

# 초대형 풍력터빈 시험을 위한 실증시험장 설계

김상만\* · 정태윤\*\* · 문채주\*\*\*

## Design of Test Site for Large-Scale Wind Turbine Performance Verification

Sang-Man Kim\* · Tae-Yoon Jeong\*\* · Chae-Joo Moon\*\*\*

### 요약

본 논문은 풍력터빈의 시제품 인증을 위한 국제 규정에 근거하여 풍력터빈 시험장을 설계하였다. 시험장에 설치되는 기상탑의 최대 높이는 140m이며, 5MW 이상 풍력터빈을 최대 3대까지 시험할 수 있는 전력설비가 구성되어 있다. 설치된 기상탑에서 측정된 기상자원은 감시시스템을 이용하여 기록 및 분석이 가능함을 확인하였다. 풍력터빈 제조업체는 이 시험장을 인증기간 동안 사용할 수 있고 설치된 풍력터빈은 지속적인 발전사업도 가능하다. 따라서, 장기적으로 풍력터빈의 성능 및 내구성을 측정하여 모델을 개량하거나 새로운 풍력터빈을 개발하기 위한 기초자료를 얻을 수 있다.

### ABSTRACT

This paper designs a wind turbine test site based on international regulations for the certification of wind turbine prototypes. The maximum height of the meteorological mast installed at the test site is 140m, and power facilities capable of testing up to three wind turbines of 5MW or more are installed. The weather resources measured at the mast can be recorded and analyzed using a monitoring system. Wind turbine manufacturers can use this test site during the certification period, and the installed wind turbines can be used for continuous power generation projects. Therefore, this test site can provide fundamental data for measuring the long-term performance and durability of wind turbines, which can be used to improve models or develop new wind turbines.

### 키워드

Meteorological Mast, Performance Evaluation, Wind Energy, Wind Turbine Test, Wind Turbine Certification  
기상탑, 성능 평가, 풍력 에너지, 풍력 터빈 시험, 풍력 터빈 인증

## 1. 서론

전 세계적으로 풍력발전은 육상풍력 중심으로 성장해 왔으며 향후 세계 각국의 투자 확대에 따라 급속한 성장세가 지속될 전망이다. 또한 국내에서도 에너지 3020 정책에 의거하여 재생에너지 발전량

비중 20% 달성을 위한 방안을 추진하고 있으며, 이중 16.5GW의 신규 풍력발전을 계획하고 있다. 풍력발전 단지개발에 있어서 입지조건의 제한, 많은 초기 투자비용, 주민수용성, 전력계통연계 등 선행 조건과 수익을 만족하기 위한 대용량, 대단위 개발이

\* (사)에너지밸리산학융합원(smkim@eiuca.or.kr)

\*\* (재)전남테크노파크(jty0743@jntp.or.kr)

\*\*\* 교신저자 : 국립목포대학교 전기및제어공학과

• 접수일 : 2023. 04. 06

• 수정완료일 : 2023. 05. 09

• 게재확정일 : 2023. 06. 17

• Received : Apr. 06, 2023, Revised : May. 09, 2023, Accepted : Jun. 17, 2023

• Corresponding Author : Chae-Joo Moon

Department of Electrical & Control Engineering, Mokpo National University,

Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

진행되면서 국내 대형 풍력 시스템 제조사들은 해외 기업과 경쟁력 확보를 위해서 5MW급 이상 풍력발전기 개발을 진행하고 있다. 이에 따라 기업의 신속한 시장 진출을 위한 완성 제품의 인증확보가 적기에 이루어지기 위한 실증시험 인프라 필요성 제기되어 왔다[1-3].

