과대평가, 음의 경우에는 과소평가를 나타낸다. MAE (Mean Absolute Error)와 RMSE(Root Mean Square Error)는 실측값과 예측값 사이의 오차값을 나타내고, MAPE(Mean Absolute Percentage Error)와 IOA(Index of Agreement)는 실측값과 예측값의 일치도를 나타내는 것으로 MAPE값이 0%에 가까울수록 실측값에 가까운 것을 의미하고, IOA값이 1에 가까울수록 실측값에 가까운 것을 의미한다.

IV. 연구결과

본 연구에서는 첫 번째로 평대와 우도지점에서 측정된 실측데이터와 WRF 모델에서 나온 기상예측자료를 통계적인 비교방법을 사용해서 결과를 도출하였다. 두 번째로는 위의 결과를 내포하고 있는 기상예측자료를 실제 예비타당성 조사에서 비교하는 방법으로 결과를 도출하였다. 또한 기존 선행연구 방식을 구현하여 WRF 모델을 사용한 결과와 기존 선행연구를 사용한 결과를 비교하였다. 선행연구를 구현하기 위해서 사용된 프로그램은 WindPRO(WAsP solver)이다.

선행연구를 구현할 시 사용된 기상탑 데이터는 각 해당 높이 데이터를 이용하여 동일한 높이의 풍황을 추정하였다. 즉, 60m 높이의 데이터를 이용하여 다른 지점의 60m 높이의 풍황을 추정하였다.

사용된 데이터의 기간은 우도 기상탑 데이터는 2011. 1. 1 ~ 2011. 12. 31이고 평대 기상탑 데이터는 8월을 제외한 2011. 1. 1 ~ 2011. 12. 31이다. 평대 기상탑은 8월에 센서고장으로 인해 데이터가 손실되었다. 그러므로 본 연구에서는 제외하고 비교 및 분석하였다. 데이터의 저장 시간은 기상탑 및 모델 데이터 둘 다 10분 간격이다.

1. 기상예측자료와 실측데이터간의 통계적 비교

기상예측자료와 실측데이터의 풍속에 대한 통계적인 결과를 Table 7에 나타내었다. Table 7를 보면 높이별로 평대와 우도지점에 대해서 비슷한 통계결과를 보여주고 있다. Bias 결과를 보면 평대가 양의 결과를 보여주고 있어 과대평가되었고, 우도는 음의 결과를 보여주고 있어 과소평가되었다는 것을 알 수 있다. MAE는 1.7 ~ 1.9 사이의 결과를 보여주고 있고 RMSE는 2 ~ 2.5 사이의 결과가 나왔다. 데이터간의 일치도를 보여주는 IOA는 약 0.7의 값을 보여주고 있다. 그리고 비록 평대 MAE와 우도 MAE값이 비슷하게 나왔지만 평대 MAPE가 우도 MAPE보다 높게 나왔다. 이는 평대가 우도에 비해 저 풍속구간에서 오차가 크게 나타난 경우가 많다는 것을 의미한다.

Table 7 Statistical results for Pyeongdae and Udo Met.Mast

Height	Function	Pyeongdae	Udo
60m	Bias	0.2483	-0.3575
	MAE	1.7854	1.8143
	MAPE	48.2726	35.7100
	RMSE	2.4359	2.4012
	IOA	0.7066	0.7128
50m	Bias	0.3796	-0.2766
	MAE	1.7780	1.7918
	MAPE	54.7493	37.6444
	RMSE	2.4160	2.3698
	IOA	0.7031	0.7132
40m	Bias	0.3567	-0.2648
	MAE	1.7299	1.7402
	MAPE	53.3716	35.0819
	RMSE	2.3429	2.2989
	IOA	0.7042	0.7163

2. 데이터 종류별 풍향분석 결과

1) 평대 기상탑 지점 풍향분석

(1) Weibull distribution, Wind Profile 비교 분석

실측 데이터인 평대 기상탑과 예측된 데이터를 weibull distribution으로 표현하여 Fig. 17에 나타내었고, Table 8에 각각 weibull distribution의 형상계수 k , 척도계수 c 와 연평균풍속을 나타내어 비교하였다.

Fig. 17을 보면 WRF 예측 데이터와 우도 기상탑데이터를 사용하여 추정된 weibull distribution은 실측데이터의 weibull distribution과 육안적으로 비슷한 형태를 보여주고 있으나 우도 기상탑데이터 경우가 WRF 예측 데이터보다 고풍속을 더 많이 추정하였다.

