



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](#)

석사학위논문

제주도 풍력 자원 평가를 위한
재해석 데이터 신뢰성 평가

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력기계시스템 전공

변종기

2017年 2月

제주도 풍력 자원 평가를 위한 재해석 데이터 신뢰성 평가

指導教授 高 炘 男

卞 鍾 基

이 論文을 風力工學部 碩士學位 論文으로 提出함

2016年 12月

卞鍾基의 風力工學部 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2016年 12月

Reliability assessment of reanalysis data for the Jeju island wind resource assessment

Jong-Ki Byun
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

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

2016. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering

.....
Thesis director, Bum-Suk, Kim, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering

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

.....
Date

Faculty of Wind Energy Engineering

Graduate School

Jeju National University

목 차

| | |
|---|-----|
| List of Figures | iii |
| List of Tables | v |
| Abstract | vi |
| | |
| I. 서 론 | 1 |
| 1. 연구배경 | 1 |
| 2. 연구목적 | 4 |
| II. 재해석 데이터의 이해 | 6 |
| 1. 기상 관측 방법 및 경향 | 6 |
| 2. 재해석 데이터 정의 및 이해 | 8 |
| 3. Online 기상 데이터 및 재해석 데이터 | 10 |
| 4. ERA-Interim 재해석 데이터 특성 | 12 |
| III. 해상풍력자원평가 위한 ERA-Interim/MERRA 데이터 신뢰성 평가 | 14 |
| 1. 제주도 해상풍력평가 사이트 및 평가 방법 | 14 |
| 1.1 제주도 해상풍력평가 사이트 | 14 |
| 1.2 ERA-Interim/MERRA 재해석 데이터 신뢰성 평가 방법 | 15 |
| 2. ERA-Interim/MERRA 재해석 데이터 신뢰성 평가 결과 | 16 |
| 2.1 기상탑 데이터와 재해석 데이터 비교 | 16 |
| 2.2 평균 풍속, 에너지밀도, AEP 분석 결과 | 17 |
| 2.3 Weibull 속도 확률 분포 비교 | 19 |
| 2.4 월별 예측 발전량 비교 | 21 |
| IV. 제주도 육·해상 풍력자원평가 위한 ERA-Interim 적용 연구 | 24 |
| 1. ERA-Interim 데이터 기반 기후 지도 | 24 |
| 1.1 한반도 풍속/풍향/기온 분석 및 지도 | 24 |
| 1.2 제주도 풍속/풍향/기온 분석 및 지도 | 26 |

| | |
|--|----|
| 2. 제주도 기상 관측 데이터 비교 | 29 |
| 2.1 제주도 기상 데이터 기간 및 위치 | 29 |
| 2.2 종관기상관측장비 월평균 풍속, 풍향, 온도 비교 | 30 |
| 2.3 해양기상부이 월평균 풍속, 풍향, 온도 비교 | 32 |
| 3. 육·해상 Wind Shear 분석 | 35 |
| 3.1 육·해상 Wind Shear 분석 사이트 및 방법 | 35 |
| 3.2 육·해상 Wind Shear 분석 결과 | 36 |
| 4. 육·해상 풍력자원평가를 위한 ERA-Interim 재해석 데이터의 적용 | 38 |
| 4.1 사이트 선정 및 데이터 보정 | 38 |
| 4.2 신뢰성 평가 방법 | 40 |
| 4.3 육·해상 지점 풍속 및 출력 예측 결과 | 41 |
| 4.4 육·해상 지점 간 데이터 신뢰성 비교 | 42 |
| 4.5 이격 거리에 따른 신뢰성 비교 결과 | 44 |
| | |
| V. 결론 | 46 |
| | |
| 참고문헌 | 49 |

LIST OF FIGURES

- Figure 1-1 Average cost of offshore wind capacity
- Figure 1-2 Assembling of 80m hub height wind turbine (Left) and Tubular and Lattice type Met-Masts (Right)
- Figure 2-1 Hydrologic cycle and atmosphere structure by altitude
- Figure 2-2 Wind farms and measurement sites on and around Jeju Island
- Figure 2-3 Various methods to measure onshore/offshore wind resources
- Figure 2-4 ECMWF's interface and work flow to retrieve ERA-Interim reanalysis data
- Figure 3-1 Measurement and reanalysis data points
- Figure 3-2 Procedure for assessing the reliability of reanalysis data
- Figure 3-3 Predicted Weibull Distribution
- Figure 3-4 Predicted Monthly Energy Production
- Figure 4-1 Annual average wind speed distribution at 10m above ground level around the Korean peninsula (2006~2015)
- Figure 4-2 Annual average temperature distribution at 2m above ground level around the Korean peninsula (2006~2015)
- Figure 4-3 Annual average wind speed distribution at 10m above ground level around Jeju Island (2006~2015)
- Figure 4-4 Annual average temperature distribution at 2m above ground level around Jeju Island (2006~2015)
- Figure 4-5 Monthly Wind Speed distribution around Jeju island
- Figure 4-6 Meteorological measurement and reanalysis data points
- Figure 4-7 Monthly Wind Speed from ASOS and ERA-Interim data
- Figure 4-8 Mean Veer from ASOS and ERA-Interim data
- Figure 4-9 Temperature and dew point temperature from ASOS and ERA-Interim data
- Figure 4-10 Monthly Wind Speed from BUOY and ERA-Interim
- Figure 4-11 Mean Veer from BUOY and ERA-Interim data
- Figure 4-12 Temperature and water temperature from BUOY and ERA-Interim data

Figure 4-13 Onshore and coast Wind Shears based on Met-Mast and ERA-Interim data

Figure 4-14 Met-mast and ERA-Interim data points

Figure 4-15 Procedure for assessing the reliability of ERA-Interim

Figure 4-16 Box-whisker plot about the relative error

Figure 4-17 Relative error of the predicted V_{Hub} and AEP

LIST OF TABLES

- Table 2-1 The meteorological and reanalysis data available on WindPRO
- Table 2-2 The ERA-Interim reanalysis data provided by ECMWF
- Table 3-1 Statistics of Met-Mast and reanalysis data
- Table 3-2 The Wind Resource predicted by WindPRO
- Table 3-3 The average value of relative errors between Met-Mast and reanalysis data :
Wind Speed, Wind Power Density, AEP
- Table 3-4 The RMSE of Weibull probability density predicted by WindPRO
- Table 4-1 Properties of ASOS & BUOY Data
- Table 4-2 Information of Met-Mast and ERA-Interim data points for wind shear estimation
- Table 4-3 The dimensionless power law exponents at onshore and coast
- Table 4-4 Information of Met-Mast and ERA-Interim data points
- Table 4-5 The wind resource predicted by WindPRO

Abstract

The investigation on reliability of MERRA (Modern-Era Retrospective and Applications) and ERA-Interim (ECMWF ReAnalysis - Interim) reanalysis wind data was conducted using the four met mast wind data at coastal regions, Jeju island. Shinchang, Handong, Udo and Gangjeong sites were chosen for the met mast sites. ERA-Interim and MERRA reanalysis data at two points on the sea around Jeju Island were analyzed for creating Wind Statistics of WindPRO software. Reliability of reanalysis wind data was assessed by comparing the statistics from the met mast wind data with those from Wind Statistics of WindPRO software. The relative error was calculated for annual average wind speed, wind power density and annual energy production. In addition, Weibull wind speed distribution and monthly energy production were analyzed in detail. As a result, ERA-Interim reanalysis data was more suitable for wind resource assessment than MERRA reanalysis data.

Then, the investigation on reliability of ERA-Interim reanalysis wind data was carried out using five met masts wind data at inland and coastal areas, Jeju island. To assess the reliability of ERA-Interim data in detail and widely, the maps of wind resource and temperature over Korean peninsula and Jeju island were drawn using ERA-Interim reanalysis data. Besides, the wind and temperature data of ASOS installed inland and BUOY installed at sea was compared with ERA-Interim reanalysis data for analyzing the reliability of onshore and offshore reanalysis data. The monthly mean wind speed and wind veer from BUOY data were much similar to those from ERA-Interim reanalysis data, while those from ASOS data were a lot different from ERA-Interim reanalysis data. All the correlation coefficients of air temperature, dew point temperature, and water temperature were above 0.9.

Also, Shinchang, Handong, Udo, Susan and Cheongsoo sites were chosen for

the met mast location. ERA-Interim reanalysis data at onshore and offshore points of twenty over Jeju island were analyzed for creating Wind Statistics of WindPRO software. Reliability of ERA-Interim reanalysis wind data was assessed in the same way described above. The relative errors were calculated for annual average wind speed and annual energy production in terms of onshore and offshore wind resources. In addition, the trend of the errors were analyzed with distance from a met mast. As a result, ERA-Interim reanalysis wind data was more suitable for offshore wind resource assessment than onshore.

I. 서 론

1. 연구배경

화석 연료 과다 사용으로 인해 지구 온난화 및 기상 이변이 발생하여 이를 해결하기 위해 지속 가능한 신재생 에너지 생산 시스템으로 전환하고자 하는 노력이 증가되고 있다. 그 중에서도 무한한 바람에너지를 이용한 풍력터빈 기술이 전 세계적으로 각광받고 있다. 2010년 이후의 풍력터빈의 기술 개발 방향은 육상-대형화(Onshore-Large)와 해상(Offshore) 풍력발전시스템으로 나뉜다.⁽¹⁾⁽²⁾ 이를 반영하듯 최근 제주도에 세워지는 육상 풍력발전시스템의 허브 높이는 80m을 넘고 있으며 국내 최초로 상업용 30MW 해상 풍력발전단지가 제주도 한경면 연안 지역에 건설되고 있다.⁽³⁾ 그 중에서 풍부한 해풍을 이용한 해상풍력발전 기술개발 및 투자가 증가되고 있는데, Figure 1-1에서 보는 바와 같이 2050년에는 해상 풍력 발전의 개발 비용이 2006년 대비 35% 절감될 것으로 예상된다.⁽⁴⁾

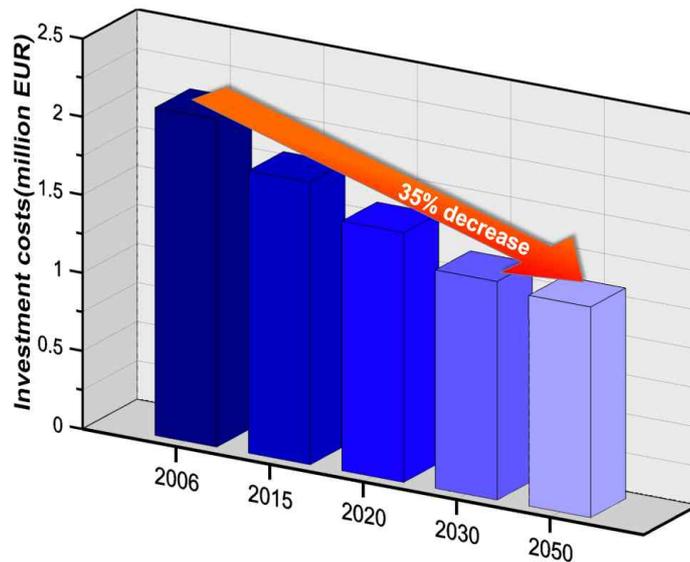


Figure 1-1. Average cost of offshore wind capacity⁽⁴⁾

하지만 제주특별자치도에서는 풍력발전사업 허가 및 지구 지정 조례를 통해 무분별한 풍력발전단지 개발을 방지하고 있는데, 해상풍력발전지구 내 발전설비용량은 100MW이상이어야 하며, 제주 지역별 형평성 및 특수성을 고려하여 바닷가

(지적공부선)에서 풍력발전기 설치 지점까지의 거리가 1km 미만인 해역에는 풍력발전단지 설립을 제한하고 있다.⁽⁵⁾ 이러한 제한에도 불구하고 해상풍력발전시스템을 구축하기 위한 지구 지정 신청이 늘어나고 있다.

바람을 에너지원으로 하는 풍력발전은 보다 정확한 풍력자원평가가 사업 타당성의 성패를 결정하는 핵심 요소이다. 바람은 두 지점의 기압 차이에 의해 발생하는 대표적인 대기 운동으로 비 선형성이 강하며, 규모가 다른 운동 사이에 끊임없는 상호작용이 발생하여, 정확한 예측을 하기 가 쉽지 않다. 이러한 대기 운동의 예측은 관측, 분석, 이해, 예측하는 과정을 거치게 된다. 대기 관측에 있어 중요한 기상 변수로는 바람, 온도, 기압, 수분 등이 있다.⁽⁶⁾ 이에 미국, 유럽 등의 선진국에서는 다양한 방법으로 기상을 관측, 분석, 예측하여 이를 신재생 에너지 생산 시스템 구축에 적극 활용하고 있다.



Figure 1-2 Assembling of 80m hub height wind turbine (Left) and Tubular and Lattice type Met-Masts (Right)

전통적으로 풍력자원평가 작업은 정확하고 신뢰성 있는 평가를 위해 풍력발전단지 예정지 중심에 기상탑(Met-Mast) 건립하고 이곳에서 측정된 바람 데이터를 바탕으로 한다. Figure 1-2에 80m 높이 이상의 풍력 터빈이 건설되는 모습과 기상탑 모습을 나타냈다. 육상에 설치되는 기상탑은 Tilt-Up Type과 Lattice Type으로 나뉘지는데 70m 이상일 경우에는 Lattice Type을 설치하게 되고,⁽⁷⁾ 해상의

경우에는 Mono Pile 이나 Jacket 등의 지지구조물 위에 기상탑을 설치하게 되는데, 기초공사에 상당한 비용이 발생하며 수심측량, 지반시추조사, 기상탑 설치까지 약 6개월이 소요된다.⁽⁸⁾

이처럼 해상에 풍력발전단지 건설 위한 준비 단계로 풍력자원평가를 해야 할 경우에는 육상보다 훨씬 많은 제한 및 검토사항이 발생하므로 상당한 비용과 시간이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 국·내외에서는 기상탑 측정 데이터를 대체할 수 있는 인공위성 기반의 재해석 데이터를 활용한 풍력자원평가 방법에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 각 재해석 데이터의 신뢰성 평가도 함께 실시하고 있다.^(9,10,11,12) 특히, 마이크로 웨이브 센서(Microwave Sensor)를 장착한 인공위성 기반의 재해석 데이터들은 해상 풍력자원평가를 위하여 높은 관심을 가져야 할 영역이다. 대표적인 재해석데이터로는 NASA에서 제공하는 MERRA (Modern-Era Retrospective and Applications)재해석 데이터와, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)가 제공하는 ERA-Interim(ECMWF ReAnalysis - Interim) 재해석 데이터가 있다. 이 두 기관의 경우에는 인공위성 데이터만을 이용하지 않고, 자체 기상관측장비의 측정 결과 및 전 세계 여러 나라의 측정 결과 등을 취합한 뒤 수치기상모델(Numerical Weather Prediction, NWP)을 구동하여 기상을 분석, 예측하고 있다. 국내에서도 이와 유사하게 각종 관측 데이터와 수치기상모델 등을 이용하여 기상청과 한국에너지기술연구원 등에서 국내 풍력자원평가를 실시하고 이에 대한 결과를 도출하고 있다.^(13,14)

2. 연구목적

풍력자원평가 및 기상 분석을 위한 재해석 데이터에 대한 연구는 국·내외에서 활발하게 진행되고 있다. 국내에서는 재해석 데이터 중에서 MERRA를 이용한 풍력자원평가 신뢰성 평가 사례⁽⁹⁾가 있으나, ECMWF에서 제공하는 ERA-Interim은 비교적 분석 사례가 없어 이에 대한 연구가 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 우선 제주 지역에서 해상 풍력발전단지 건설을 위한 풍력자원평가의 방법으로 MERRA와 ERA-Interim 재해석 데이터 사용을 제안하고 이에 대한 신뢰성을 평가하고자 한다. 이를 위해 EMD사에서 개발한 풍력발전단지 설계 소프트웨어인 WindPRO에서 제공하는 온라인 재해석 데이터를 이용하여 제주도 해안가에 위치한 4개 지점(신창, 한동, 우도, 강정)에서 측정된 기상탑의 50m 높이 데이터와 동일 높이, 동시간대의 ERA-Interim, MERRA 재해석 데이터를 취득, 비교하고, WAsP 기반 선형 해석을 통해 각 지점에서의 기상탑 및 재해석 데이터의 풍력자원(연간 평균 풍속, 풍력에너지밀도, 연간 발전량, Weibull 분포, 월간 발전량)을 예측하고 비교, 분석하였다. 이러한 1차적인 분석 결과는 전 세계에 설치된 60개의 기상탑 데이터와 여러 종류의 재해석 데이터를 비교한 결과, ERA-Interim의 상관계수가 가장 높은 것으로 보고된 국외에서 연구한 결과와 동일하게⁽¹⁰⁾, 제주지역에 대한 MERRA 재해석 데이터와 ERA-Interim 재해석 데이터의 신뢰성 평가 결과도 ERA-Interim 데이터의 신뢰성이 높은 것으로 확인되었다.⁽¹²⁾

1차적인 분석 결과를 바탕으로 ERA-Interim 데이터에 대한 상세한 검토 필요성이 인지되어 제주 지역에서 육·해상 풍력발전 단지 건설 위한 육·해상 풍력자원평가 방법으로 ERA-Interim 재해석 데이터 사용을 제안하고 이에 대한 신뢰성을 평가를 위해서 언급한 두 가지 관점에서 수행하고자 한다. 이에 본 연구는 추가적으로 ERA-Interim 재해석 데이터를 ECMWF에서 제주도 주변 153개 지점의 10년간의 장기간 데이터(2006년~2015년)를 직접 취득하여 이를 기반으로 제주 지역에서 육/해상 풍력발전 단지 건설 위한 육/해상 풍력자원평가 방법으로 ERA-Interim 재해석 데이터 사용을 제안하고 이에 대한 신뢰성을 평가하였다. 이를 위해 우선 한반도 및 제주도 주변 지역에 대한 풍속, 풍향, 온도 분포 지도

를 ERA-Interim 재해석 데이터 기반으로 구성 및 분석하고, 제주도 주변 지역에 설치된 종관기상관측장비(ASOS)와 해양기상관측장비(BUOY)의 관측 결과와 월 평균풍속, 풍향, 온도 등을 비교하여 육상과 해상간의 재해석 데이터 신뢰성을 평가하였다. 또한 1차와 동일한 방법으로 WindPRO에서 제공하는 WAsP 기반 선형 해석을 통해 제주도 해안가에 위치한 3개 지점(신창, 한동, 우도)과 육상에 위치한 2개 지점(청수, 수산)에서 측정된 5개 기상탑 데이터와 해당 지점을 직사각형 격자로 둘러싼 동일 높이, 동시간대의 ERA-Interim 각 4개 지점을 선택, 총 20개의 ERA-Interim 데이터를 취득한 뒤, 기반으로 풍력 자원을 예측하여 육·해상 간의 신뢰성 및 해당 데이터 간의 이격 거리에 따른 신뢰성을 비교·분석하였다.