풍력터빈 출력을 예측하거나 시험하는 것은 그 결과를 기반으로 다양한 응용이 가능하기 때문이다. 출력을 예측하는 것은 이론적인 배경에 따라 그 결과를 확인하는 작업이기도 하지만 풍력터빈의 출력의 안정화를 위한 에너지저장장치 설계나 송전선로의 안정도 계산에서 중요하다. 한편, 풍력단지를 조성하는 개발자 입장에서는 구매하는 터빈의 기술적인 성능을 확인해 주는 절차나 결과가 매우 중요하다. 풍력터빈의 성능은 풍속이 중요한 인자이기도 하지만 난류강도를 무시할 수 없다. 난류강도는 풍력터빈의 제작 등급을 결정하고 그 결과에 따라 제작단가가 상승하게 된다. 해상풍력단지를 설계하는 경우 해상기상탑 설치도 필요하다. 이는 해상풍력단지 설계시 설치되는 터빈의 발전량을 환산하여 경제성을 평가하기도 하지만 단지조성 이후 풍속 대비 발전량을 비교하기 위하여 계속 사용하기도 한다[2],[4-6].

현재 국내 풍력발전기의 성능평가는 IEC(International Electrotechnical Commission) 규정에 기초한 설계와 제조로 성능평가 기관의 요구조건에 만족하는 평가단지는 제주지역과 영광지역이나, 이는 1~5MW급 대형 풍력발전기의 인증·실증 지원이 가능한 단지로 초대형 풍력발전기 모델인 6MW 이상의 터빈에 대한 시험평가, 인증, 실증, 지원을 위한 인프라는 구축되지 않았다. 영광지역의 풍력시스템 평가센터는 풍력터빈에 대한 시험을 국제규격 IEC에 근거하여 수행하며, 국내 인증은 한국에너지공단, 국제인증은 DNV-GL(: Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd), TUV-SUD(: Technischer Überwachungsverein Süd, UL(: Underwriters Laboratories)등에서 수행하고 있다[1],[7-9].

본 연구에서 추진하는 5MW급 이상 풍력발전기의 성능평가를 위한 실증시험장은 영광군 백수읍 하사리 공유수면에 해당하며, 2008년 DEWI(Deutsche Windenergie Institut)에서 현장조건에 대

한 인증을 받았으며, 2013년 120m 기상탑 2기를 구축하여 성능평가 실증시험장으로 활용하고 있는 지역이다[7]. 설계기준과 현장에서 측정된 풍황자원에 근거하여 3기의 5MW급 이상 풍력발전기의 성능을 평가하기 위한 기상탑 설치 위치를 선정하고, 이를 바탕으로 선정된 지점에 140m 대형 기상탑 1기 구축한다. 설치된 기상탑을 통해 얻어진 최근 7개월간 수집된 풍황자료의 분석결과를 통하여 풍력터빈의 성능시험 현장조건을 분석하고 국제적인 성능평가 실증시험장으로 적합성을 확인하고자 한다. 2장은 풍력터빈의 국내의 인증요건을 조사하고, 3장은 실증시험장의 기상탑 위치를 선정하기 위한 풍황조건을 분석하여 설치하였으며 4장에서는 설계된 실증시험장의 기능을 확인하고 5장에서는 실증시험장을 평가하였다.

## II. 풍력터빈 인증 요건

### 2.1 국제인증

풍력터빈의 국제인증요건은 국제전기표준회의인 IEC의 IEC WT01에서 제시하고 있다. 이는 풍력발전시스템의 인증 및 적합성 평가, 절차정의, 문서조항 등 인증에 관한 모든 요구사항을 다루고 있다. 풍력발전기 제조사(자)가 인증을 받기 위해서는 IEC WT01의 기준 및 요구사항에 따라 인증기관에서 수행하는 해당 절차를 통해 요구기준을 만족시켜야 한다. IEC WT01에서는 인증범위를 크게 형식인증, 프로젝트인증, 부품인증으로 구분하고 있다. 인증절차는 그림 1과 같이 일반적으로 형식인증을 취득한 후 프로젝트인증 절차를 받는 순서이며, 부품인증의 경우 별도로 분리되어 있다. 또한 인증범위 중 하나를 선택하여 단독으로 인증을 취득할 수 있다[10].