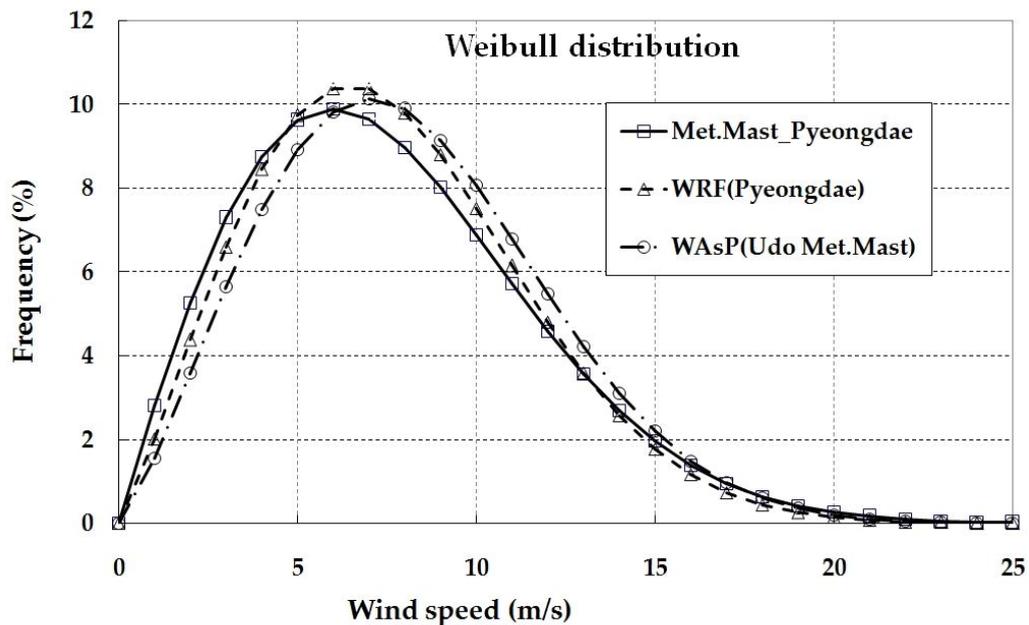


Fig. 17 Comparison of the measured and the predicted data of weibull distribution at Pyeongdae

Table 8 Shape parameter, scale parameter, and annual mean wind speed at Pyeongdae

DATA	Shape parameter (k)	Scale parameter (c)	Annual mean wind speed(m/s)
Met.Mast Pyeongdae	1.97	8.59	7.62
WRF (Pyeongdae)	2.16	8.65	7.66
WAsP (Udo Met.Mast)	2.24	9.16	8.11

Table 8에서 나타난 연평균풍속을 보면 우도 기상탑데이터를 이용한 WAsP 추정치 실측데이터 보다 과대평가 되었다. 이는 우도 기상탑데이터의 연평균풍속이 평대 기상탑 보다 비교적 높은 풍속(8.65m/s)을 가지고 있고 우도 기상탑과 평대 기상탑 사이의 지형적 영향과 거칠기 영향이 적으므로 높게 추정된 것으로 사료된다.

Fig. 18은 각 추정방식에 따른 평대 기상탑에 대한 wind profile을 보여주고 있다. WRF 모델 예측 데이터가 가장 실측데이터와 비슷하게 보여주고 있고, 비록 전체적인 평균풍속은 다소 상이한 결과를 보여주고 있지만 다른 추정결과들은 wind profile의 전체적인 형태와 비슷하게 나타나고 있다. 즉, 각 데이터 종류마다 평균풍속 추정은 과대평가 되었지만, 전체적인 wind profile의 경향은 실측데이터와 유사하게 나왔다.