II. 재해석 데이터의 이해

1. 기상 관측 방법 및 경향

Figure 2-1에서 나타낸 바와 같이 대류권은 지구 대기권에서 가장 낮은 층이며, 날씨라고 불리는 기상 현상이 주로 일어난다. 대류권은 지표면을 시작 기준으로 하며, 대류권 높이 규모는 위도에 따라 달라진다. 대류권의 높이는 남극과 북극 같은 극지방 영역에서는 평균 6 km로 매우 낮으나 적도 지방에서는 오히려 16~18 km 영역으로 상당히 높은 규모를 가진다. 대류권 초과 높이 영역은 성층권이며, 대류권과 성층권 사이의 경계 영역을 대류권 계면이라 부른다. 오존층이 존재하는 성층권은 대류권 계면을 시작 기준으로 하며, 적도 지방에서는 성층권 높이가 지표면으로부터 50 km 정도까지 된다.

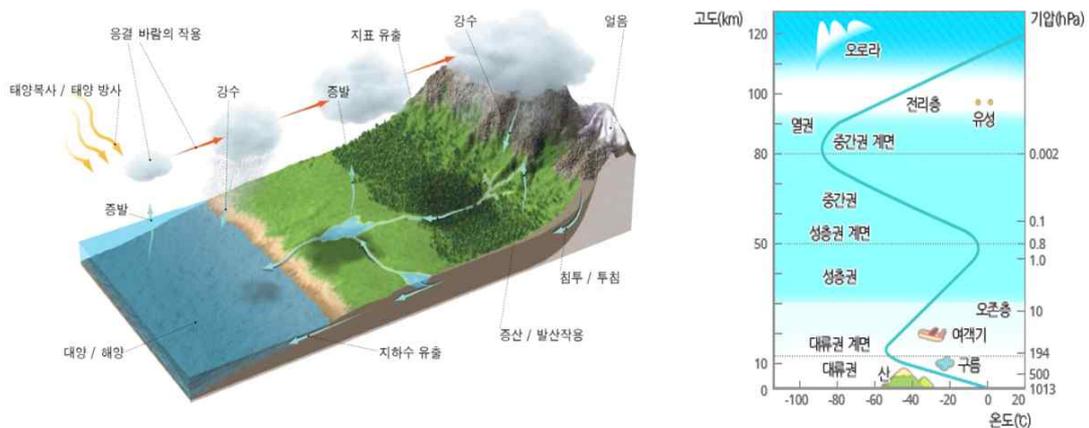


Figure 2-1 Hydrologic cycle and atmosphere structure by altitude

대류권에서 이루어지는 기후 변화는 다양한 요인에 의해 발생되며, 동일 지역의 기후도 매년 달라지므로 해당 지역의 기후특성(기온, 기압, 공기밀도, 풍속, 파고, 습도 등)을 분석하기 위해서는 지속적이고도 다양한 관측 및 분석 방법이 필요하다. 기존의 관측방법은 육상의 경우에는 기상탑, 종관기상관측장비(ASOS), 방재기상관측장비(AWS), 해상에서는 기상측정선박, 라디오존데(Radiosonde), 또는 바다 위에 놓인 부이(BUOY)를 사용하거나 해양에 많은 비용을 들여 구조물

을 세우고 측정 장비를 설치한 뒤 기상을 관측한다. 최근에는 기상 위성을 사용하여 관측하는데 지구상의 구름 상태, 분포, 변화를 정밀하게 파악하여 매 시간마다 제공하고 그 외에도 해수면 온도, 대기 연직 온도, 수분 구조, 바람 및 수분 분포 등의 정량적 자료를 재해석하고 있다.⁽⁶⁾

제주도는 한반도의 최남단에 위치하여 기상 측정이 시작될 시점부터, 한반도 기상 관측의 중요한 거점으로 인식되어 왔다. 또한 풍력이 풍부한 지역이라 친환경 에너지 시스템 조성을 위한 지속적인 투자가 이루어져왔다. 이로 인해 Figure 2-2에서 보는 바와 같이, 다양한 관측 장비들이 설치되어 있으며, 운영 중에 있다.

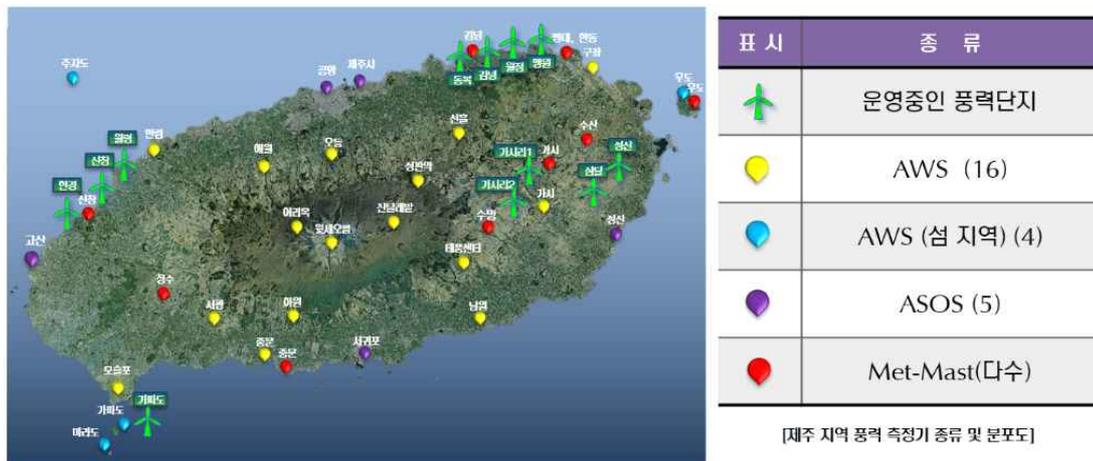


Figure 2-2 Wind farms and measurement sites on and around Jeju Island

이렇게 제주도에 설치된 각종 기상 관측 장비의 특징은 아래와 같으며, 이렇게 측정된 데이터를 풍력자원평가에 이용해 왔다.

- 25개 지점에 10m 높이의 ASOS/AWS 데이터 수집 및 운영 중
- 풍력발전단지 예비 타당성 검토/ 연구 목적(연간발전량, 후류 분석)에 따라 다수의 기상탑 운영 중
- 2012년부터 추자도, 거문도, 마라도, 서귀포(2015년 이후) 주변 해상에 해상 관측부이(BUOY)를 설치하여 운영 중
- 공항지역에 설치된 ASOS는 항공 보안특성상 사용 제한
- 일반적으로 한라산국립공원(어리목, 윗세오름, 진달래밭, 성판악)은 풍력발전단지 건립 제한 구역으로 풍력발전단지 예비 타당성 조사 등에서 제외

2. 재해석 데이터 정의 및 이해

재해석 데이터는 대류권 계면에서의 대기 순환을 인공위성이나 각종 기상 측정 장비를 통해 측정하고 측정된 데이터를 물리적인 수식에 기반을 둔 수치기상에 측모델을 구동시켜 재해석한 데이터이다. 정확한 예측이 어려운 기상 영역에서 재해석데이터를 추출하기 위해서는 각종 기상 변수를 장기간 측정(Measurements)하고 이에 대한 물리적 상관 관계(Correlation)를 도출한 뒤 특정 지역의 기상 예측(Prediction)에 적용하는 3단계를 거치게 된다.⁽¹⁵⁾

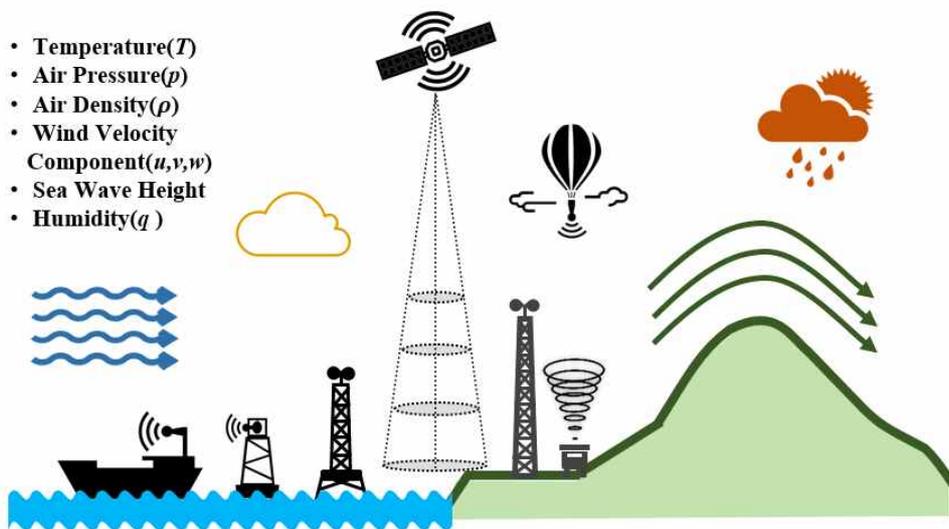


Figure 2-3 Various methods to measure onshore/offshore wind resources

Figure 2-3에서 나타난 바와 같이 수치기상예측모델을 구동하기 위한 전 단계로 시간에 따른 다양한 대기 변수(기압, 기온, 풍속, 공기밀도, 습도 등)를 측정해야 한다. 바람의 경우에는 대기 순환에 따른 풍속 및 풍향을 측정하기 위한 바람 모니터링 시스템을 구축하게 되는데 육상에는 기상탑을 세우고 바람 센서를 설치하여 풍력자원 현황을 측정한다. 이러한 방법은 시간, 비용, 위치 제약의 문제가 발생하므로 인공위성을 이용하여 대기 변수를 측정하고 이를 풍속, 풍향으로 재해석하는 연구 및 활용 사례가 증가하고 있다. 특히 이중에서 많은 불편함과 비용을 발생하게 하는 해상 풍력 자원 평가 시스템을 대체하여 마이크로 웨이브

센서를 장착한 위성 기반의 재해석 데이터들은 해상 풍력 자원 평가에 있어 높은 활용도를 가지고 있다. 위성 기반의 재해석 데이터는 대류권 계면에서의 대기 순환을 위성에 장착된 각종 센서를 통해 측정된 데이터이다. 인공위성을 통해 측정되는 데이터 중에서 NWP모형을 구동시켜 바람 데이터를 재해석하기 위해 측정되는 항목은 크게 4가지 항목(습도, 복사, 난류혼합, 표면 거칠기)이다. 그 중에서 풍속, 풍향으로 재해석하기 위해 마이크로 웨이브 센서를 통해 측정되는 항목은 습도와 표면 거칠기가 있다. 육상의 경우 모닌-오부코프 상사가설(Monin-Obukhov similarity hypothesis)¹⁾을 기반으로 지표면의 토양 온도 및 습도를 측정하여 풍속, 풍향으로 재해석한다.⁽¹⁶⁾ 해상의 경우에는 바람이 파도를 일으키게 되면, 이 파도가 바다 표면 거칠기에 영향을 주게 된다. 이러한 바다 표면 거칠기 정도 및 파도 방향을 파악하여 그 지역의 풍속, 풍향을 재해석한다.⁽⁷⁾

재해석 데이터의 주요 특징은 아래와 같다.

- 해상에 설치된 BUOY 및 기상 관측 선박 데이터 등을 통해 해상 재해석 데이터 검증
- 낮과 밤의 측정 차이는 발생하지 않으나, 구름 간섭 가능성 있음
- 데이터 활용 연구자의 수치해석 모델에 따라 재해석 결과 달라질 수 있음
- 얼음이 존재하는 바다 지역은 측정 불가하였으나, 최근 재해석 도출 방안 연구 및 제공

1) 균질한 수평적 지표층 내에서 평균 흐름과 난류 특성이 다음과 같은 네 가지 독립 변수들에만 의존한다는 것이었다. 즉, 그 변수들은 표면 위의 높이 z , 마찰속도 u^* , 운동학적 지표면 열플럭스 $H_0/\rho c_p$, 부력 변수 g/T_0 이다

3. Online 기상 데이터 및 재해석 데이터

풍력자원평가 및 단지 설계 소프트웨어인 WindPRO에서는 Online 기상 데이터 및 재해석 데이터를 전 세계의 기상 연구 기관 및 단체로부터 취득하여 자체적인 기술 및 지식을 바탕으로 재평가한 뒤 배포하고 있다. 특히 풍력자원평가 및 단지 설계에 사용될 수 있도록 다섯 개 정도의 재해석 데이터를 제공하고 있다. 본 연구에서는 1차적으로 WindPRO에서 제공하는 재해석 데이터를 사용하였고, 대표적인 기상 데이터 및 재해석 데이터에 대한 종류, 제공항목, 높이, 시간간격, 측정거리간격 등을 Table 2-1에 나타냈다.

Table 2-1 The meteorological and reanalysis data available on WindPRO⁽¹⁷⁾

| Data Type | 제공처 | Parameter | GRID | Data Period | Height | Time |
|--------------------|--------------------------|------------------------------------|--|-----------------|-------------------------|------------|
| NCEP /NCAR | NCAR | Wind Speed, Direction | 2.5° (Lat : 275km, Lon : 230km) | 1948년 ~ Present | 10, 42 m | 6H |
| QSCAT | NASA | Wind Speed, Direction | 0.25° (Lat : 27.5km, Lon : 23km) | 1999년 ~ 2009년 | 10 m | 12H |
| MERRA | NASA | Wind Speed, Direction, Temperature | 55 km | 1948년 ~ Present | 50 m | 1H |
| CFSR1, 2 CFSR-E | NCAR | Wind Speed, Direction, Temperature | 0.2° (Lat : 22km, Lon : 19km) | 1979년 ~ Present | 10 m | 1H |
| ERA-Interim | ECMWF | Wind Speed, Direction, Temperature | 80 km | 1979년 ~ 현재까지 | 10,25,50,75 100 m 이상 | 6H |
| METAR | 공항기상탑/ 영구 기상 관측 시설 | Station 상황에 따라 다름 | 전 세계 5,000여 개 | Station 기준 | Station 기준 | Station 기준 |
| SYNOP | 전세계 AWS 데이터 | Station 상황에 따라 다름 | 전 세계 7,000여 개 | Station 기준 | Station 기준 | Station 기준 |

그 중에서 가장 오래되었으며, 대표적인 재해석 데이터가 NCEP/NCAR 인데, 이 데이터는 10m, 42m 데이터만 제공하기에 좀 더 높은 고도의 풍속·풍향 정보를 얻기에는 부족하다. 그래서 최근에는 MERRA와 ERA-Interim 재해석 데이터 연구 및 사용이 증가되고 있다. MERRA는 NASA에서 운영하는 관측위성을 이용

하여 GES DISC(Goddard Earth Sciences Data and Information Service Center)에서 1979년부터 현재까지 1시간 간격으로 제공되는 재해석 데이터이며⁽¹⁸⁾, ERA-Interim은 유럽중규모예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 1979년 1월부터 현재까지 6시간 간격으로 기상 자료를 재해석하여 제공되는 데이터이다.⁽¹⁹⁾ 재해석 데이터 이외에도 온라인으로 기상 데이터 정보를 제공하고 있다.

온라인 기상 데이터 및 재해석 데이터 종류 및 특징은 아래와 같다.

- 미국/유럽 기상 연구소의 기상관측장비 및 인공위성 정보 기반
- 1970 후반부터 현재까지의 기상 정보 제공
- 위도/경도 GRID를 평균 50km 간격으로 분석함
- 데이터에 대한 신뢰도는 지역 마다 차이가 있음
- 기존 풍력 측정 장비(Met-Mast, Lidar, Sodar) 대비 참고용으로 활용 가능

4. ERA-Interim 재해석 데이터 특성

ECMWF는 1979년부터 현재까지 약 40여 년간의 수치기상예측 모델 구동 결과를 제공하고 있다. 과거에는 시기별로 ERA-15, ERA-40으로 제공했고, 최근 ERA-Interim으로 통합 제공한다. ERA-Interim 재해석 데이터는 GRIB (기상형식 : Meteorological Format)과 NetCDF (자체설명형식 : Self-describing Format)으로 나뉘어져 있으며, 약 4,600개 파라미터의 방대한 정보를 지구의 전 지역에 걸쳐 제공하고 있다. 특히 10m 이하의 지표면 기후 특성을 재해석한 데이터는 Surface and Single Level로 10m 이상의 지표면 위 영역은 Model, Pressure Level로 재해석한 데이터를 제공하는데, 이러한 ERA-Interim 재해석 데이터의 주요 특징 및 종류가 Table 2-2에 나타낸다.⁽²⁰⁾ 그 중에서 ERA-Interim은 예측치(Forecast Data)도 제공하고 있다.

Table 2-2 The ERA-Interim reanalysis data provided by ECMWF

| ERA-Interim | | Description |
|--------------------------|----------|---|
| Common Item | Period | 1979-01-01 ~ Present |
| | Level | Model, Pressure, Surface |
| | Time | 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 (UTC) |
| | Area | 0E to 358.875E, 90N to 90S |
| | Grid | 0.125x0.125 Gaussian grid |
| | Forecast | 00:00 UTC, 12:00 UTC ²⁾ |
| Upper air parameters | Model | <ul style="list-style-type: none"> • 60 “full” model levels • Height : 10m ~ 64.56km • 1.5km : middle stratosphere |
| | Pressure | <ul style="list-style-type: none"> • 37 pressure levels • Interpolated data from model • 1~1000 hPa |
| Surface and Single Level | | <ul style="list-style-type: none"> • 10m u,v wind speed • Temperature(2m, skin, dew) • Cloud cover, Surf roughness • Ocean-wave • Etc : snow, vertical integrals for energy, mass, water and ozone budgets |

2) ECMWF에서는 분석 데이터 외에 분석일 기준으로 10일간의 예측데이터(Forecast Data)를 하루 2회 (00:00 UTC, 12:00 UTC) 데이터를 추가 제공한다.

ERA-Interim 재해석 데이터를 취득하는 과정을 Figure 2-4에 나타낸다. ECMWF 홈페이지(<http://www.ecmwf.int>)에 접속하여, 취득하고자 하는 Data Level Type을 선택하고, 기간, 시간, 파라미터, 위/경도 범위, 간격(Grid)를 선택한다. 그리고 난 뒤 최종 데이터 파일 형태(GRIB 또는 NetCDF)를 선택하게 되면 ECMWF 서버에서 데이터를 쿼리하여 사용자가 다운받을 수 있게 링크를 제공한다.