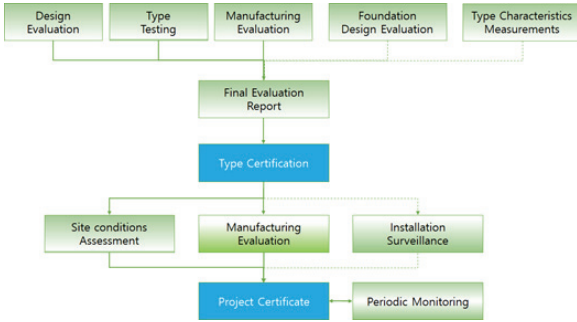


그림 1. IEC WT 01 인증절차  
Fig. 1 Certification procedure of IEC WT 01

형식인증은 인증범위 중 가장 일반적인 인증형태로 풍력발전기가 설계가정, 특정기준 및 다른 기술 요구사항을 준수하여 설계되었는지의 적합성에 대해서 검증하는 것이 목적이다. 형식인증은 총 4개의 필수요소와 2개의 선택요소로 구성되어 있다. 필수요소 첫 번째인 설계평가는 풍력발전기가 설계가정, 특정기준 및 기술적 요구사항에 맞도록 설계되었는지 그 적합성을 평가하며, 두 번째인 형식시험은 발전기의 출력성능 및 안전성과 발전성능을 검증한다. 세 번째로 제작평가는 특정 풍력발전기가 설계문서와 일치하여 제작되었는지를 평가하고 마지막으로 최종평가에서는 앞서 설명한 3개의 필수요소들의 평가가 포함된 모든 운영기관들의 실험결과 및 평가문서를 제공한다. 본 연구에서 수행하는 분야는 형식인증에서 요구되는 풍력시스템의 실험결과를 산출하기 위한 실증시험장 설계이다.

## 2.2 국내인증

국내의 경우 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법의 제13조 신·재생에너지 설비 인증에 근거하여 인증기관을 통해 일정기준 이상의 신·재생에너지설비에 대하여 인증제도를 수행하고 있다. 풍력분야의 설비심사는 국제인증에서 인용하는 IEC 61400 시리즈와 IEC WT01의 규격을 기반으로 크게 소형(용량 30kW 미만),중대형(용량 30kW 이상), 소형 풍력발전용 인버터(정격출력 10kW 이하)로 분류하여 실시하고 있다.

## III. 풍력터빈 실증시험장 설계

### 3.1 기상탑 위치 설정

140m 기상탑의 설치에 먼저 성능평가용 풍력발전기 위치를 선정된 이후 결정해야 한다. 설치 위치를 선정하기 위하여 그림 2와 같이 기존 120m 기상탑 1(N35°28' 55.78" E 126°35' 78.66")의 데이터를 활용하였으며 데이터 취득기간은 2014. 12. 01 ~ 2019. 04. 10 까지이고 풍향데이터 측정 높이는 120m, 118m, 80m이다.

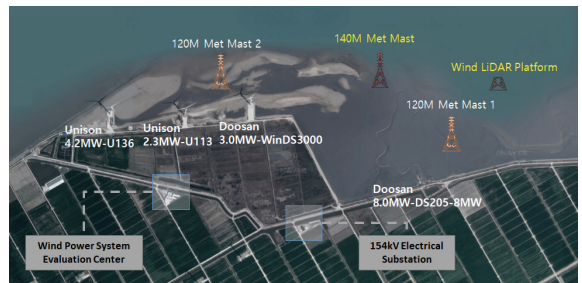


그림 2. 기상탑 위치  
Fig. 2 Location of meteorological mast

4년간 월별 풍속 누적 데이터를 분석한 결과 그림 3과 같으며 120m 높이에서 연간 평균 풍속은 5.39[m/s], 118m에서 5.32[m/s], 80m에서 5.12[m/s]로 분석되었으며 7월이 6월이나 8월보다 높게 나온 것은 태풍의 영향으로 볼 수 있다.