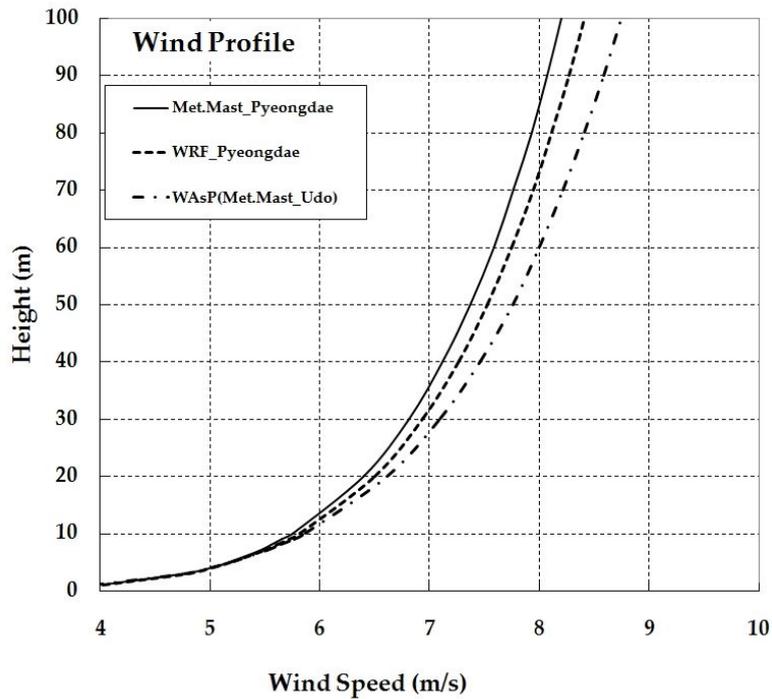


Fig. 18 Comparison of the measured and the predicted data of wind profile at Pyeongdae

Table 8에서 나온 shape parameter와 scale parameter를 가지고 AEP를 산정한 결과를 Table 9에 나타내었다.

Table 9 Comparison of AEP at Pyeongdae

DATA	Met.Mast	WRF	WAsP
AEP(MWh)	3200.65	3112.49	3438.88

AEP 또한 평균풍속에서 보인 결과와 같이 WRF가 3112.49MWh으로 가장 근접한 값을 보여주었고 그 다음으로는 우도 기상탑이 3438.88MWh로 과대평가가 되었다. 즉, WRF가 실측데이터에 근접하게 weibull distribution을 추정하고 있다는 것을 알 수 있었다.

(2) Wind Rose 비교 분석

Fig. 19에서 16등분으로 분할된 wind rose를 나타내었다. 우도 기상탑을 이용한 추정은 대체로 실측데이터의 wind rose와 비슷한 형태를 보여주고 있고, WRF 기상예측자료는 다소 상이한 형태를 보여주고 있다. 그러나 기상예측자료 결과에서 육안으로 주풍향에 대한 판단은 가능하다고 사료된다.

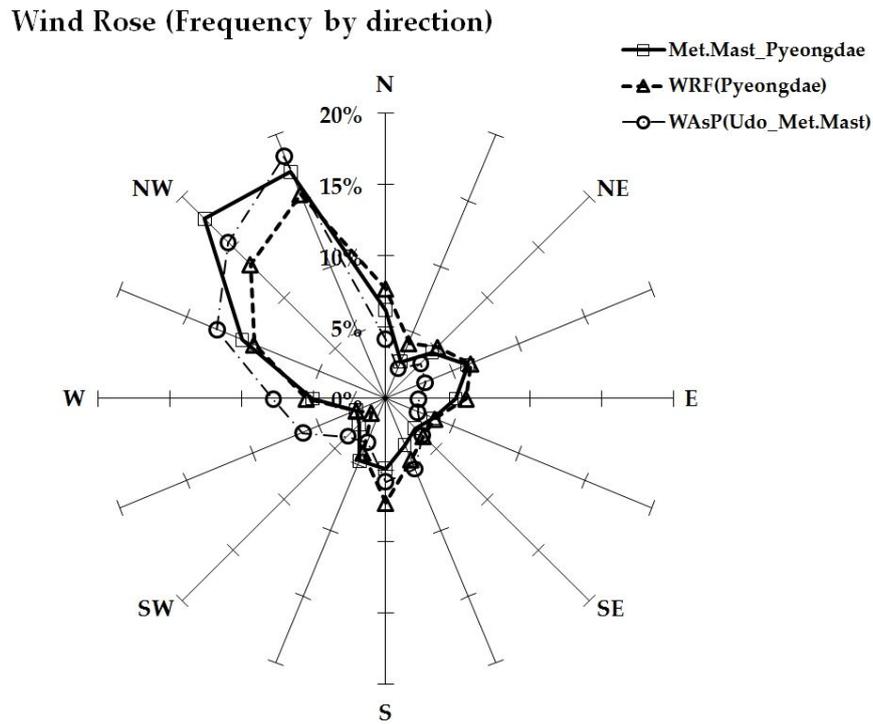


Fig. 19 Comparison of the measured and the predicted data of wind rose at Pyeongdae

(3) 월별 평균풍속 비교 분석

WindPRO에서는 평균풍속을 월별로 계산하지 않으므로 실측데이터와 월별로 평균풍속을 비교할 수 없다. 그러나 WRF 모델에서는 10분 간격으로 데이터 결과가 나오기 때문에 실측데이터와 월별로 평균풍속을 비교·분석 할 수 있다.