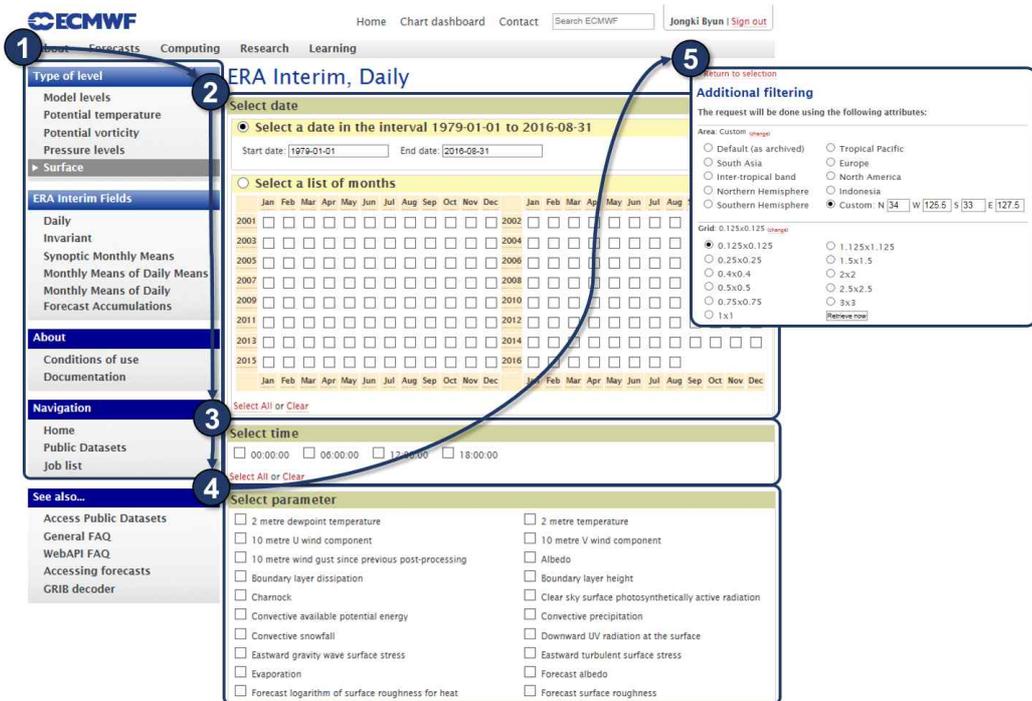


Figure 2-4 ECMWF's interface and work flow to retrieve ERA-Interim reanalysis data

이상의 과정을 통해 직접 ERA-Interim 재해석 데이터를 취득할 수 있으며, 이렇게 취득된 데이터를 4장의 “제주도 육·해상 풍력자원평가 위한 ERA-Interim 적용 연구”에 사용하였다.

III. 해상풍력자원평가 위한 ERA-Interim/MERRA 데이터 신뢰성 평가

풍력발전단지 예비 타당성 평가를 위해서는 풍력터빈 허브에 근접한 높이에서의 풍력자원평가가 필요하므로, 기상탑 데이터 측정 높이와 동일한 50 m 높이의 바람 데이터를 제공하는 ERA-Interim와 MERRA를 선정하여 재해석 데이터의 신뢰성을 평가하였다.

1. 제주도 해상 풍력 평가 사이트 및 평가 방법

1.1 제주도 해상 풍력 평가 사이트

본 연구에서 검토된 각 분석지점을 Figure 3-1에 나타낸다. 해안가에 위치한 기상탑으로부터 측정된 신창, 한동, 우도, 강정 4개 지점의 기상탑 데이터를 사용하였고, 이 4개 지점을 기준 위치 및 분석 데이터 지점으로 지정하였다.

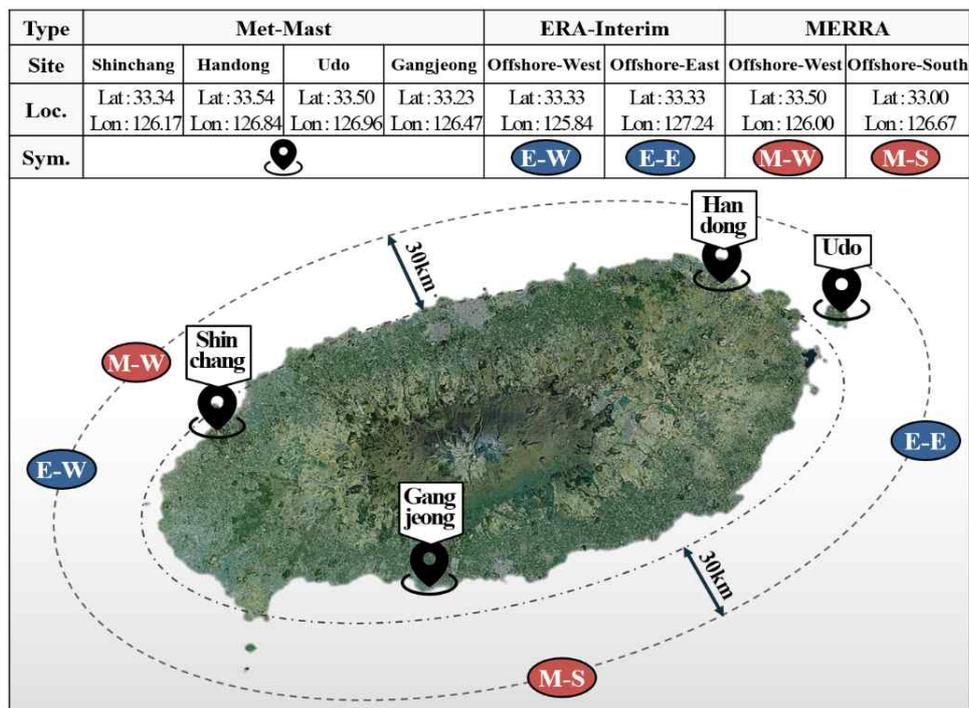


Figure 3-1 Measurement and reanalysis data points

신창, 한동의 경우에는 반경 5km 이내에 풍력발전단지가 운영 중에 있으며, 4개 지점 모두 해안가에 위치하여 유사한 경향의 풍력자원을 가지고 있다. 다만 강정의 경우에는 한라산의 영향을 받는 제주도 남쪽 해안가에 설치되어 북쪽 해안가에 설치된 3개 지점과는 일부 다른 경향을 보인다. 재해석 데이터의 경우에는 제주도 주변에 육상을 포함하여 ERA-Interim 3개 지점, MERRA 3개 지점이 존재하고 있는데 이 중에서 해상 기상을 재해석한 각 2개 지점 데이터를 선택하여 기상탑 데이터 기준의 풍력자원평가 결과와 비교, 분석하였으며 4개 지점 모두 제주도 해안선 30km 내외에 존재하고 있다.

각 측정 지점에 대한 좌표 및 표시 등도 Figure 3-1에 같이 나타나 있는데 기상탑은 지역 이름을 표시하였고, 재해석 데이터 중에서 “E-W”는 ERA-Interim 해상 서쪽, “E-E”는 ERA-Interim 해상 동쪽, “M-W”는 MERRA 해상 서쪽, “M-S”는 MERRA 해상 남쪽 지점을 의미한다. 분석에 사용된 데이터 기간은 2008년 이후의 기상탑 데이터와 동일한 1년간의 ERA-Interim 및 MERRA 데이터를 사용했다.

1.2 ERA-Interim/MERRA 재해석 데이터 신뢰성 평가 방법

Figure 3-2에 본 연구를 위한 ERA-Interim/MERRA 재해석 데이터 신뢰성 평가 과정을 나타낸다. 이번 연구에서는 4개의 지점(기상탑)에 풍력터빈을 세운다고 가정하고 입력값으로 기상탑 데이터와 동시간대, 같은 높이(50m)의 ERA-Interim, MERRA 재해석 데이터를 가지고 해당 지점의 주변의 표면 거칠기와 지형도를 입력하여, WindPRO의 STAGEN를 이용하여 해당 지점의 바람 통계값(Wind Statistics)을 만들었다.

출력값을 얻기 위해서 해당 기상탑 지점에 만들어진 개별 바람 통계값을 입력하여 WAsP Interface, PARK 모듈을 구동시켰다. 그 다음 연간 평균 풍속, 풍력 에너지밀도, 연간 발전량(Annual Energy Production, AEP), Weibull 분포, 월간 발전량 등을 예측하였다. 이렇게 예측된 각 결과 값 중에서 기상탑 측정 데이터를 이용한 풍력자원 해석 값을 기준 값으로 하고 각 재해석 데이터의 해석 값을 비교한 상대오차를 통해 신뢰성을 평가하였다.

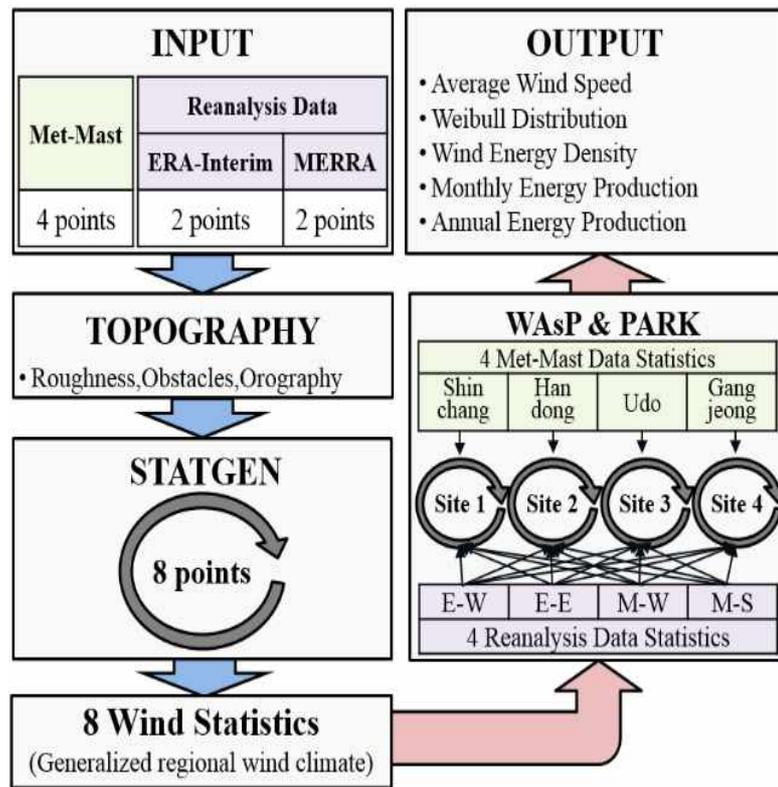


Figure 3-2 Procedure for assessing the reliability of reanalysis data

2. ERA-Interim/MERRA 재해석 데이터 신뢰성 평가 결과

2.1 기상탑 데이터와 재해석 데이터 비교

Table 3-1에 4개 기상탑 데이터 지점과 데이터 기간 그리고 동일 기간, 동일 높이의 ERA-Interim/MERRA 재해석 데이터 지점 간의 이격 거리(Distance), 평균 풍속(Average Velocity) 및 기상탑 측정값을 기준으로 한 상대오차(Rel. Error), 주풍향(Prevailing Wind Direction)을 보여준다. 이 결과를 살펴보면, 각 사이트별로 북풍 계열의 비슷한 주풍향을 가지고 있고 평균 풍속은 강정 지역을 제외한 3개의 지점에서는 10% 내외의 상대 오차를 보이고 있다. 제주 지역은 시베리아 기단의 영향을 많이 받아서 북서풍 또는 북풍 계열이 주풍향인데, 강정은 한라산의 영향을 받는 제주도 남쪽 해안가에 위치해 있어서 다른 평가 지역보다 평균 풍속이 낮으며 주풍향도 다른 지역과 차이를 보이는 것으로 생각된다.

Table 3-1 Statistics of Met-Mast and reanalysis data

| Site (Period) | Data Type & Location | | Distance (km) | Avg. Wind Speed | | Prevailing Wind Direction |
|--|----------------------------|------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------------------|
| | | | | Value (m/s) | Rel. Error (%) | |
| Shinchang (2013.03.29 ~ 2014.03.28) | Met-Mast | | - | 7.03 | - | ENE |
| | ERA- Interim | E-W | 30.8 | 7.71 | 9.7 | N |
| | | E-E | 100.0 | 7.85 | 11.7 | NNW |
| | MERRA | M-W | 23.3 | 7.22 | 2.7 | N |
| M-S | | 60.3 | 7.20 | 2.4 | N | |
| Handong (2012.01.01 ~ 2012.12.31) | Met-Mast | | - | 7.23 | - | N |
| | ERA- Interim | E-W | 95.7 | 7.79 | 7.7 | N |
| | | E-E | 44.2 | 7.89 | 9.1 | NNW |
| | MERRA | M-W | 77.5 | 7.14 | 1.2 | N |
| M-S | | 62.1 | 7.19 | 0.6 | N | |
| Udo (2008.01.01 ~ 2008.12.31) | Met-Mast | | - | 7.26 | - | WNW |
| | ERA- Interim | E-W | 106.1 | 7.12 | 1.9 | NNW |
| | | E-E | 33.8 | 7.25 | 0.1 | NNW |
| | MERRA | M-W | 88.6 | 6.66 | 8.3 | N |
| M-S | | 63.8 | 6.82 | 6.1 | NNW | |
| Gangjeong (2014.01.01 ~ 2014.12.31) | Met-Mast | | - | 5.67 | - | E |
| | ERA- Interim | E-W | 60.4 | 7.39 | 30.3 | N |
| | | E-E | 72.6 | 7.80 | 37.6 | NNW |
| | MERRA | M-W | 53.3 | 6.85 | 20.8 | N |
| M-S | | 31.1 | 6.99 | 23.3 | N | |

그러나 기상탑 지점과 재해석 데이터 지점 간에는 다양한 거리 차이가 존재하고 주변 지형과 바람 특성을 고려해야하기 때문에 Table 3-1의 단순한 바람 데이터 평가는 재해석 데이터의 신뢰성 평가 기준이 될 수는 없다.

2.2 평균풍속, 에너지밀도, AEP 분석 결과

국내에서 연구한 MERRA 데이터의 적용 타당성 연구 사례를 보면 해상 기준으로 평균풍속은 4~11%⁽⁹⁾, AEP는 10%내외의 상대오차를 보고하고 있다.⁽²¹⁾ 본 연

구에서는 ERA-Interim을 추가하여 신뢰성 평가를 수행하였는데, Figure 3-2에 나타낸 신뢰성 평가 절차에 따라 예측되어진 평균 풍속, 풍력에너지밀도, AEP와 기상탑과의 상대오차를 Table 3-2에 나타낸다. 결과 값을 비교했을 때 ERA-Interim 재해석 데이터를 사용한 풍력자원평가 결과가 4개 지점 모두에서 MERRA 재해석 데이터보다 높은 신뢰성을 보이는 것으로 확인되었다.

Table 3-2 The wind resource predicted by WindPRO

| Reanalysis Data | | | Average Wind Speed | | Wind Power Density | | AEP | |
|-----------------|-------------|-----|--------------------|----------------|---------------------------|----------------|-------------|----------------|
| | | | Value (m/s) | Rel. Error (%) | Value (W/m ²) | Rel. Error (%) | Value (MWh) | Rel. Error (%) |
| Shin chang | Met-Mast | | 6.97 | - | 435 | - | 1818.4 | - |
| | ERA-Interim | E-W | 6.82 | 2.2 | 369 | 15.2 | 1740.8 | 4.3 |
| | | E-E | 6.88 | 1.3 | 397 | 8.7 | 1802.9 | 0.9 |
| | MERRA | M-W | 6.39 | 8.3 | 291 | 33.1 | 1499.3 | 17.5 |
| | | M-S | 6.49 | 6.9 | 292 | 32.9 | 1550.0 | 14.8 |
| Han dong | Met-Mast | | 7.08 | - | 448 | - | 1927.4 | - |
| | ERA-Interim | E-W | 6.94 | 2.0 | 360 | 19.6 | 1882.6 | 2.3 |
| | | E-E | 7.05 | 0.4 | 371 | 17.2 | 1946.4 | 1.0 |
| | MERRA | M-W | 6.27 | 11.4 | 268 | 40.2 | 1498.6 | 22.2 |
| | | M-S | 6.31 | 10.9 | 269 | 40.0 | 1529.7 | 20.6 |
| Udo | Met-Mast | | 7.22 | - | 433 | - | 1910.0 | - |
| | ERA-Interim | E-W | 6.59 | 8.7 | 291 | 32.8 | 1564.0 | 18.1 |
| | | E-E | 6.60 | 8.6 | 297 | 31.4 | 1606.4 | 15.9 |
| | MERRA | M-W | 6.14 | 15.0 | 229 | 47.1 | 1306.0 | 31.6 |
| | | M-S | 6.27 | 13.2 | 239 | 44.8 | 1368.7 | 28.3 |
| Gang jeong | Met-Mast | | 5.83 | - | 275 | - | 1324.8 | - |
| | ERA-Interim | E-W | 5.83 | 0.0 | 243 | 11.6 | 1242.2 | 6.2 |
| | | E-E | 5.93 | 1.7 | 268 | 2.5 | 1298.3 | 2.0 |
| | MERRA | M-W | 5.42 | 7.0 | 197 | 28.4 | 1040.5 | 21.5 |
| | | M-S | 5.43 | 6.9 | 200 | 27.3 | 1048.8 | 20.8 |

각 지역별로 살펴보면, 이미 주변에 풍력발전단지가 건설되어 있고 북서풍과 북풍의 영향을 많이 받는 신창, 한동의 경우에는 ERA-Interim를 이용한 연간 평균 풍속 및 AEP 예측 값의 상대오차가 5% 미만이다. 다만 강정은 주풍향 기준으로 한라산의 영향을 받는 지역이고 우도는 섬 지역이라는 특수성으로 바람 변동성이 많아 상대오차가 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 것으로 생각된다.