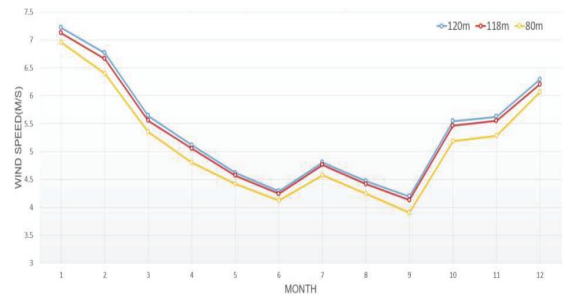


그림 3. 월간 풍속 데이터  
Fig. 3 Monthly wind speed data

난류를 분석한 결과 그림 4와 같으며 1월과 3월의 값이 다른 월보다 낮게 분석된 것은 층류가 많

이 발생된 것으로 볼 수 있다. 풍향 빈도는 그림 5와 같이 모든 높이에서 북쪽 방향이 가장 높은 빈도를 나타냈다.

풍력발전단지 설계프로그램인 WindPRO와 WASP 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 수행하고 국제 인증을 담당한 DNV사의 협력을 통해 풍력발전기 설치 위치를 간섭과 후류, 현장의 지질조사를 고려하여 그림 2와 같이 140m 기상탑의 위치를 결정하였다. IEC규정에 의하면 기상탑과 풍력발전기 이격거리는 2D에서 4D 사이가 적정하며, 2.5D를 추천하고 있다[9].

선정된 초대형 풍력발전기 T1 좌표는 N35°17' 02.328" E126°21' 16.310" 이며 T2 좌표는 N35°17' 06.333" E126°21' 35.483" 이고 T3 좌표는 N33°17' 07.833" E126°21' 55.207" 임에 따라서 기상탑의 좌표는 N35°17' 20.612" E126°20' 36.920" 에 위치한 것으로 결정하였다.

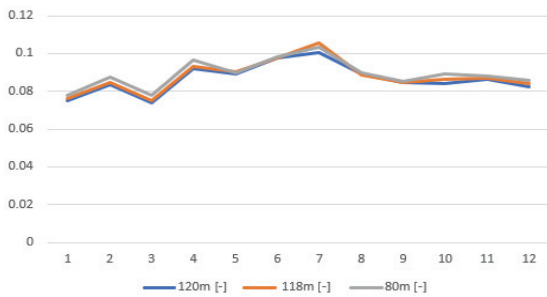


그림 4. 월간 난류강도 데이터  
Fig. 4 Monthly turbulence intensity data

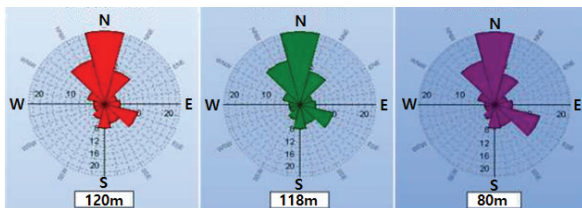


그림 5. 측정데이터의 풍향 빈도  
Fig. 5 Wind rose of measuring data

### 3.2 기상탑 설계

기상탑 상부의 풍속에 의한 기울기를 최소화하고, 제작 및 시공성의 편의를 위해서 지선을 사용하였

다. 센서를 설치하기 위한 지지대인 Boom의 설계는 IEC 61400-12-1의 Annex G (: Mounting of Instrumentation the Meteorology Mast)의 설치기준을 적용하였다[10]. 설계된 구조물에 대한 구조해석 및 분석, 기초공사와 기초구조물 해석과 센서 및 전원공급장치, 항공장애등과 같은 기타 부속물이 설치되도록 그림 6과 같이 설계하였다.

### 3.3 기상탑 시공

기상탑의 하부 지지구조물은 모노파일 형태이며 그림 6과 같이 주 지지구조물은 1개의 구조물이고, 지선 구조물은 각 4개씩 총 12개를 설치하였다. 설치지역은 간조시 갯벌이 드러나는 특성을 고려하여 바지선 해상장비를 활용하여 만조시 지지구조물과 타워를 설치하였다. 주 타워의 지지구조물 설치방법은 하부 지지구조물을 설치 지점으로 이동하고 상부 구조물을 세워두면 자중에 의해 머드라인에서 약 16m까지 침하하는 동안 해상크레인으로 수평을 유지한다. 모노파일의 자중 침하가 멈추면 크레인의 해머를 이용하여 모래층까지 타격하여 고정한다. 상부타워, 상부 플랫폼, 보트랜딩 및 기타 부재를 설치하고, 130m 지선식 래티스 기상탑 설치는 바지선 세팅 후 인력으로 직접 설치한다. 그림 7은 설치된 주 타워 및 지선을 나타낸 것이다.