Fig. 20에 평대 기상탑데이터와 WRF 기상예측자료의 월별 평균풍속을 그래프로 나타내었다. 육안으로 판단해도 전체적으로 비슷한 경향을 보여주고 있다. 월별 평균풍속에 대한 MAPE 값은 7.25%를 보여주고 있고, RMSE 값은 0.701m/s로 월별로 약 0.7m/s의 오차를 보여주고 있다.

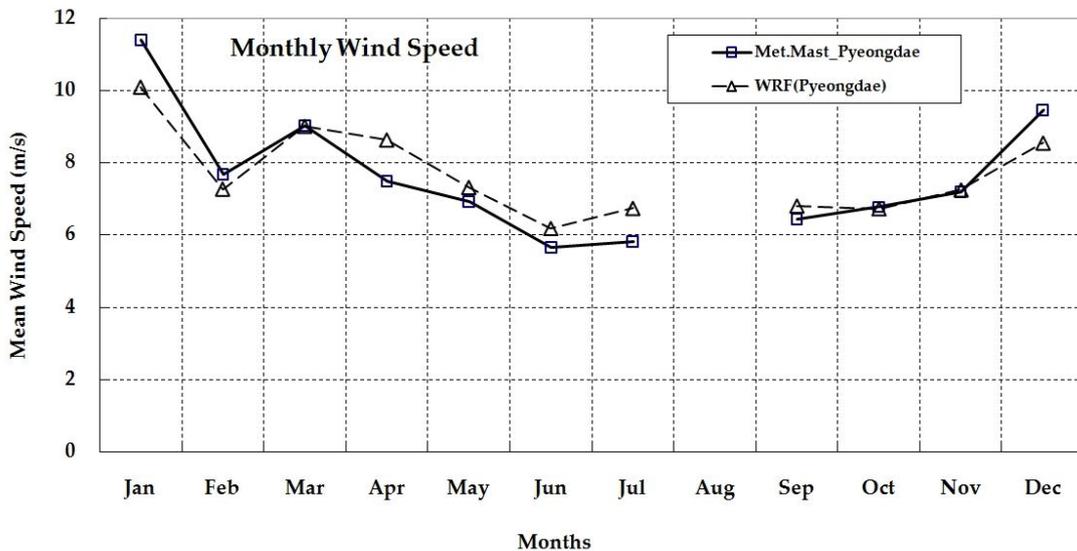


Fig. 20 Comparison of the measured and the prediction data of monthly wind speed at Pyeongdae

2) 우도 기상탑 지점 예측

(1) Weibull distribution, wind profile 비교 분석

실측 데이터인 우도 기상탑과 예측된 데이터를 weibull distribution으로 표현하여 Fig. 21에 나타내었고, Table 10에 각각 weibull distribution의 형상계수 k , 척도계수 c 와 연평균풍속을 나타내어 비교하였다.

Fig. 21을 보면 평대지점의 경우와 달리 육안으로는 판단하기 힘들 정도로 비슷한 형태를 갖추고 있다. Table 10에서 나타난 연평균풍속을 보면 두가지 방법들이 전체적으로 과소평가 되었다. 우도 기상탑 지점 풍속추정은 WRF 예측 데이터는 8.11m/s로 가장 과소평가된 결과를 보여주었다. WAsP일 경우는 8.30m/s로 WRF 예측 데이터 보다 근접한 결과가 나왔다.