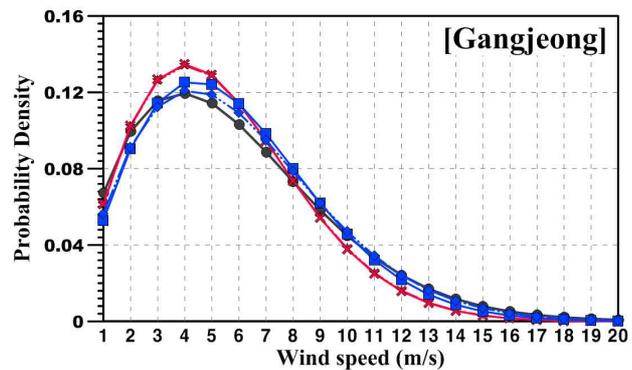
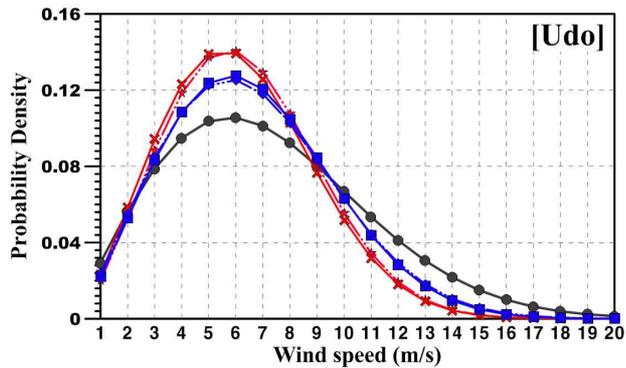
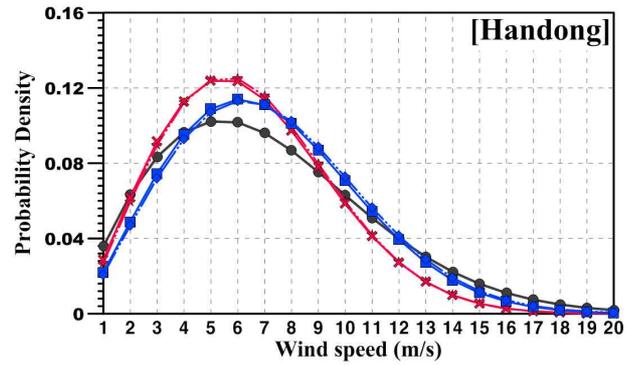
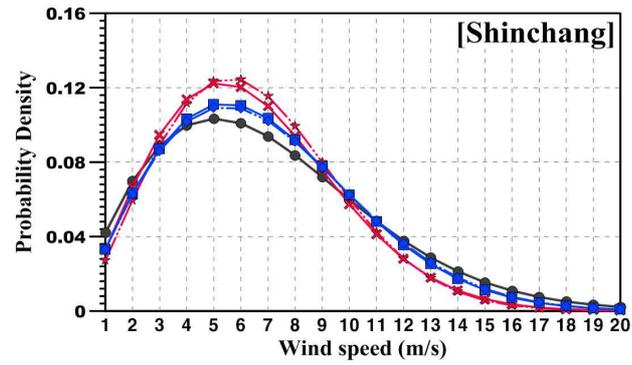
이 결과 값을 평균한 것을 Table 3-3에 나타낸다. ERA-Interim의 경우 평균 풍속은 3.1%, 풍력에너지밀도는 17.4%, AEP는 6.3%의 상대오차를 나타냈고, MERRA의 경우 평균 풍속은 9.9%, 풍력에너지밀도는 36.7%, AEP는 22.2%의 상대오차를 나타냈다. 다만 한동, 우도 지역에서 MERRA 기반 풍력에너지밀도 예측이 40% 이상의 상대오차를 나타내는데, 풍력에너지밀도는 풍속의 3제곱에 비례하므로, 평균 풍속 예측 값의 상대오차보다 상당한 차이를 보인다. 또한 고 풍속 구간의 정격 출력 제어를 반영하는 AEP와 달리 풍력에너지밀도는 고 풍속 구간에서도 풍속의 세제곱에 비례하므로 이로 인해 상당한 오차가 발생한다. 각 결과 값이 MERRA가 ERA-Interim보다 2~4배 더 큰 상대오차를 보인다. 따라서 제주 해상 기준의 풍력 자원 평가는 ERA-Interim 재해석 데이터가 높은 예측정확도를 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 3-3 The average value of relative errors between Met-Mast and reanalysis data : wind speed, wind power density, AEP

| Data Type | Average Wind Speed | Wind power density | AEP |
|-------------|--------------------|--------------------|-------|
| ERA-Interim | 3.1% | 17.4% | 6.3% |
| MERRA | 9.9% | 36.7% | 22.2% |

2.3 Weibull 속도 확률 분포 비교

WindPRO에서 예측된 각 지점별 Weibull 속도 확률 분포도를 Figure 3-3에 나타낸다.



| Legend | Met-Mast | ERA-Interim | | MERRA | |
|--------|----------|-------------|-----|-------|-----|
| | | E-W | E-E | M-W | M-S |
| | —●— | —■— | —◆— | —×— | —★— |

Figure 3-3 Predicted Weibull Distribution

ERA-Interim이 MERRA보다 기상탑 기준의 확률밀도에 근접함을 알 수 있다. 좀 더 정확한 편차를 구하기 위해 기상탑 값을 기준으로 풍속 1 ~ 20 m/s 구간에서의 각 확률 밀도 값에 대한 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)을 구한 것을 Table 3-4에 나타낸다. 4개 지역 모두 ERA-Interim이 MERRA보다 낮은 오차를 보여주고 있다.

Table 3-4 The RMSE of Weibull probability density predicted by WindPRO

| Data Site | ERA-Interim | | MERRA | |
|--------------|-------------|--------|--------|--------|
| | E-W | E-E | M-W | M-S |
| Shinchang | 0.0054 | 0.0048 | 0.0100 | 0.0118 |
| Handong | 0.0084 | 0.0090 | 0.0115 | 0.0119 |
| Udo | 0.0112 | 0.0102 | 0.0181 | 0.0175 |
| Gangjeong | 0.0061 | 0.0042 | 0.0075 | 0.0073 |

2.4 월별 예측 발전량 비교

풍력발전단지를 건설하려는 풍력발전사업자의 투자수익을 보장하기 위해서는 고 풍속 기간의 풍력자원 예측이 중요하다. 일반적으로 제주 지역의 고 풍속 기간은 사계절 중 겨울인 것으로 알려져 있다. 재해석 데이터에 대해서도 이러한 경향 및 풍력자원평가의 신뢰성을 평가하기 위해 Figure 3-4에 월별 예상 발전량을 나타내었다. 예를 들어, 각 그래프에서 녹색 점선 박스()로 표현된 부분이 강풍이 부는 기간인데, ERA-Interim가 MERRA보다 기상탑 기반의 월별 예상 발전량에 근접한 것으로 확인된다.

각 지역별로 살펴보면 신창, 한동, 우도는 신창의 2월 데이터를 제외하고 겨울 기간(11월~2월)동안 ERA-Interim 기반으로 예측된 월별 예상 발전량이 MERRA 보다 기상탑 기준 값과 비슷한 경향을 보였다.

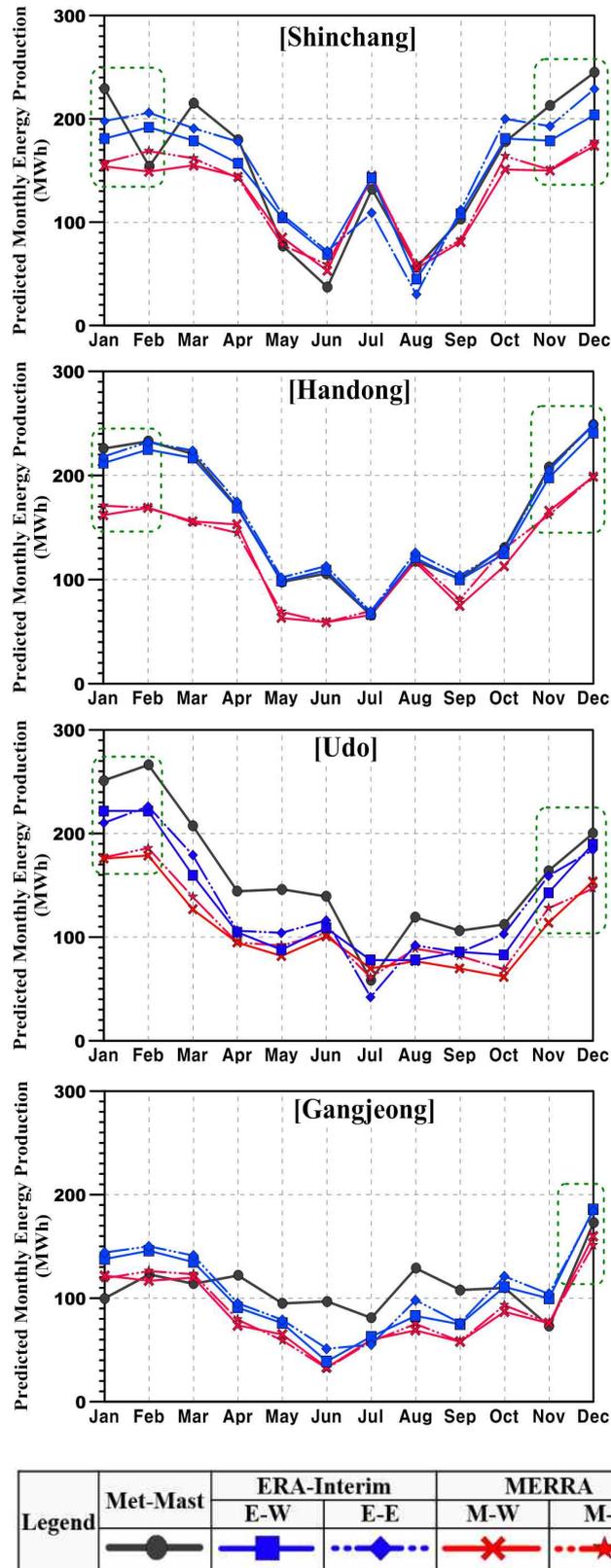


Figure 3-4 Predicted Monthly Energy Production

강정은 12월을 제외하고는 한라산의 영향으로 전반적으로 평균 풍속이 낮아
고 풍속 기간의 풍력자원평가에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.
본 연구 결과는 2013년 AWS Truepower에서 수행한 전 세계에 분포된 60개 기
상탑 실측데이터와 ERA-Interim와의 상관 관계를 분석한 결과, 결정계수는 0.73
이고 MERRA와의 상관 관계에 대한 결정계수는 0.67로서 ERA-Interim의 신뢰
성이 MERRA보다 더 높다는 분석결과⁽¹⁰⁾를 뒷받침한다.

IV. 제주도 육·해상 풍력자원평가 위한 ERA-Interim 적용연구

전 세계에 설치된 60개의 기상탑 데이터와 재해석 데이터를 비교한 결과, ERA-Interim의 상관계수가 가장 높은 것으로 확인되었으며, 제주지역의 해상 지점에 대한 MERRA와 ERA-Interim 재해석 데이터의 신뢰성 평가 결과에서도 ERA-Interim 데이터의 신뢰성이 높은 것으로 확인되었다. 이러한 연구 결과를 기반으로 ERA-Interim 재해석 데이터의 좀 더 정확한 신뢰성 분석 및 적용 검증을 위해 풍력 자원 특성이 다른 육·해상 간의 신뢰성 차이와 기상탑과의 이격 거리에 따른 신뢰성 차이 분석 등의 깊이 있는 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 ERA-Interim 재해석 데이터를 기반으로 제주 지역에서 육·해상 풍력발전 단지 건설 위한 육·해상 풍력자원평가 방법으로 ERA-Interim 재해석 데이터 사용을 제안하고 이에 대한 신뢰성을 평가를 위해서 언급한 두 가지 관점에서 수행하고자 한다. 이를 위해 ECMWF에서 제주도 주변 153개 지점의 10년간의 ERA-Interim 재해석 데이터를 취득한 뒤, EMD사에서 개발한 풍력발전단지 설계 소프트웨어인 WindPRO에서 제공하는 WAsP 기반 선형 해석을 통해 제주도 해안가에 위치한 3개 지점(신창, 한동, 우도)과 육상에 위치한 2개 지점(청수, 수산)에서 측정된 5개 기상탑 데이터와 해당 지점을 직사각형 격자로 둘러싼 동일 높이, 동시간대의 ERA-Interim 4개 지점 기반으로 풍력 자원을 예측하여 육·해상 간의 신뢰성 및 해당 데이터 간의 이격 거리에 따른 신뢰성을 비교·분석하였다.

1. ERA-Interim 데이터 기반 기후 지도

1.1 한반도 풍속/풍향/기온 분석 및 지도

지리적으로 유라시아 대륙 동쪽에 위치한 한반도는 북위 $31^{\circ} \sim 44^{\circ}$, 동경 $117^{\circ} \sim 138^{\circ}$ 에 위치하며, 위도상 온대에 속하여 계절에 따라 여러 기단의 영향을 받는다. 여름철에는 북태평양 기단이 지배하고, 장마가 시작되기 전의 계절에는 오호츠크해 기단이 지배하기도 하며, 장마철에는 오호츠크해 기단과 북태평양 기

단 그리고 시베리아 기단이 번갈아서 또는 혼합되어 지배한다. 겨울을 포함한 이외의 계절에는 시베리아 기단이 지배하여 강한 북서풍이 분다.⁽⁶⁾

Figure 4-1, 4-2에서는 한반도 지역의 풍속 및 온도 분포를 확인하기 위해 2006년부터 2015년까지의 10년간의 ERA-Interim 재해석 데이터를 기반으로 기후 지도를 구성하였다. Figure 4-1에서 보는 바와 같이, 한반도 주변의 연평균 풍속은 최저 2.5m/s에서 최대 7m/s 정도로 확인되었으며. 제주 지역이 가장 풍속이 높고, 그 다음 지역으로 강원, 서남해 지역이 바람이 강하다. 내륙 지역은 바람이 약한 것으로 파악되었다. 그리고 전반적으로 육상 보다는 해상의 풍속이 높다.

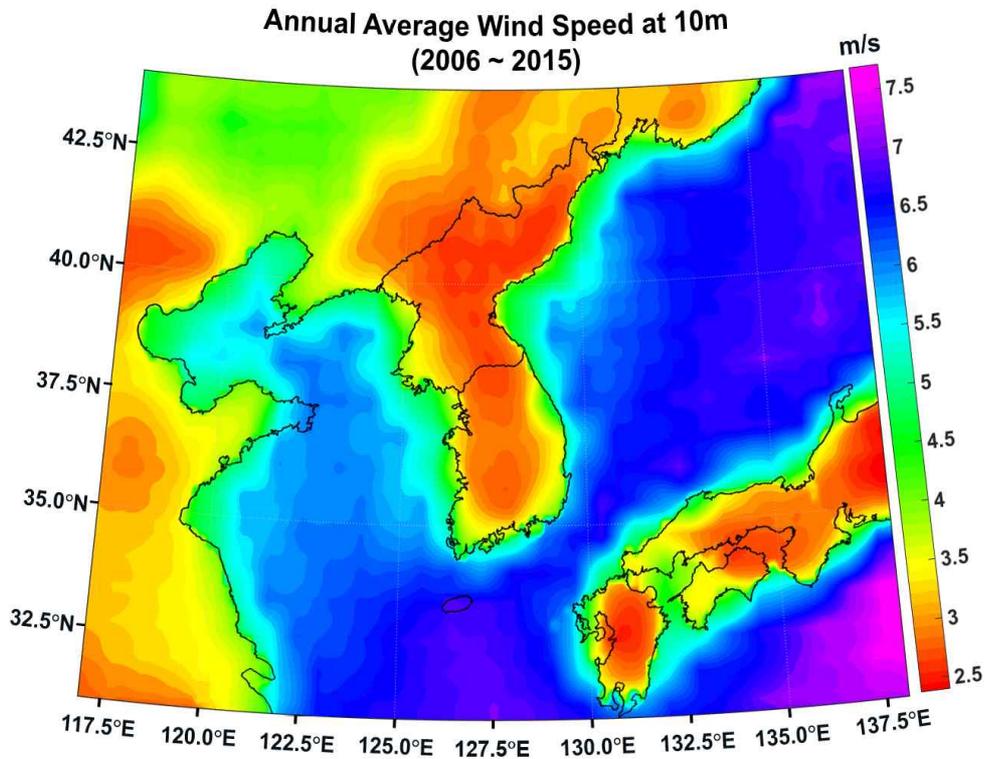


Figure 4-1 Annual average wind speed distribution at 10m above ground level around the Korean peninsula (2006~2015)

Figure 4-2에서 보는 바와 같이 기온의 경우에는 위도에 따른 기온 변화 분포를 보이고 있으며, 최저 영상 3도에서 최대 영상 16도 정도를 나타내며 북쪽의 개마고원 지역과 태백 산맥 부근의 산간 내륙 지역은 타 지역보다 온도가 낮은 것으로 확인된다.

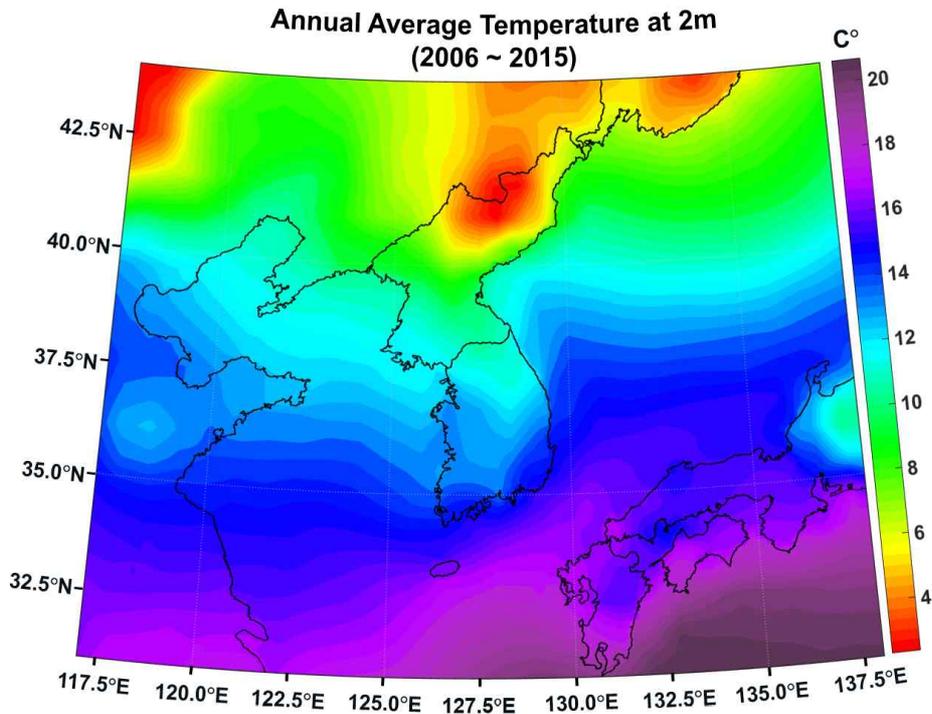


Figure 4-2 Annual average temperature distribution at 2m above ground level around the Korean peninsula (2006~2015)

1.2 제주도 풍속/풍향/기온 분석 및 지도

한반도 남쪽에 위치한 제주도는 북위 33° ~ 34°, 동경 125.5° ~ 127.5°에 위치하며, 지구 온난화로 인해 온대 기후에서 아열대 기후로 변화되고 있다. 난류의 영향으로 타 지역에 비해 연평균 기온이 높고, 해발 1950m의 한라산이 제주도 중앙에 위치해 다양한 지형적인 기후변화가 많이 발생하고 있다.