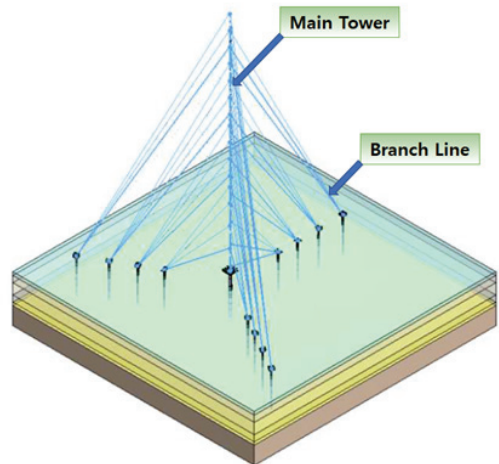


그림 6. 기상탑의 구조설계  
Fig. 6 Structure design of meteorological mast

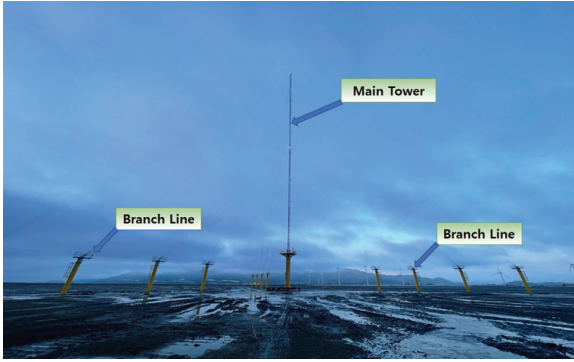


그림 7. 설치된 기상탑  
Fig. 7 Installed meteorological mast

#### IV. 기상탑 기능분석

##### 4.1 풍황자원 수집

구축된 대형기상탑을 통해 2022년 07월 01일부터 2022년 10월 25일까지 4개월간 수집된 140M 대형 기상탑의 140m, 120m, 86m, 69m, 52m, 18m 등에 설치된 풍속계를 사용하여 수집된 풍속 자료는 그림 8과 같이 낮은 풍속대는 주로 낮은 기상탑 고도에서 나타난다.

##### 4.2 풍황자원 분석

풍력터빈의 성능 검증은 풍속 빈도수이기 때문에 구축된 대형기상탑의 허브높이 140m 및 120m에 대한 10분 평균풍속을 빈도수별로 정리하면 표 1과 같다. 풍력터빈은 25m/s에서 운전정지되기 때문에 제시된 빈도수 자료는 성능시험이 가능하다.

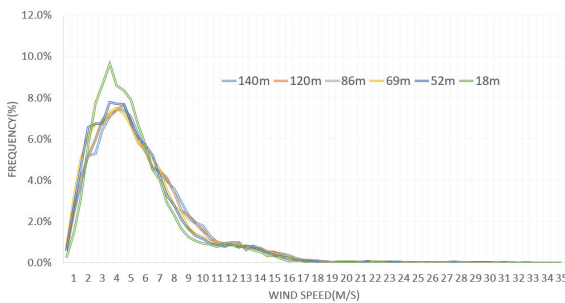


그림 8. 풍속 측정데이터  
Fig. 8 Measuring data of wind speed

표 1. 풍속 빈도수  
Table 1. Frequency of wind speed.