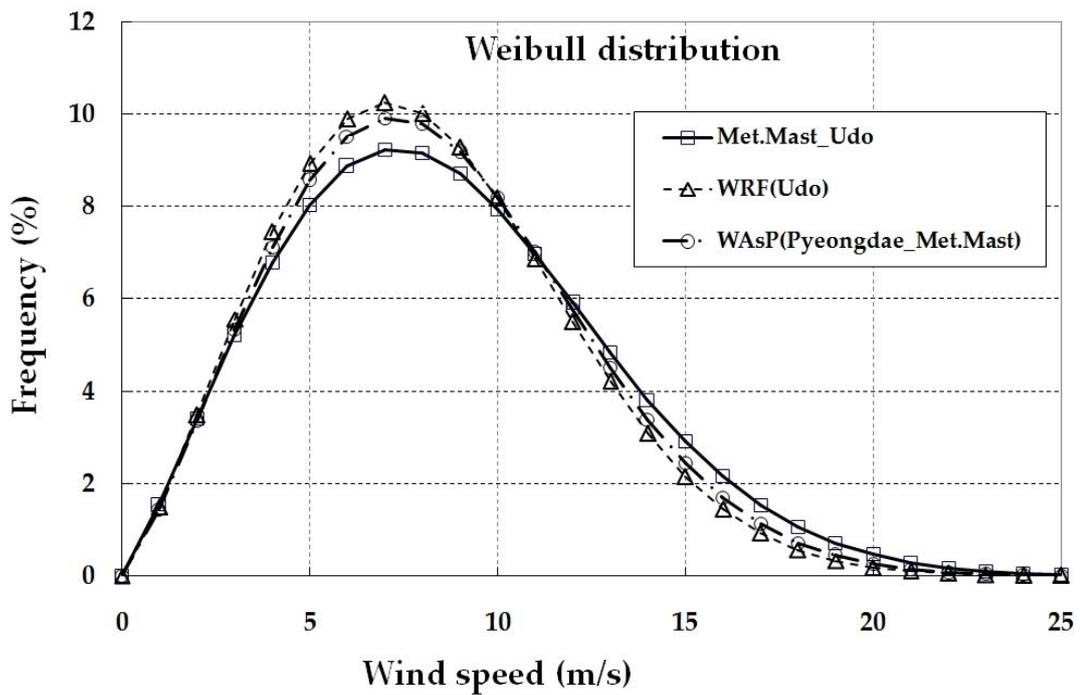


Fig. 21 Comparison of the measured and the prediction data of weibull distribution at Udo

Table. 10 Shape parameter, scale parameter and annual mean wind speed at Udo

DATA	Shape parameter (k)	Scale parameter (c)	Annual mean wind speed
Met.Mast Udo	2.16	9.77	8.65
WRF (Udo)	2.27	9.15	8.11
WAsP (Pyeongdae)	2.25	9.39	8.30

Table 10에 나온 shape parameter와 scale parameter를 이용하여 Table 11에 산출된 AEP를 나타내었다. WAsP이 3580.76MWh로 실측데이터에 근접한 결과를 보여주었다. 이는 WAsP의 shape parameter와 scale parameter가 가장 잘 추정하고 있다는 의미이다.

Table. 11 Comparison of AEP at Udo

DATA	Met.Mast	WRF	WAsP
AEP(MWh)	3775.11	3437.52	3580.76

Fig. 22을 보면 위의 평대 결과와 다른 결과를 보여주고 있다. WRF 모델은 실측데이터의 wind profile과 비슷하게 올라가는 것을 볼 수 있다. 그러나 WAsP의 wind profile은 실측데이터보다 급하게 풍속이 증가하면서 대략 90m 지점에서 접하게 된다.

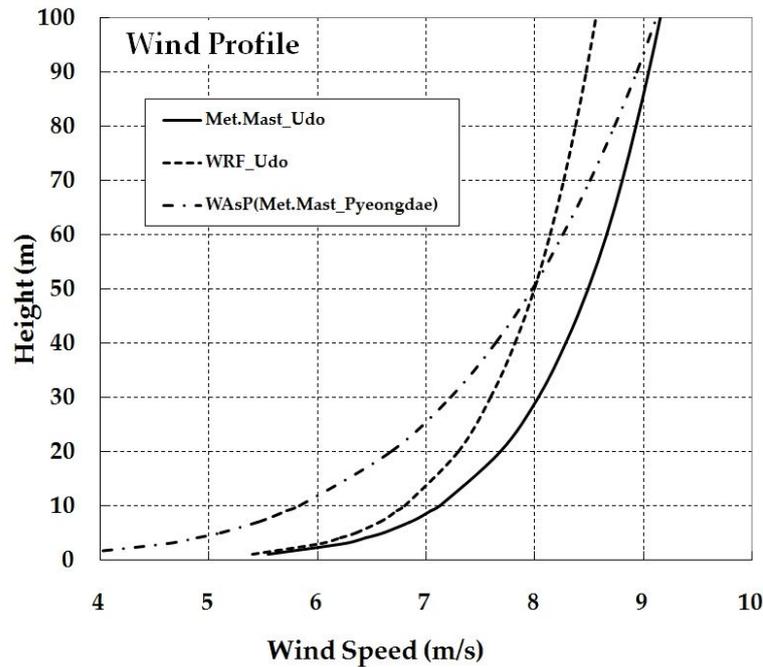


Fig. 22 Comparison of the measured and the predicted data of wind profile at Udo

Table. 12 The power law exponent by each prediction way at Udo

DATA	Udo Met.Mast	WRF	WAsP
exponent α	0.109	0.100	0.194

Table 12에 나타난 멱지수를 보면 WAsP이 실측데이터 보다는 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이는 WindPRO에 입력된 roughness length가 실측데이터에 의한 roughness length 보다 상대적으로 큰 값이 입력되어서 수행되었기 때문이다. 그러나 이러한 부분을 수정하기 위해서는 실측데이터의 비교가 절대적으로 필요할 뿐만 아니라 roughness length를 정확히 추정하더라도 Fig. 22에 있는 WRF 모델의 wind profile에서 보이는 결과처럼 오히려 실측데이터의 풍속보다 낮은 풍속으로 예측될 수도 있다. WRF 모델인 경우에는 비록 실측데이터와 비슷한 멱지수를 보여주고 있지만, 전체적으로 풍속이 낮게 평가되고 있어 오차율이 다른 경우보다 높게 평가되고 있다. 이는 우도지

역이 1km × 1km의 격자간격으로 지형을 구성할 시 지형고도가 제대로 반영이 안 되어 실제보다 해석상의 지형고도가 낮아지기 때문이라고 사료된다.