제주도의 풍속 및 온도 분포를 확인하기 위해 2006년부터 2015년까지의 10년간의 ERA-Interim 재해석 데이터를 기반으로 기후 지도를 구성하였다. Figure 4-3에 나타낸 제주도 주변의 연평균 풍속은 최저 5m/s에서 최대 7m/s 정도로 확인되었다. 전남 남해안 지역의 풍속이 상대적으로 낮으며, 제주도 남쪽 먼 바다 지역의 풍속이 높은 것으로 파악되었다. 다만 한라산에 의해 풍속이 저감되는 제주도 남쪽 지역이 오히려 풍속이 높아서, 이에 대한 추가 검토가 필요하다.

Figure 4-4에 나타낸 기온은 위도에 따른 온도 변화 분포를 보이고 있으며, 최

저 영상 15도에서 최대 영상 18도 정도로 타 지역에 비해 높은 기온 분포를 보이며, 난류가 지나는 제주도 남쪽 지역이 온도가 높은 것으로 확인된다.

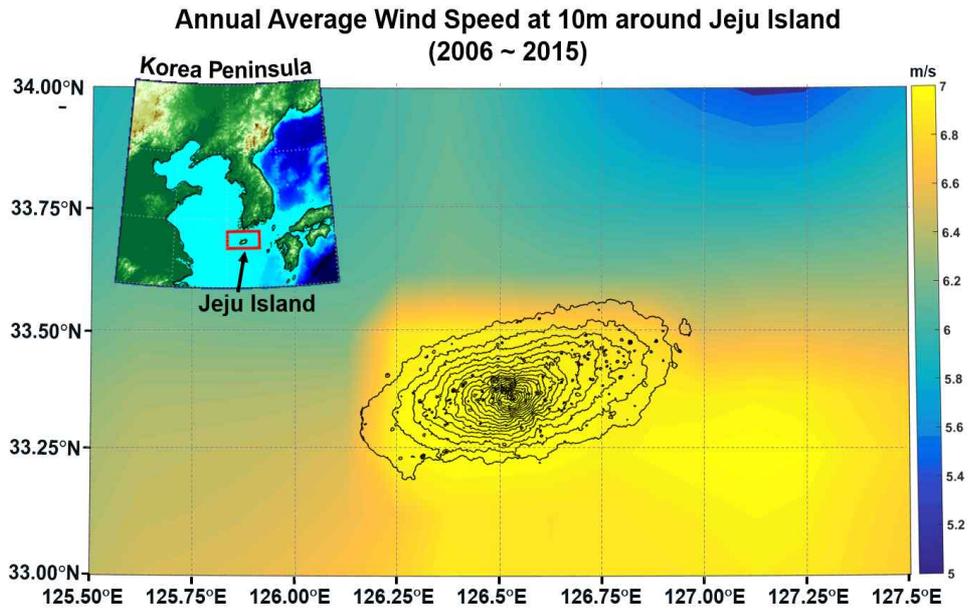


Figure 4-3 Annual average wind speed distribution at 10m above ground level around Jeju Island (2006~2015)

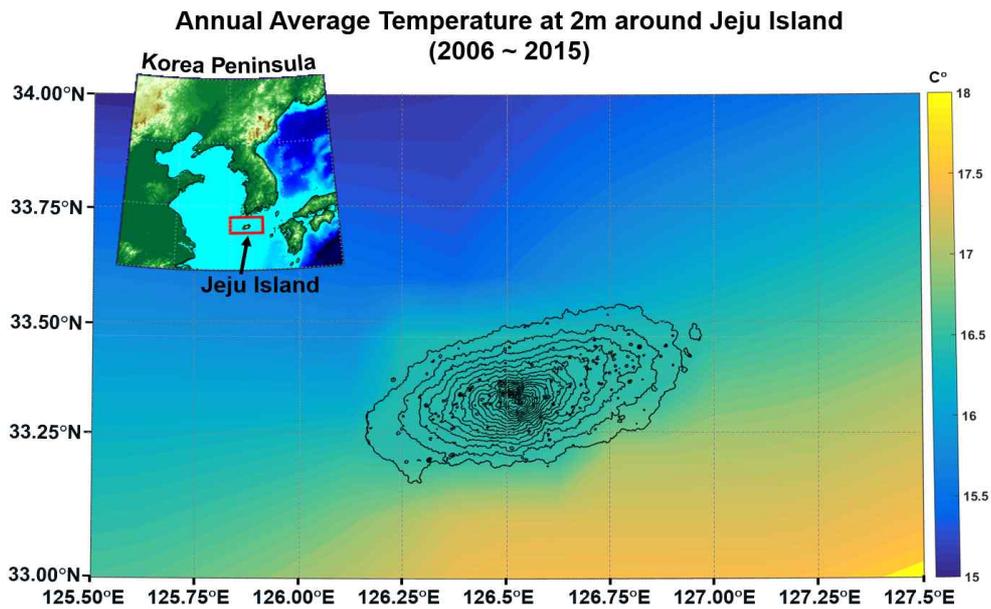


Figure 4-4 Annual average temperature distribution at 2m above ground level around Jeju Island (2006~2015)

추가적으로 월별 평균 풍속 및 풍향 분포를 Figure 4-5에 나타냈다. 특유의 기후 특성을 가진 기단은 계절별 기후 변화에 영향을 주게 되는데, 제주 지역은 시베리아 기단의 영향을 많이 받아 주풍향은 북서풍이며, 5월 이후에는 오호츠크해 기단의 발달에 의해 열과 수증기를 공급받아 장마 전선이 발달하게 되고 풍속 및 풍향이 불안정한 경향을 보인다. 여름철에는 북태평양 기단의 확장에 의해 풍속이 감소하고 남동풍이 발달하는 것으로 확인된다. 이와 같은 특징을 반영해서, 1월이 가장 높은 평균 풍속(최소 7.7m/s, 최대 8.8m/s)을 보이며, 6월이 가장 낮은 평균 풍속(최소 4.3m/s, 최대 5.0m/s)을 나타낸다.

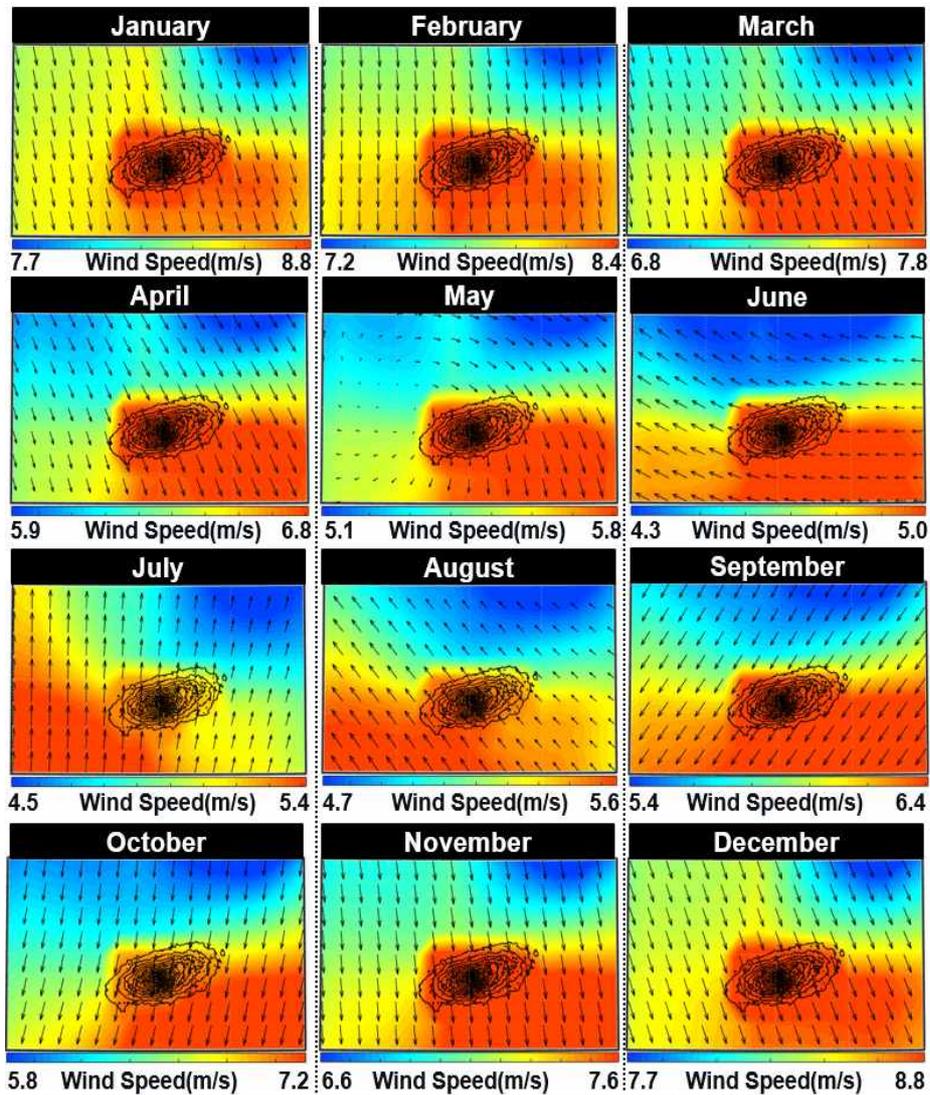


Figure 4-5 Monthly Wind Speed distribution around Jeju Island

2. 제주도 기상 관측 데이터 비교

제주도는 한반도 최남단에 위치하여 한반도의 기후를 분석·예측하는데 중요한 지역이다. 제주도 지역에 여러 개의 기상관측장비가 설치되어 있는데, 육상에 설치되어 있는 ASOS와 해상에 설치되어 있는 BUOY 측정데이터를 ERA-Interim 재해석 데이터와 비교함으로써 신뢰성을 검증하였다.

2.1 제주도 기상 데이터 기간 및 위치

제주도에는 각 4개 지점에 ASOS 및 BUOY가 설치되어 있는데 비교에 사용된 각 기상 측정 장비의 위치 및 데이터 수집 기간을 Table 4-1에 나타냈다.

Table 4-1 Properties of ASOS & BUOY Data

| Type | Sym. | Location Name | Location | Data Period |
|------|------|---------------|-------------------|---------------------|
| A | A1 | Jejusi | 33.51°N, 126.53°E | 06.01.01 ~ 13.12.31 |
| S | A2 | Seongsan | 33.39°N, 126.88°E | 09.01.01 ~ 13.12.31 |
| O | A3 | Seogwiposi | 33.24°N, 126.56°E | 06.01.01 ~ 13.12.31 |
| S | A4 | Gosan | 33.29°N, 126.16°E | 06.01.01 ~ 13.12.31 |
| B | B1 | Choojado | 33.79°N, 126.14°E | 14.01.15 ~ 15.12.31 |
| U | B2 | Geomundo | 34.00°N, 127.50°E | 12.01.01 ~ 13.12.31 |
| O | B3 | Seogwipo | 33.13°N, 127.02°E | 15.12.21 ~ 16.07.31 |
| Y | B4 | Marado | 33.08°N, 126.03°E | 12.01.01 ~ 13.12.31 |

Figure 4-6에 기상관측장비의 위치를 표시하였는데, ASOS는 제주도 동·서·남·북 지역에 분포되어 있고, BUOY는 제주도 주변을 둘러싼 해상에 분포되어 제주도 주변의 기상 관측 및 예측에 활용되고 있다. 제주도 주변 지역의 ERA-Interim 재해석 데이터는 위/경도 기준으로 0.125° 간격의 Grid 교차점의 재해석 데이터를 제공하는데, 각 관측 장비에 가장 가까운 지점의 동일 높이, 동일 기간의 데이터를 취득하여 비교하였다.

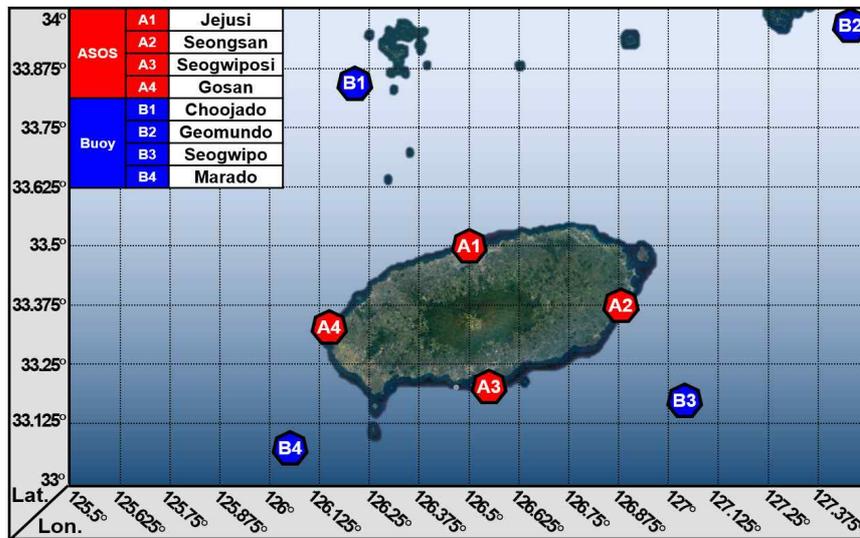


Figure 4-6 Meteorological measurement and reanalysis data points

2.2 중관기상관측장비 월평균 풍속, 풍향차이, 온도 비교

육상 기상관측데이터를 비교하기 위해 ASOS 4개 지점(제주시, 성산, 서귀포시, 고산)의 월별 평균 풍속 비교 결과를 Figure 4-7에 나타냈다.

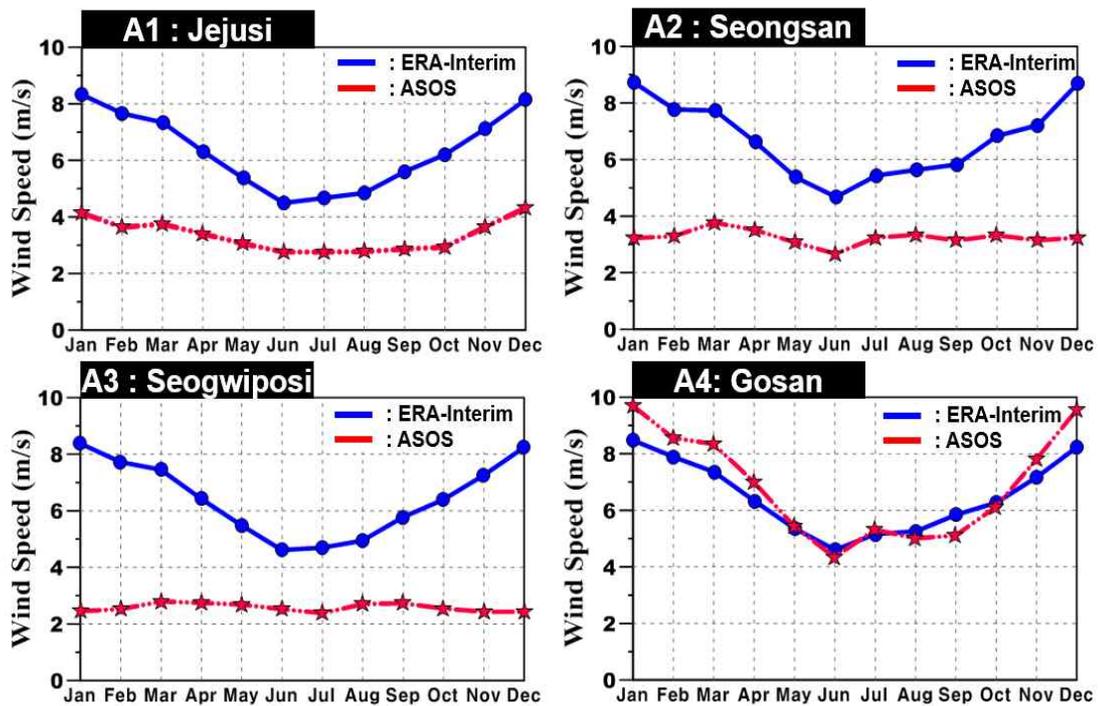


Figure 4-7 Monthly Wind Speed from ASOS and ERA-Interim data

제주시, 서귀포시 관측 장비는 도심에 설치되어 있는데, ERA-Interim 재해석 데이터와 상당히 불일치한 결과를 보이고 있으며, 한라산 남서쪽에 위치한 성산의 경우에도 한라산의 지형적인 영향으로 약한 풍속을 나타내는데 비해 ERA-Interim 재해석 데이터는 기타 지역과 비슷한 풍속을 보이고 있다. 다만 제주도 서부 지역에 설치되어 해풍의 경향을 잘 나타내는데, ERA-Interim 데이터와 상당히 유사한 풍속을 보이고 있다.

ASOS 데이터와 ERA-Interim 데이터 간의 풍향 차이를 Figure 4-8에 나타낸다. 비교 결과에 따르면, 풍속과 동일하게 제주시와 서귀포 지점의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있으며, 고산 지역은 북서풍이 부는 $300^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 영역에서는 비슷한 풍향을 나타냈다.