(2) Wind Rose 비교 분석

Fig. 23에 우도 기상탑 지점에 대한 wind rose를 각각의 예측방법에 따라 16등분으로 표현하였다. 전체적으로 wind rose는 비슷한 형태를 보여주고 있으나 WRF 모델에서는 주풍향에 대해서는 낮게 평가되고 있다. 그러므로 단순히 주풍향 판단에 있어서는 독자적인 WRF 모델 결과만으로 판단이 가능하다고 사료되나, 풍향별 에너지밀도와 같은 방향별 빈도수가 중요한 분석에서는 다른 풍황 자료와 함께 분석하는 것이 정확한 분석결과가 나올 것으로 사료된다.

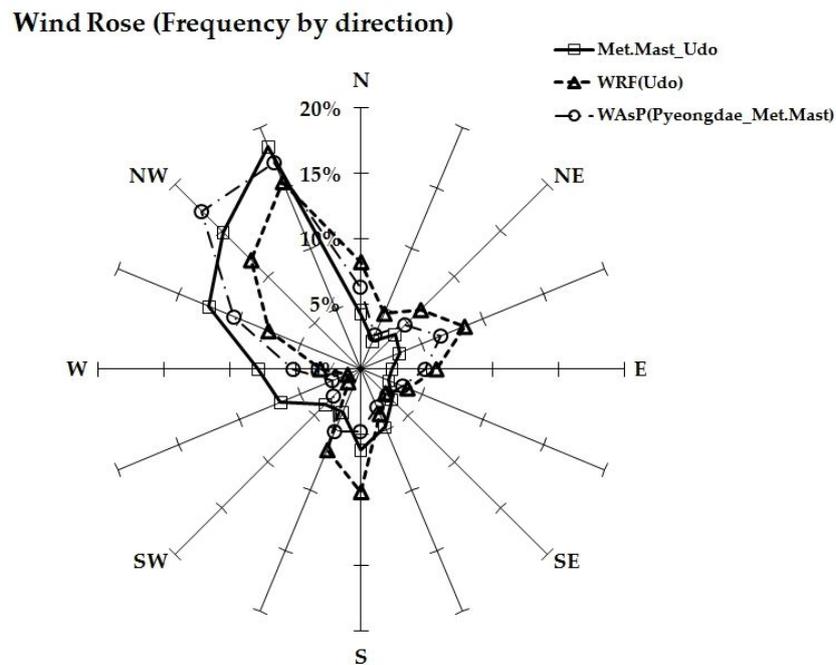


Fig. 23 Comparison of the measured and the predicted data of wind rose at Udo

(3) 월별 평균풍속 비교 분석

Fig. 24에 우도 기상탑 실측데이터와 WRF 모델에서 예측한 데이터의 월별 평균풍속을 그래프로 나타내었다. 육안으로 판단해도 전체적으로 비슷한 경향을 보여주고 있다. MAPE 값은 6.77%로 연평균풍속 오차율과 비슷한 결과이며, RMSE 값은 0.724m/s으로 월별로 약 0.7m/s의 오차를 보여주고 있다.