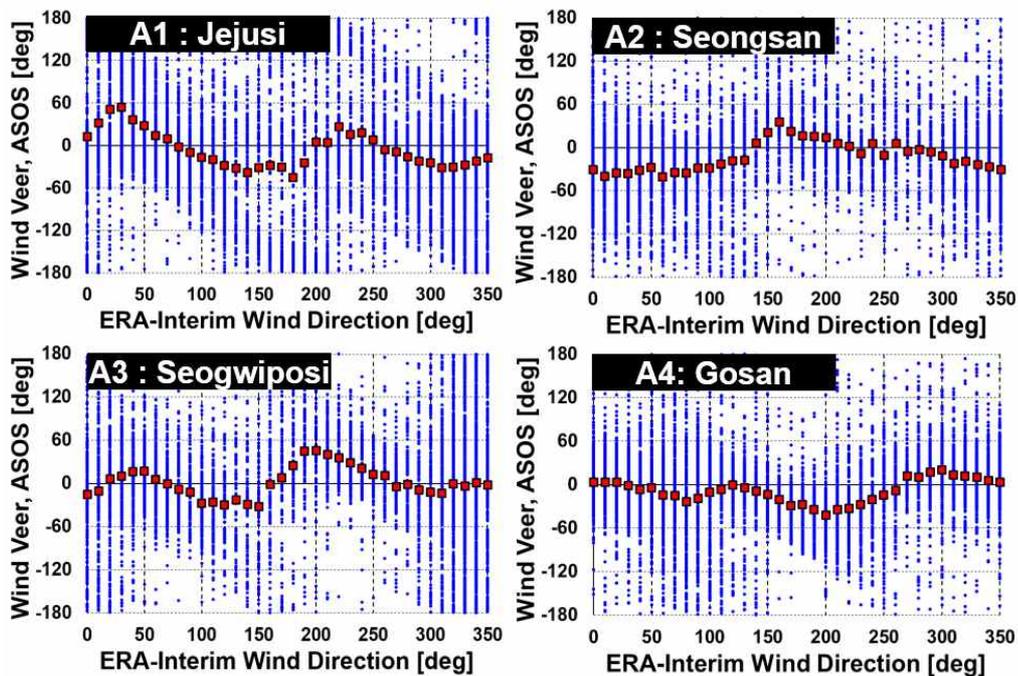


Figure 4-8 Mean Veer from ASOS and ERA-Interim data

기온의 경우에는 지역적, 지형적 특징이 바람에 비해 영향이 적으며, 풍력 발전 출력에 영향을 미치는 공기밀도가 기온에 따라 변하게 되므로 2m 높이 기온 및 이슬점 온도를 비교하고 이를 Figure 4-9에 나타냈다. 2가지 온도 항목은 제주시, 성산, 서귀포시, 고산 4개 지점 모두, 상관계수가 0.9 이상이고 상관 관계식

기울기 또한 1.0에 가까워서 측정된 온도 항목과 ERA-Interim 재해석 데이터의 온도가 상당히 일치함을 보이고 있다.

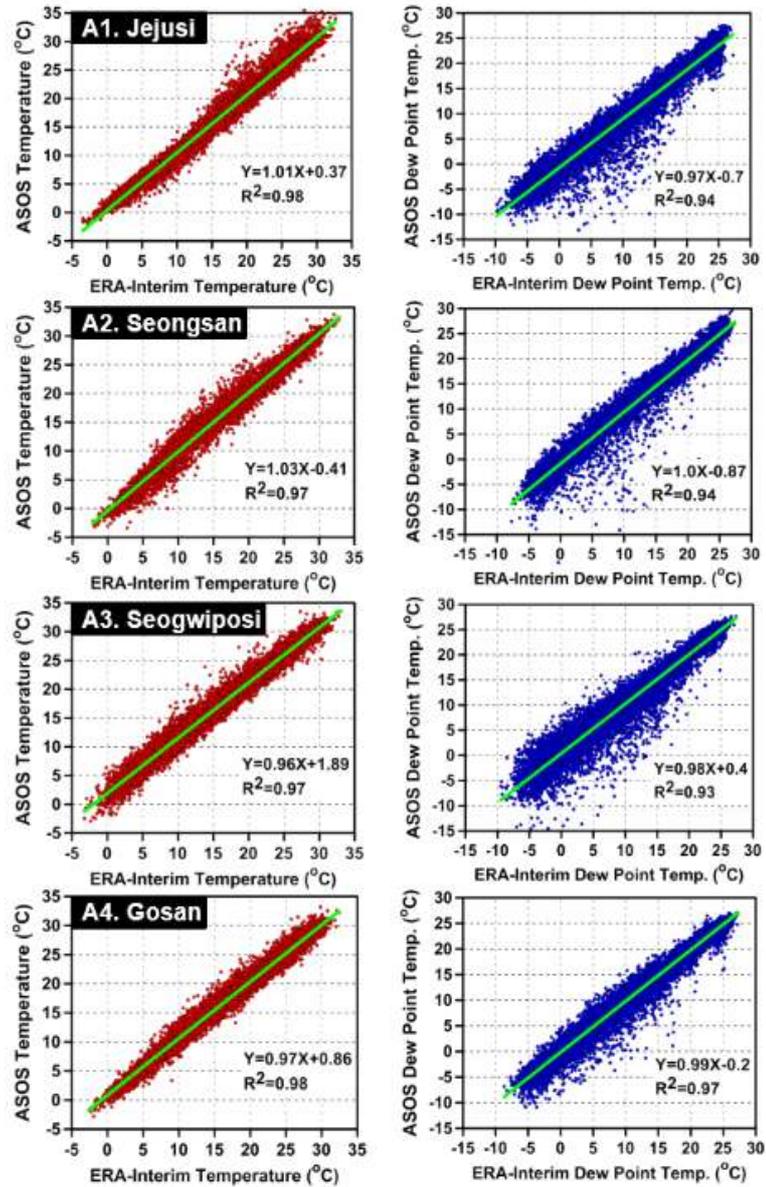


Figure 4-9 Temperature and dew point temperature from ASOS and ERA-Interim data

2.3 해양기상부이 월평균 풍속, 풍향차이, 온도 비교

해상 기상관측데이터를 비교하기 위해 BUOY 4개 지점의 월별 평균 풍속과

풍향 차이 비교 결과를 Figure 4-10과 4-11에 나타낸다.

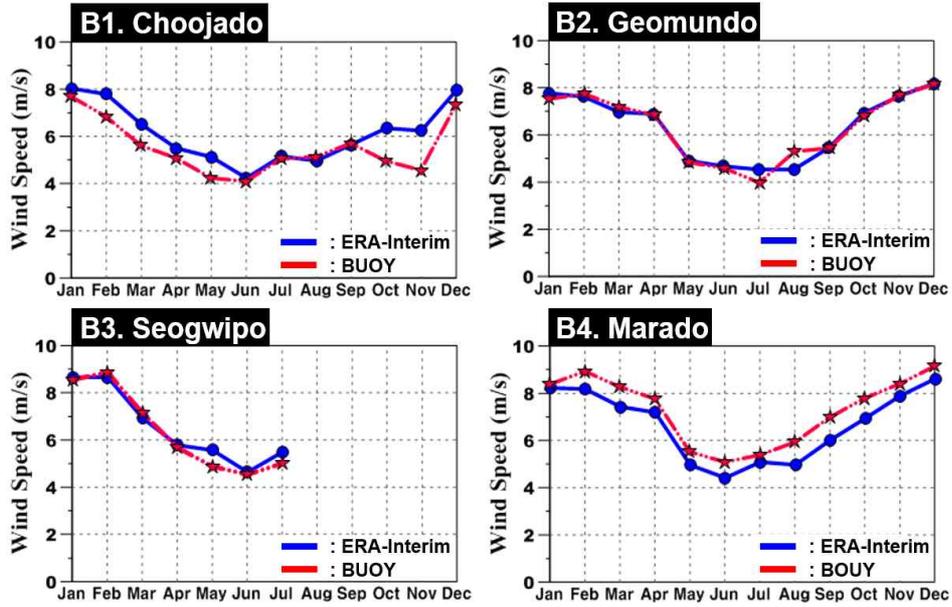


Figure 4-10 Monthly Wind Speed from BUOY and ERA-Interim data

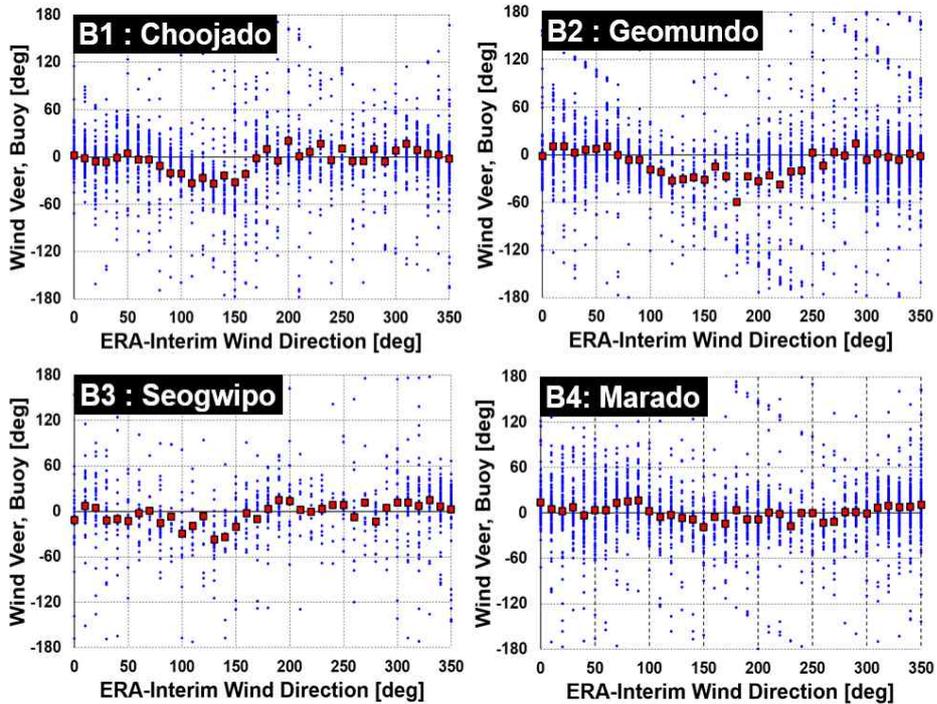


Figure 4-11 Mean Veer from BUOY and ERA-Interim data

비교 결과에 따르면, 해상 기준의 월별 평균 풍속은 4개 지점 모두 비슷한 풍속

avnd속을 보이고 있으며, 풍향 차이에 있어서도 남풍이 부는 180° 영역을 제외하고 4개 지점 모두 비슷한 풍향을 나타냈다.

BUOY에서 측정된 온도는 크게 두 가지가 있는데, 기온과 해수면 온도로 나뉜다. BUOY에서 측정된 해수면 수온 (Water Temperature)는 대기와 접해 있는 해양 표층의 온도를 의미하며, 이와 ERA-Interim Skin Temperature를 비교하였다. 비교 결과에 따르면 4개 지점 모두, 상관계수가 0.9 이상이며 ERA-Interim 재해석 데이터와 상당히 일치함을 Figure 4-12에 나타낸다.

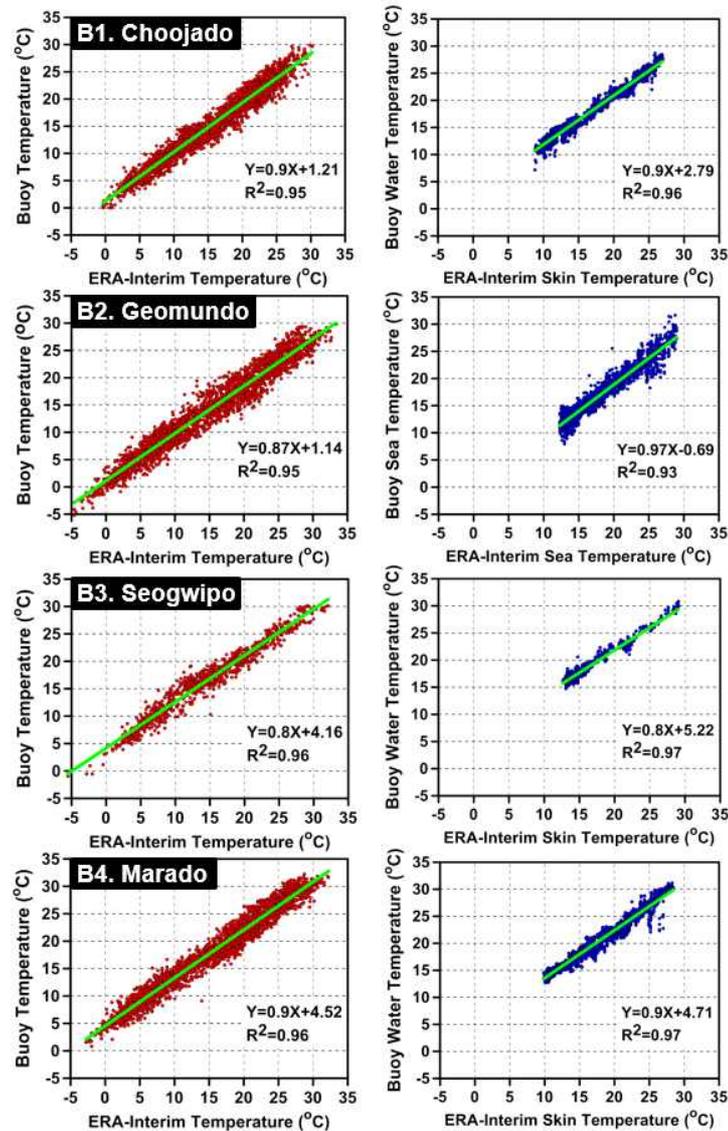


Figure 4-12 Temperature and dew point temperature from BUOY and ERA-Interim data

3. 육·해상 Wind Shear 분석

동일 높이, 동 기간의 제주도 지역에서 측정된 육·해상 기상관측 데이터와 ERA-Interim 재해석 데이터를 비교한 결과, 육상보다 해상의 관측 결과가 상당히 유사성이 높았다. 특히 풍속·풍향에 있어서 육상의 지형적인 간섭이 많은 지역에서의 관측 오차가 높게 나타났는데 이러한 높은 관측 오차의 원인을 확인하기 위해 육상 3개 지점(청수, 수산, 수망), 해상 3개 지점(신창, 한동, 우도)의 기상탑 데이터와 가장 가까운 지점의 ERA-Interim 재해석 데이터를 취득하여 윈드시어(Wind Shear)를 분석하였다.

3.1 육·해상 Wind Shear 분석 사이트 및 방법

연직 방향의 거리, 즉 고도에 따른 풍속의 변화를 나타내는 Wind Shear는 수평선상의 풍속에 대한 지형적인 영향 정도를 나타낸다. ERA-Interim 재해석 데이터도 다양한 높이에서의 풍속을 제공하고 있어서 높이에 따른 풍속 변화를 확인할 필요가 있다. 이에 1년 이상의 제주도의 육상 및 해안가에 설치된 기상탑 각 3개 지점 데이터와 ERA-Interim 데이터의 특징을 Table 4-4에 나타낸다.

Table 4-4 Information of Met-Mast and ERA-Interim data points for wind shear estimation

| Region | Sites | Data Type | Distance (km) | Measurement | |
|---------|-----------|-------------|---------------|-------------------|---------|
| | | | | Height (m) | Period |
| Onshore | Cheongsoo | Met-Mast | - | 30,40,50,60 | 1 year |
| | | ERA-Interim | 6.0 | 10,30,60,100,160 | |
| | Susan | Met-Mast | - | 30,40,50,60,68,70 | 2 years |
| | | ERA-Interim | 5.1 | 10,30,60,100,160 | |
| | Sumang | Met-Mast | - | 30,40,50,60,68,70 | 2 years |
| | | ERA-Interim | 8.1 | 10,30,60,100,160 | |
| Coast | Shinchang | Met-Mast | - | 40,50,60,70,78,80 | 1 year |
| | | ERA-Interim | 5.2 | 10,30,60,100,160 | |
| | Handong | Met-Mast | - | 30,40,50,58,60 | 2 years |
| | | ERA-Interim | 9.8 | 10,30,60,100,160 | |
| | Udo | Met-Mast | - | 20,30,40,50,60 | 1 year |
| | | ERA-Interim | 4.0 | 10,30,60,100,160 | |

3.2 육·해상 Wind Shear 분석 결과

6개 지점에 대한 윈드 시어 분석 결과를 Figure 4-13에 나타낸다. 그림의 왼쪽 편에 나타난 육상에 설치된 기상탑 데이터의 윈드 시어와 ERA-Interim 데이터의 윈드 시어에서는 오른쪽과 달리 상당한 차이가 나타나고 있다. 일반적으로 육상은 지형의 간섭에 의해 수직 방향의 풍속 변화가 크게 나타난다. 하지만 ERA-Interim 재해석 데이터의 경우에는 이러한 지형적인 간섭을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 생각된다.

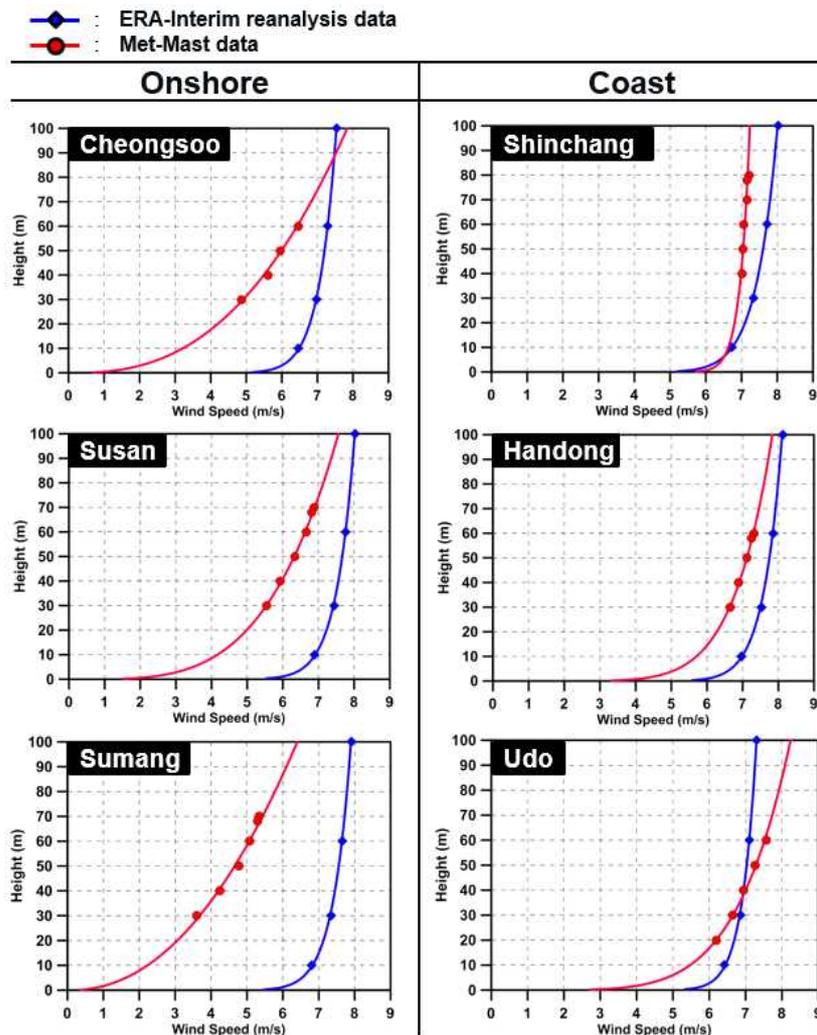


Figure 4-13 Onshore and coast wind shears based on Met-Mast and ERA-Interim data

이러한 차이에 대해서는 Table 4-3에 나타낸 윈도그래퍼(Windographer) 프로그램에서 산출한 멱법칙 지수에서도 보여진다. 해안가에 설치된 기상탑의 멱법칙 지수는 최소 0.038, 최대 0.178을 보였고, ERA-Interim의 멱법칙 지수는 최소 0.055, 최대 0.075를 보여서 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 육상에 설치된 기상탑은 최소 0.259, 최대 0.46으로, ERA-Interim의 최소 0.064, 최대 0.065와 상당한 차이를 보여서 ERA-Interim 재해석 데이터가 지형에 따른 풍속 변화를 정확하게 반영하지 못하는 것으로 생각된다.

Table 4-3 The dimensionless power law exponents at onshore and coast

| Data Point | Location | Power Law Exponents | |
|------------|------------|---------------------|-------------|
| | | Met-Mast | ERA-Interim |
| Onshore | Cheongsoo | 0.388 | 0.065 |
| | Susan | 0.259 | 0.065 |
| | Sumang | 0.46 | 0.064 |
| Coast | Shingchang | 0.038 | 0.075 |
| | Handong | 0.138 | 0.065 |
| | Udo | 0.178 | 0.055 |

4. 육·해상 풍력자원평가를 위한 ERA-Interim 재해석 데이터의 적용

제주도에 육상 및 해안가에 설치된 5개 지점의 기상탑 데이터를 이용한 풍력터빈 자원 예측 결과와 기상탑 주변 4개 지점의 ERA-Interim 재해석 데이터를 이용한 풍력터빈 자원 예측 결과를 비교하여 신뢰성을 평가했다.

4.1 사이트 선정 및 데이터 보정

(1) 평가 사이트 데이터 기간 및 위치

제주도에서는 풍력단지 개발 및 운영을 위하여 다양한 위치에 기상탑을 설치하였는데, 본 연구에서는 Figure 4-14에서와 같이 5개 지점(신창, 청수, 한동, 우도, 수산)의 기상탑 데이터를 사용하였고, 5개 지점 중에서 신창, 한동, 우도의 경우에는 해안가에 위치하여 해상풍력평가를 위한 사이트로 선정하였으며, 청수, 수산은 제주도 중 산간 지역에 위치하여 육상풍력평가 사이트로 선정하였다. 각 지점을 둘러싼 ERA-Interim 재해석 데이터를 시계방향으로 E1, E2, E3, E4로 선정하였다.

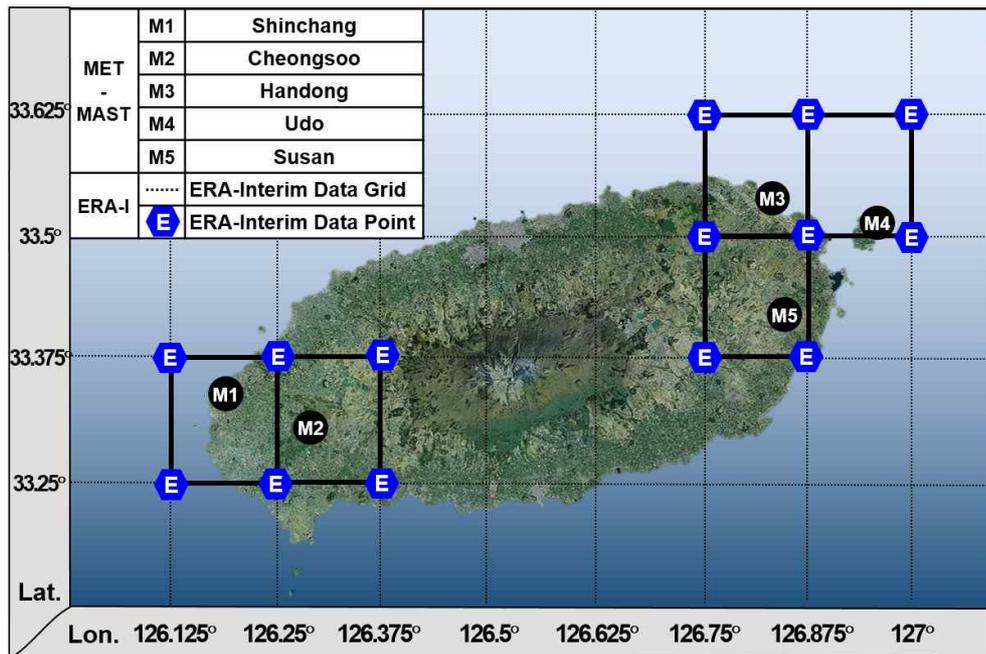


Figure 4-14 Met-mast and ERA-Interim data points

각 데이터의 위치, 측정 높이, 기상탑과 재해석 데이터간의 이격 거리 및 데이터 수집 기간 등을 Table 4-4에 나타냈다. 기간은 1년 이상이며, 이격 거리는 거리에 따른 예측 신뢰성을 평가하는데 활용되었다.

Table 4-4 Information of Met-Mast and ERA-Interim data points

| Loc. | Loc. No | Lat, Lon | Distance (km) | Measurement | |
|-----------|---------|-------------------|---------------|-------------|----------|
| | | | | Height | Period |
| Shinchang | M1 | 33.30°N, 126.20°E | - | 80m | 13.03.29 |
| | E1 | 33.37°N, 126.12°E | 5.2 | | ~ |
| | E2 | 33.37°N, 126.25°E | 8.8 | | 14.03.28 |
| | E3 | 33.25°N, 126.25°E | 12.6 | | :1year |
| | E4 | 33.25°N, 126.12°E | 10.8 | | |
| Cheongsoo | M2 | 33.30°N, 126.30°E | - | 60m | 07.01.01 |
| | E1 | 33.37°N, 126.25°E | 8.0 | | ~ |
| | E2 | 33.37°N, 126.37°E | 12.5 | | 07.12.31 |
| | E3 | 33.25°N, 126.37°E | 11.0 | | :1year |
| | E4 | 33.25°N, 126.25°E | 6.0 | | |
| Handong | M3 | 33.50°N, 126.80°E | - | 60m | 11.01.01 |
| | E1 | 33.62°N, 126.75°E | 12.2 | | ~ |
| | E2 | 33.62°N, 126.87°E | 9.8 | | 12.12.31 |
| | E3 | 33.50°N, 126.87°E | 5.6 | | :2years |
| | E4 | 33.50°N, 126.75°E | 8.9 | | |
| Udo | M4 | 33.50°N, 127.00°E | - | 60m | 08.01.01 |
| | E1 | 33.62°N, 126.87°E | 15.2 | | ~ |
| | E2 | 33.62°N, 127.00°E | 14.0 | | 08.12.31 |
| | E3 | 33.50°N, 127.00°E | 4.0 | | :1year |
| | E4 | 33.50°N, 126.87°E | 7.4 | | |
| Susan | M5 | 33.40°N, 126.90°E | - | 70m | 13.02.01 |
| | E1 | 33.50°N, 126.75°E | 10.5 | | ~ |
| | E2 | 33.50°N, 126.87°E | 5.1 | | 15.01.31 |
| | E3 | 33.37°N, 126.87°E | 9.3 | | :2years |
| | E4 | 33.37°N, 126.75°E | 13.0 | | |

(2) 높이에 따른 풍속 보정

ERA-Interim 재해석 데이터 중에서 Model Level 데이터는 다양한 높이(30m, 60m, 100m, 160m 이상)의 풍속 데이터를 제공한다. 하지만 신뢰성 평가에 사용된 기상탑 데이터의 측정 높이와 동일한 풍속 정보를 구하기 60m와 100m 풍속 데이터를 기반으로 해당 구간의 먹지수를 구한 다음, 이를 다음 식과 같은 먹법

칙⁽²²⁾에 적용하여 70m, 80m 높이의 풍속으로 보정하였다.

$$V(z) = V_{ref} (z/z_{ref})^\alpha \quad (3-1)$$

V_z : z 높이에서의 풍속

V_{ref} : 기준 높이에서의 풍속

α : 멱지수

4.2 신뢰성 평가 방법

Figure 4-15에 재해석 데이터 신뢰성 평가 과정을 나타낸다. 사전 작업으로 제주 지역의 ERA-Interim 및 기상탑 데이터를 취득하고, 기상탑 데이터 지점을 중심으로 동시간대, 같은 높이의 ERA-Interim 데이터를 가지고 WindPRO의 S TATGEN를 이용하여 해당 지점의 바람 통계 값(Wind Statistics)을 만들었다.

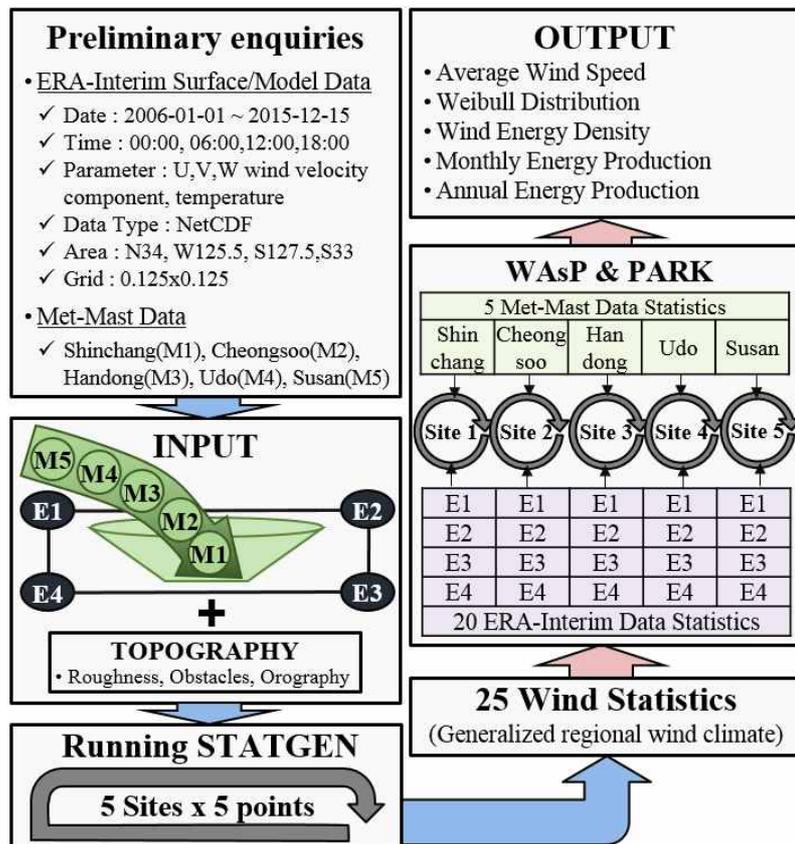


Figure 4-15 Procedure for assessing the reliability of ERA-Interim

5개 기상탑 지점은 육상이나 해안선에 위치해 있다. 육상의 경우에는 VESTA S V80 2MW(허브높이 : 78m), 해안선의 경우에는 Siemens SWT-4.0-130 4MW(허브높이 : 89m)를 풍력터빈으로 선정하였다. 각 터빈의 출력 값을 얻기 위해서 해당 기상탑 지점에 개별 바람 통계 값을 입력하여 WASP Interface와 PARK 모듈을 구동시켰다. 구동 결과 허브 높이에서의 연간 자유 평균 풍속 및 연간 발전량(Annual Energy Production : AEP) 등을 예측하였다. 이렇게 예측된 각 결과 값 중에서 기상탑 측정 데이터를 이용한 풍력자원 해석 값을 기준으로 하고 각 재해석 데이터의 해석 값을 비교한 상대오차를 통해 신뢰성을 평가하였다.

4.3 육·해상 지점 풍속 및 출력 예측 결과

Table 4-5에 각 지점의 기상탑 예측치를 기준으로 하고 ERA-Interim의 연 평균 풍속 및 AEP 예측 비교 결과를 나타냈다. 해안선에 설치된 기상탑(신창, 한동, 우도)는 해상 풍력터빈 출력 예측에 적용하고, 육상에 설치된 기상탑(청수, 수산)는 육상 풍력터빈 출력 예측에 적용했다. 허브 높이에서의 연 평균 풍속 (V_{Hub}) 예측 결과를 살펴보면, 신창, 한동, 우도 지점은 해안선에 설치된 결과로 예측된 연 평균 풍속이 8m/s 이상으로 7m/s 이상으로 예측된 육상의 청수, 수산 지점보다 높은 것으로 나타났으며, 이는 해상이 육상보다 풍력자원이 높다는 일반적인 기후 특성과 동일하다. 또한 이격 거리는 4.0km ~ 15.2km 정도인데, 육상은 기상탑과의 이격 거리가 가까울수록, 해상은 이격 거리에 영향 없이 육상보다 연 평균 풍속 및 AEP 예측에서 상대오차가 낮게 나타났다.

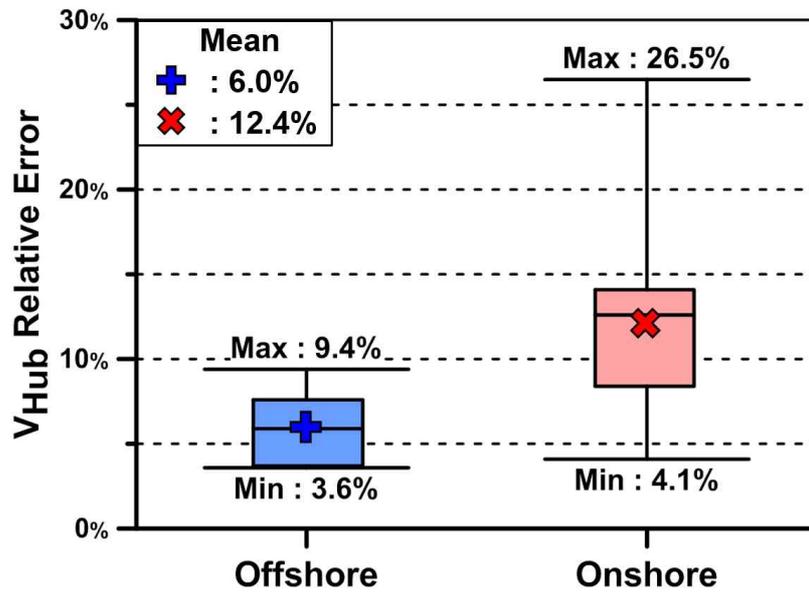
Table 4-5 The wind resource predicted by WindPRO

| Sites | | | | Free Mean Wind Speed at Hub Height | | AEP | |
|------------|----|-----------|---------------|------------------------------------|----------------|-------------|----------------|
| Loc. | No | Data Type | Distance (km) | Value (m/s) | Rel. Error (%) | Value (MWh) | Rel. Error (%) |
| Shin chang | M1 | Coast | - | 8.08 | - | 17125.6 | - |
| | E1 | Offshore | 5.2 | 7.60 | 5.9% | 15513.6 | 9.4% |
| | E2 | Onshore | 8.8 | 8.76 | 8.4% | 18983.4 | 10.8% |
| | E3 | Onshore | 12.6 | 9.10 | 12.6% | 19408.1 | 13.3% |
| | E4 | Offshore | 10.8 | 7.79 | 3.6% | 16244.3 | 5.1% |
| Cheong soo | M2 | Onshore | - | 7.04 | - | 5620.1 | - |
| | E1 | Onshore | 8.0 | 7.38 | 4.8% | 6154.4 | 9.5% |
| | E2 | Onshore | 12.5 | 8.03 | 14.1% | 7584.7 | 35.0% |
| | E3 | Onshore | 11.0 | 7.98 | 13.4% | 7080.8 | 26.0% |
| | E4 | Onshore | 6.0 | 7.61 | 8.1% | 6544.0 | 16.4% |
| Handong | M3 | Coast | - | 8.05 | - | 17131.8 | - |
| | E1 | Offshore | 12.2 | 7.75 | 3.7% | 16357.4 | 4.5% |
| | E2 | Offshore | 9.8 | 7.62 | 5.3% | 16141.8 | 5.8% |
| | E3 | Onshore | 5.6 | 9.11 | 13.2% | 20111.7 | 17.4% |
| | E4 | Onshore | 8.9 | 10.18 | 26.5% | 22402.5 | 30.8% |
| Udo | M4 | Coast | - | 8.18 | - | 17119.5 | - |
| | E1 | Offshore | 15.2 | 7.41 | 9.4% | 15153.7 | 11.5% |
| | E2 | Offshore | 14.0 | 7.56 | 7.6% | 15520.8 | 9.3% |
| | E3 | Offshore | 4.0 | 7.64 | 6.6% | 15953.1 | 6.8% |
| | E4 | Onshore | 7.4 | 9.00 | 10.0% | 19633.2 | 14.7% |
| Susan | M5 | Onshore | - | 7.16 | - | 5920.9 | - |
| | E1 | Onshore | 10.5 | 8.27 | 15.5% | 7524.0 | 27.1% |
| | E2 | Onshore | 5.1 | 7.45 | 4.1% | 6324.1 | 6.8% |
| | E3 | Onshore | 9.3 | 7.95 | 11.0% | 6951.3 | 17.4% |
| | E4 | Onshore | 13.0 | 8.56 | 19.6% | 7981.6 | 34.8% |

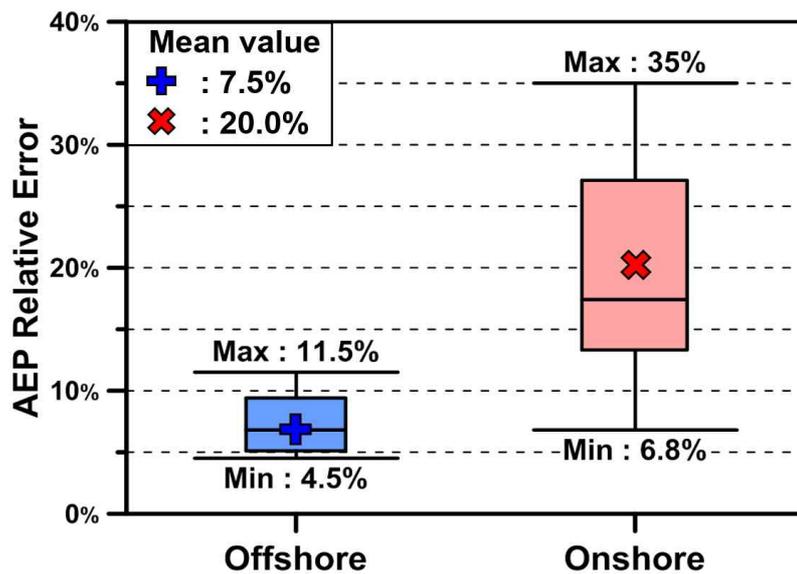
4.4 육·해상 지점 데이터 간 신뢰성 비교

육·해상 지점 간의 데이터 신뢰성 비교를 위해 Figure 4-15에 상대오차에 대한 평균값을 포함한 상자-수염(Box and whisker) 그림을 나타낸다. 예측된 V_{Hub} 에 대한 해상의 상대 오차 평균값은 6%이며, 육상은 12.4%로 나타났으며, AEP에서는 해상은 7.5%, 육상은 20%로 나타나 기상탑 기준의 상대 오차 값을 비교

했을 때 해상이 육상보다 높은 예측 정확도를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 V_{Hub} 의 최소·최대 상대 오차 값에 있어서 육상은 최소 4.1%, 최대 26.5%로 나타났으며, 해상은 최소 3.6%, 최대 9.4%로 나타났다. AEP에 있어서도 육상은 최소 6.8%, 최대 35%로 나타났으며, 해상은 최소 4.5%, 최대 11.5%로 나타났다. 이에 해상은 대체적으로 10% 미만의 오차를 보이고, 육상에 비해 오차값의 편차가 크지 않아서 해상풍력발전단지의 예비 타당성에 적용 가능한 것으로 생각된다.