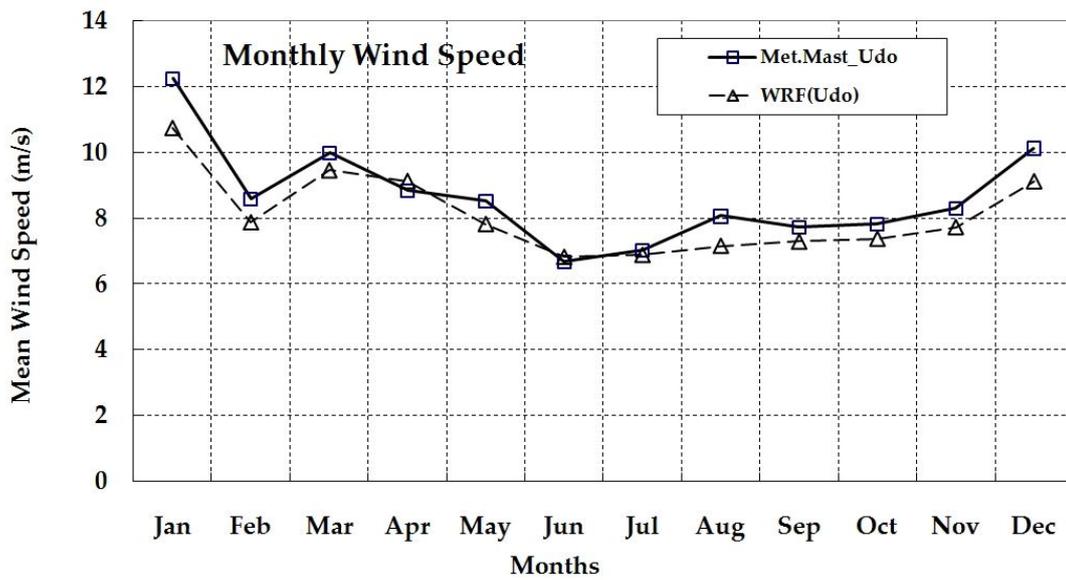


Fig. 24 Comparison of the measured and the prediction data of monthly wind speed at Udo

V. 결 론

본 연구에서는 WRF 기상예측자료를 사용하여 풍황분석을 할 경우 분석된 결과가 타당한지를 살펴보았다. 분석대상지역은 제주도 북동부지역인 평대와 우도이며, 풍황분석은 측정 데이터와 비교하여 통계적인 분석을 하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) WRF 기상예측자료를 가지고 풍력발전단지 예비타당성과 같이 풍황 분석을 해본 결과 실측데이터를 가지고 풍황분석을 한 경우와 비슷한 경향을 보여주었다. 이에 따라 WRF 기상예측자료를 이용한 풍황분석이 어느정도 가능성을 밝혔다.
- (2) WRF 기상예측자료를 이용해서 산출된 연평균풍속 및 월별평균풍속은 실측데이터와 비슷한 결과를 보여주었다. 이는 실제로 10분 간격에 대한 풍속 추정은 다소 낮은 정확도를 보여주고 있지만 해당지역에 대한 전체적인 풍황특성은 잘 나타내고 있다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구에서는 제주도 북동부지역에서 평대와 우도지점에 대해서만 비교를 하였으므로, 다른 지역에 대한 추가적인 타당성 연구가 진행되어야 한다.

VI. 참고문헌

- [1] 김경보, 양경부, 박윤호, 문창은, 박정근, 허종철, “제주지역 풍력발전량 실시간 감시 시스템 구축에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 30, No. 3, 2010.
- [2] 김경보, 박윤호, 박정근, 고경남, 허종철, “기상청 MOS 예측값 적용을 통한 풍력 발전량 예측 타당성 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 30, No. 2, 2010.
- [3] 박윤호, 김경보, 허수영, 이영미, 허종철, “제주지역 바람자료 분석 및 풍속 예측에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 30, No. 6, 2010.
- [4] 김현구, 이영섭, 장문석, 경남호, “월령단지 풍력발전 예보모형 개발에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 26, No. 2, 2006.
- [5] 김현구, 이영섭, 장문석, “제주도 일단위 풍력발전예보 모형개발을 위한 군집 분석 및 기상통계모형 실험”, 한국환경과학회지, 제19권, 제10호, 1229-1235, 2010.
- [6] 황미영, 김성호, 윤은일, 김광득, 류근호, “Power Ramp Rate를 이용한 풍력 발전량 예측모델 구축”, 한국컴퓨터학회 논문집, 제17권, 제1호, 2012.
- [7] H. P. Frank et al., “The Numerical Wind Atlas - the KAMM/WAsP Method”, Risoe National Laboratory, 2001.
- [8] EMD. “WindPRO 2.7 User Guide 3. edition”, 2010.
- [9] Risoe National Laboratory, WAsP 9 help facility, Modelling with WAsP, 2007.
- [10] M. Brower, J.W. Zack, B. Bailey, M.N. Schwartz, D.L. Elliott. “MESOSCALE MODELING AS A TOOL FOR WIND RESOURCE ASSESSMENT AND MAPPING”, AMS ANNUAL MEETING -CD-ROM EDITION-, Vol. -, No. 84, 2004.
- [11] 石田孟. “非線形風況予測モデルのMASCOTの発電とその実用化”, 特集 複雑地形上の風況予測法, ながれ 22, pp. 287-396, 2003.