(a) V_{Hub} relative errors between offshore and onshore

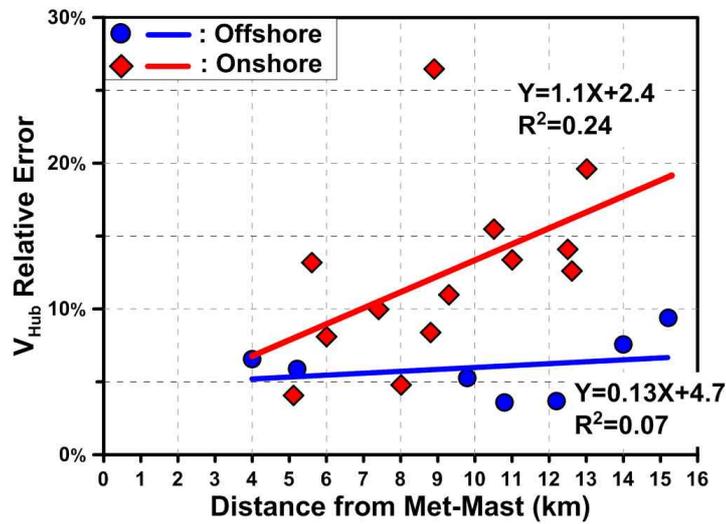


(b) AEP relative errors between offshore and onshore

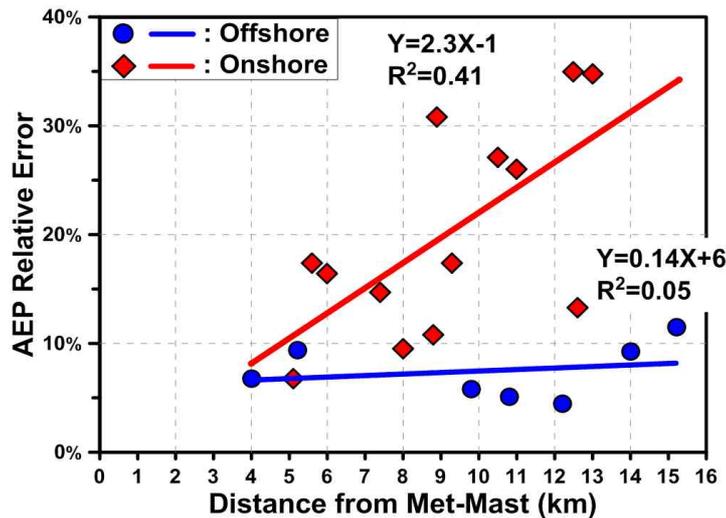
Figure 4-16 Box-whisker plots about the relative errors

4.5 이격 거리에 따른 신뢰성 비교

풍력발전단지 후보지에 기상탑 건립 시 정확한 풍력자원평가를 위해 예상 지역의 중심에 설치·측정하고 이 결과를 바탕으로 풍력단지 설계를 진행하게 된다. 이는 이격 거리가 증가할수록 다양한 지형 요소의 영향을 받아 불확도 증가를 초래하기 때문에 이를 최소화하기 위한 것이다.⁽⁷⁾ 본 연구에서도 이격 거리에 따른 예측정확도를 비교한 결과를 Figure 4-16에 나타낸다.



(a) V_{Hub} relative errors with distance from MET-Mast



(b) AEP relative errors with distance from MET-Mast

Figure 4-17 Relative errors of the predicted V_{Hub} and AEP

예측된 V_{Hub} 상대오차와 이격 거리의 상관 관계식을 봤을 때, 육상의 상관 관계식 기울기는 1.1으로 이격 거리에 비례하여 증가함을 보이지만, 해상의 경우에는 기울기가 0.13으로 이격 거리가 증가해도 상대 오차는 크게 변하지 않았다. AEP 상관 관계식을 봤을 때, AEP는 풍속에 세제곱하므로 육상은 기울기가 2.3으로 증가하여 이격 거리에 따른 상대오차가 증대되었지만, 해상은 기울기가 0.14로서 이격 거리에 따른 상대 오차는 크게 변하지 않았다. 이러한 결과는 해상은 육상에 비해 지형적인 간섭과 기상 변동성이 적기 때문에 ERA-Interim 데이터가 해상에서는 이격 거리에 따른 영향도 적고, 육상에 비해 높은 예측 정확도를 보이는 것으로 생각된다.

V. 결론

제주도에서는 해상풍력발전단지 건설을 진행하고 있는 한경 지역 외에 대정, 한림, 월정, 하도 지역 등이 사업 타당성을 검토하고 있다. 하지만 해상풍력발전 사업 타당성을 확인하고 풍력발전단지 설계를 수행하기 위해서는 육상에 비해 훨씬 많은 비용을 들여서 기상탑이나 해상 구조물을 세워서 풍력자원평가를 수행해야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 제주 지역에서 위성 기반 재해석 데이터 활용 가능성을 확인하고자 해안가에 위치한 4개 지점의 기상탑 데이터와 제주 지역 주변에서 측정되고 재해석된 ERA-Interim 및 MERRA 두 가지 재해석 데이터를 가지고 해상풍력발전 예비 타당성 평가 시 진행되는 풍력자원평가 과정을 수행하였다. 이러한 풍력자원평가 과정을 통해 기상탑 기반의 예측 값을 기준 값으로 하고 재해석 데이터 기반의 예측 값을 비교·분석함으로써 신뢰성을 평가하였다.

이러한 1차적인 분석 결과에서 ERA-Interim 재해석 데이터가 MERRA 재해석 데이터보다 제주도 해상풍력자원평가에서 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 이에 제주 지역에 대한 ERA-Interim 재해석 데이터의 신뢰성을 좀 더 깊이 있게 검토하기 위하여 제주도 육·해상 풍력자원예측 신뢰성을 평가하고 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1) 제주도 해안가에 설치된 4개 지점의 기상탑 데이터와 비교한 결과, 해상 지점에 위치한 ERA-Interim 재해석 데이터는 평균 풍속, 풍력에너지밀도, AEP 예측에서 각각 3.1%, 17.4%, 6.3%의 상대오차를 보여, 9.9%, 36.7%, 22.2%의 상대오차를 보인 MERRA보다 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 또한 각 풍속 구간별 Weibull 분포에 있어서도 ERA-Interim 기반의 예측 값이 MERRA 보다 낮은 편차를 보였다. 월별 예상 발전량 평가에 있어서도 강풍이 부는 시기의 ERA-Interim을 이용한 결과 값이 MERRA 보다 기상탑을 이용한 결과 값에 근접함을 확인하였다. 이를 통해 ERA-Interim 재해석 데이터가 해상에서 풍력자원예비평가에 있어서 MERRA 보다 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

2) ERA-Interim 재해석 데이터를 이용하여 한반도 주변 지역과 제주도 주변 지역의 기후 지도를 구성하였다. 한반도 주변 지역은 연평균 풍속은 최저 2.5m/s에서 최대 7m/s로, 온도는 최저 영상 3도에서 최대 영상 16도 정도를 나타냈으며, 제주도 주변 지역은 연평균 풍속은 최저 5m/s에서 최대 7m/s로, 온도는 최저 영상 15도에서 최대 영상 18도로 타 지역에 비해 풍속과 온도가 높은 것으로 나타났다.

3) 제주도 지역에 설치된 기상관측장비 관측데이터와 ERA-Interim 재해석 데이터를 비교한 결과, 육상은 월별 평균 풍속에서 상당한 일치를 보이는 고산을 제외하고 제주시, 서귀포시, 성산의 경우에 풍속/풍향이 불일치하며, 기온 및 이슬점온도는 4지점 모두 상관계수가 0.9 이상으로 높은 상관관계를 보였다. 해상은 4지점 모두, 월별 평균 풍속 및 풍향이 높은 상관관계를 보였고, 기온 및 수온은 상관계수가 0.9 이상으로, ERA-Interim 재해석 데이터가 해상의 기상 관측과 비교하여 상당히 높은 신뢰성을 보였다.

4) 제주도 해안선과 육상에 설치된 5개의 기상탑 데이터와 주변 ERA-Interim 20개 데이터를 취득하여 육·해상풍력발전 예비 타당성 평가 시 진행되는 풍력자원평가과정을 수행하고 예측 값을 비교하였다. 그 결과, 기상탑과 ERA-Interim 데이터 간의 AEP 예측 값의 상대오차에서 해상은 최대 11.5%, 최소 4.5%, 평균 7.4%, 육상은 최대 35%, 최소 6.8%, 평균 19.9%으로 나타나, 기상탑을 대신하여 해상풍력발전 예비 타당성 검토 시 ERA-Interim 재해석 데이터의 활용이 가능할 것으로 생각된다.

5) 기상탑 지점과 ERA-Interim 지점간의 이격 거리에 따른 신뢰성을 검토한 결과, 육상은 이격 거리에 비례(V_{hub} 기울기 : 1.1, AEP 기울기 : 2.3)하여 상대오차가 증가하는 결과를 보였으나, 해상의 경우에는 이격 거리에 대한 영향이 적은 상관 관계식(V_{hub} 기울기 : 0.13, AEP 기울기 : 0.14)을 보였다. 즉, 해상이 연구 범위 내에서의 이격 거리에 따라 별로 영향을 받지 않고 최대 11.5%의 오차를 보였다.

6) 육상과 해안가에 설치된 6개 지점의 기상탑 데이터와 주변 ERA-Interim 재해석 데이터간의 Wind Shear에 대한 분석한 결과, 해안가에 설치된 기상탑 데이터의 멱법칙 지수는 0.038 ~ 0.178 이며, ERA-Interim 재해석 데이터의 멱법칙 지수는 0.055 ~ 0.075를 보여서 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 육상에 설치된 기상탑은 0.259 ~ 0.46으로, ERA-Interim의 0.064 ~ 0.065와 상당한 차이를 보여서 ERA-Interim 재해석 데이터가 육상에서는 지형에 따른 풍속 변화를 정확하게 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

이상의 연구 과정을 통해 ERA-Interim과 MERRA 재해석 데이터를 이용한 제주도 해상 풍력자원평가를 위한 신뢰성을 평가하고, 특히 ERA-Interim 재해석 데이터에 대해서는 다양한 신뢰성 평가를 수행하였다. 이를 통해 해상에 관한 ERA-Interim 재해석 데이터는 기존의 기상관측장비로 측정된 측정 결과와 상당히 유사함을 보였으며, 해안선에 설치된 기상탑의 예측 결과와 비교하였을 때도 육상에 비해 높은 예측 신뢰성을 나타냈다. 이를 통해 ERA-Interim 재해석 데이터는 해상풍력발전 사업 예비 타당성 평가 및 장기간의 풍력자원평가에 활용 가능한 것으로 판단된다. 다만 해상에 비해 복잡한 기후 변화를 보이며, 지리적 및 지형적인 영향을 많이 받는 육상의 경우에는 예측 정확도가 떨어지는 것으로 확인됐다. 결과적으로 ERA-Interim 재해석 데이터는 육상 보다는 해상의 풍력자원 평가에 상당한 신뢰성이 있는 것으로 분석되었으며, 향후 해상풍력발전단지 건설 타당성 검토 및 해상 주변 지역에 대한 장기간의 풍력자원 데이터로 활용 가능하다고 생각된다.

참고문헌

- [1] M. E. Kim, 2012, “The market prospect and development strategy of wind energy industry”, Korea Energy Economics Institute, pp. 13-14.
- [2] K. J. Cho, C. Y. Song, J. S. Lee, 2010, “The status and direction of offshore wind turbine development”, Journal of the Korean geosynthetics society, Vol.9, No.3, pp. 27-28.
- [3] S. H. Kim, J. C. Hur, H. M. Kim, S. Y. Jung, 2014, “The research report of detailed plan to implement the 2GW offshore wind power plant until 2030”, Energy Industry Division, Economy and Industry Bureau, Jeju Special Self-Governing Province, pp. 10.
- [4] John Twidell, Gaetano Gaudiosi, 2009, “Offshore Wind Power”, Multi-Science Publishing, pp. 7-12.
- [5] Jeju Special Self-Governing Province, 2012, “The management plan of wind power plant at Jeju island”, pp. 168.
- [6] Min. K. D, 2009, “The introduction of atmospheric science”, Sigma Press, pp. 153, 233-235.
- [7] Michael C. Brower et al, 2012, “WIND RESOURCE ASSESSMENT”, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, pp. 31-32, 66-70, 213-214.
- [8] Ministry of Knowledge Economy, 2011, “Offshore wind farm road map”, pp. 11.
- [9] Park. U. S, Paek. I. S, Yoo. N. Y, Kwon. I. H, Kim. J. H, 2013, “Comparison of correlation between measured and reanalysis data”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 1165-1166.
- [10] Michael C. Brower et al, 2013, “A STUDY OF WIND SPEED VARIABILITY USING GLOBAL REANALYSIS DATA”, Technical Papers of AWS Truepower, pp. 3-4.
- [11] D.J. Cannon et al, 2014, “Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics: A 33 year case study in Great Britain”, A JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION, pp. 213-214.
- [12] Byun. J. K, Son. J. H, Ko. K. N, 2016, “Reliability assessment of ERA-Interim/MERRA reanalysis data for the offshore wind resource assessment”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 44-51.
- [13] Korea Meteorological Administration, 2007. “The research report to develop wind resource map”.
- [14] Kim. H. G, Kang. Y. H, Jo. D .K, 2013, “New & Renewable Energy Resource Map Service”, Korea Wind Energy Association, Vol. 4, No. 1, pp. 5-9.
- [15] Lars Landberg, 2016, “Meteorology for Wind Energy An Introduction”, WILEY, pp.158-159.
- [16] Max J. Suarez et al, 2007, “Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation”, NASA/TM-2007-104606, Vol.27, pp. 2-14.

- [17] Morten Lybech Thøgersen, M.Sc. 2010, “WindPRO / Online, Remote Sensing Data and Other Data for Download in WindPRO”, EMD International A/S, pp.26-36.
- [18] D. P. Dee et al, 2011, “The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system”, Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 22, No. 6, pp. 553-554.
- [19] Michele M. Rienecker et al, 2011, “MERRA : NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications”, JOURNAL OF CLIMATE, Vol.24, pp. 1-2.
- [20] Paul Berrisford, 2011, “The ERA-Interim archive”, ECMWF, ERA Report Series No.1 Ver 2.0.
- [21] J. H. Kim, K. I. Kwon, U. S. Park, N. S. Yoo, and I. S. Paek, 2014, “Prediction of Annual Energy Production of Wind Farms in Complex Terrain using MERRA Reanalysis Data”, Journal of The Korean Society for Solar Energy Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 82-90.
- [22] L. Prandtl, 1904, “Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung”, In: Verhandlungen des dritten internationalen Math. Kongresses, Heidelberg, Teubner Verlag, Leipzig, pp. 484, 491.

감사의 글

인생은 항상 선택과 도전의 연속이라는 생각으로 대학원 석사과정에 입학하여 어느덧 두 번의 겨울을 보내게 되었습니다. 늦은 나이에 대학원 공부를 한다는 것이 쉽지 않은 선택이었고 도전이었으나, 여러분들의 도움이 있었기에 이렇게 석사과정을 마무리할 수 있었던 것 같습니다. 부족한 제가 이렇게 학위논문을 발표하고 대학원을 졸업할 수 있는 영광을 주신 분들에 대하여 이 면을 빌려 감사의 마음을 전합니다.

제주대학교 대학원 풍력공학부가 만들어지고 발전될 수 있도록 불철주야 노력 하셔서 많은 학생들이 최적의 풍력교육환경에서 공부할 수 있도록 헌신해 주시는 허종철 교수님, 풍력에 문외한이었던 제가 논문을 쓸 수 있도록 각종 논문 및 자료를 제공해 주시고 논문을 쓰는데 있어서 미흡한 부분을 세세한 부분까지 조언 및 지도를 해주신 고경남 교수님, 수준 높은 자료와 열정적인 강의로 엔지니어로서 부족한 기술과 역량을 절실하게 깨닫게 해 주신 김범석 교수님, 재해석 데이터를 처리하는 데 있어서 필요한 수치해석 프로그램을 개발하고 인생의 선배로서 많은 조언을 해주신 양경부교수님, 그리고 각종 서류 작성 및 행정 업무를 도와주신 김봄솔 선생님, 이 모든 분들에게 진심으로 감사합니다.

그리고 늦은 나이에 연구실 신입생으로 들어와서 여러 가지 불편한 부분들이 있었겠지만 항상 이해하고 도움을 준 연구실 내의 여러 학우들에게도 진심으로 고마움을 전달하고 싶습니다. 연구실의 리더로서 책임감 있게 연구실을 운영하고 학우들을 챙겨주고, 논문 작성이나 수업 받는데 선배로써 많은 도움을 준 신동헌 박사과정, 석사 과정 동기로서 입학부터 졸업까지 2년이라는 시간을 함께 하고 나이 많은 형님이라 불편한 일들이 많았음에도 묵묵히 옆에서 도와준 손진혁 석사과정, 함께 한 시간은 짧았지만 연구실 실원으로서 도움을 준 강동범 박사과정, 김병택 석사과정에게도 감사를 드립니다. 그 외에도 함께 수업을 들었던 김범석 교수님 실험실의 김종화, 이진석, 한우범에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 마지막으로 지금은 학교를 떠났지만 각자의 직장에서 훌륭하게 일하고 있는 김대영, 주범철, 김효정, 한지훈, 허정훈, 현지영 선배님 등, 제가 풍력을 공부하는데 많은 가르침과 정성어린 도움을 주신 모든 분에게 감사드립니다.

마지막으로 남편의 새로운 도전을 받아주고 응원해 준, 나의 마지막 사랑인 아내에게 고마움을 전하며, 2년 동안 배운 것들을 제주도 풍력사업 발전을 위해 최선을 다하겠다는 다짐으로 감사의 글을 마무리 하겠습니다.

2016.12.5

변 종기 올림