- [12] A. Yamaguchi, T. Ishihara, Y. Fujino, "Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. of Wind ENG. Indus. Aerodyn., Vol.91, pp.247-264, 2003.
- [13] H. Sukegawa, T. Ishihara, A. Yamaguchi, Y. Fukumoto, "An Assessment of Offshore Energy Potential Using Mesoscale Model", Proc. of EWEC 2006, 2006.
- [14] D. Munoz-Esprza, J. van beeck, B. Canadillas, "Impact of turbulence modeling on the performance of WRF model for offshore short-term wind energy applications", 13th International conference on wind engineering, 2011
- [15] D. Munoz-Esparza, "Forecasting the Diabatic Offshore Wind Profile at FINO1 with the WRF Mesoscale Model", DEWI magazin, no. 40, 2012.
- [16] J. Whale, T.J. Lyons, H-M. Dreher, D. M. Chand, "Investigating the use of a mesoscale model as part of a feasibility study for a rooftop wind system", 3rd International Solar Energy Society Conference, 25-28, 2008
- [17] 황윤석, 이원선, 백인수, 유능수. "풍황자원 예측시 기상청 풍황자료의 유효성", 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제29권 B호, pp. 181-186, 2009.
- [18] 김영찬, 정진화, 이용채, 전중환, 한경섭, 김용환. "전남지역 남해안 풍력자원 조사 연구", 한국신·재생에너지학회, 추계학술대회논문집, pp. 281-285, 2006.
- [19] 오현석, 고경남, 허종철. "제주 북동부지역을 대상으로 한 WindPRO의 예측 성능평가", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 29, No. 2, pp. 22-30, 2009.
- [20] 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순. "한반도해역의 해상 풍력 자원 평가", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 2, pp. 35-41, 2003.
- [21] 김병민, 김현기, 우재균, 백인수, 유능수. "해상풍력자원 예측을 위한 NCAR 데이터 적용 타당성 연구", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 1, pp. 1-7, 2012.
- [22] 김현구, 황효정, "국가바람지도 및 국가지리정보에 의한 국내 해상풍력단지 개발계획의 비교분석", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 30, No. 5, 2010.

- [23] 김현구, 송규봉, 황선영, 윤진호, 황효정, “국가바람지도 및 지리정보시스템 기반의 해상풍력단지 입지전략 연구”, 한국환경과학회지, 제18권, 제8호, 877-883, 2009.
- [24] 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구. “한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석”, 한국대기환경학회지, 제23권, 제6호, pp.653-665, 2007.
- [25] 지식경제부, 풍력발전단지의 발전량 예측시스템 구축에 관한 최종보고서, 2012
- [26] Mesoscale & Microscale Meteorology Division. "WRF-ARW V3 : User's Guide", National Center for Atmospheric Research, 2012.
- [27] D. Arnold, D. Morton, I. Schicker, O. Jorba, K. Harrison, J. Zabloudil, G. Newby, P. Seibert, " WRF benchmark for regional applications", WRF User's Workshop, 2011
- [28] F. Frey-Buness, D. Heimann, R. Sausen. "A Statistical-Dynamical Downscaling Procedure for Global Climate Simulations", Theoretical and applied climatology, Vol. 50, No. 3-4, 1995.
- [29] Ib Troen, "European Wind Atlas", Riso National Laboratory, 1989
- [30] 고정우, 권혁춘, 이병걸, “제주도 풍력발전단지 설계를 위한 조도계수 산정에 대한 연구”, 한국지형공간정보학회지, 제20권, 제2호, pp. 15-22, 2012.
- [31] Song-You Hong, Jeong-Ock Jade Lim, "The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme(WSM6)", J. Korean Meteor. Soc., 42, 129-151, 2006.
- [32] Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, S. A. Clough, "Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave", J. Geophys. Res., 102(D14), 16663-16682, 1997.
- [33] Dudhia J., "Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, J. Atmos. Sci., 46, 3077-3107, 1989.

- [34] Hong, S.-Y., Y. Noh, J. Dudhia, "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes", *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318-2341, 2006.
- [35] Paulson, C. A., "The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer", *J. Appl. Meteor.*, 9, 857-861, 1970.
- [36] Mesoscale & Microscale Meteorology Division. "A Description of the Advanced Research WRF Version 3", National Center for Atmospheric Research, 2012.
- [37] 한국기상학회. "대기과학개론", 시그마프레스, 2009.
- [38] 고경남, 허종철. "풍력공학입문", 문운당, 2006.
- [39] Sathyajith Mathew, "Wind Energy : Fundamentals, Resource Analysis and Economics", Springer, 2006.
- [40] A. Mohammad, Al-Fawzan. "Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution", King Abdulaziz City for Science and Technology, Saudi Arabia, 2000.