Wind Speed(m/s)	140m Freq.	120m Freq.	Wind Speed(m/s)	140m Freq.	120m Freq.
0.5	99	98	17	21	20
1	400	420	17.5	18	20
1.5	640	690	18	19	15
2	872	863	18.5	10	6
2.5	891	1,004	19	2	2
3	1,085	1,158	19.5	3	5
3.5	1,198	1,195	20	5	2
4	1,255	1,248	20.5	1	3
4.5	1,248	1,292	21	4	5
5	1,197	1,165	21.5	5	3
5.5	1,049	1,010	22	6	7
6	908	903	22.5	6	7
6.5	781	779	23	6	4
7	734	746	23.5	2	3
7.5	667	684	24	3	2
8	603	572	24.5	5	4
8.5	497	432	25	1	1
9	386	381	25.5	0	0
9.5	328	318	26	0	1
10	305	264	26.5	1	2
10.5	220	196	27	2	0
11	169	171	27.5	1	2
11.5	157	143	28	3	3
12	165	157	28.5	1	2
12.5	165	149	29	4	5
13	105	119	29.5	3	1
13.5	131	122	30	1	2
14	112	114	30.5	3	3
14.5	84	91	31	3	2
15	84	87	31.5	1	0
15.5	75	60	32	0	0
16	61	58	32.5	1	1
16.5	34	24	33	0	0

구축된 대형기상탑의 풍황을 살펴보면 저풍속대에서는 주로 북풍이 나타나고 고풍속대에서는 북서풍이 나타났으며 그림 9와 같이 나타난다.



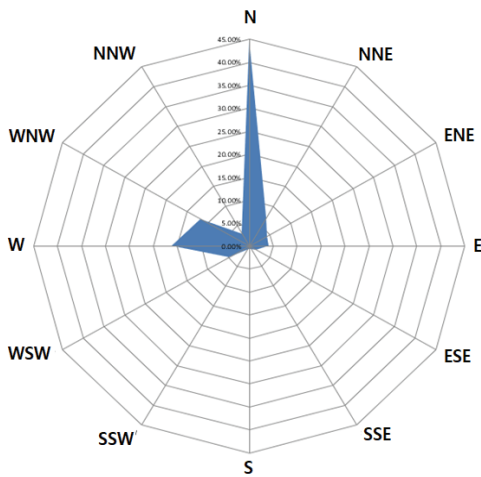


그림 9. 측정된 데이터의 풍향 빈도  
Fig. 9 The wind rose of the measured data

### 4.3 실증시험 조건

측정된 데이터는 3개월에 해당하므로 최소 1년간 데이터를 확보하여야 실증시험 조건을 정확하게 확인할 수 있으나 실증시험에서 수행해야 할 PPT(Power Performance Test)는 다음과 같이 측정한다. ① 출력개시 풍속은 1m/s~1.5m 85% 정격풍속 유지 ② 약 2.5m/s~17.5m/s 내에서 0.5m/s 풍속별 3회 이상 측정을 수행한다.

MLT(Mechanical Load Test)는 다음과 같이 측정한다. ① 풍력터빈 출력개시 속도부터 정격풍속까지 각 1m/s 구간별 최소 30회 측정 ② 정격풍속부터 출력제한 풍속 -5의 풍속까지 각 1m/s 구간별 최소 8회 측정 ③ 출력제한 풍속 -5의 풍속부터 출력제한 풍속 -1의 풍속까지 최소 3회 측정하되 이때 풍속빈도는 2분간의 평균풍속 빈도수이다. ④ 출력제한 풍속 -1의 풍속부터 출력제한까지 최소 1회 측정하되 이때 풍속빈도는 2분간의 평균 풍속 빈도수이다.

이러한 요건의 충족 여부는 빈도수에 의해 결정되며, 3개월간 측정자료가 유사성을 갖고 있는 것으로 확인하였다. 표 1과 같이 산출된 빈도수 데이터는 풍력터빈의 일반적인 출력제한 풍속대인 25m/s 이상이 23회로 나타나 MLT 측정이 가능함을 확인할 수 있다. 또한, PPT 수행에도 충분한 여건을 갖추고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 설치한 기상탑에서 측정된 풍황자료도 유사하게 나올 것으로

예상되며, 선정된 지점이 충분한 실증시험장 조건을 갖추고 있는 것으로 판단된다.

## V. 결 론

풍력산업을 육성하기 위해서는 풍력터빈의 인증과 실적 확보는 필수적이다. 최근 우리나라는 많은 풍력터빈 모델이 개발됨에 따라 다수의 풍력터빈 성능을 평가하기 위한 실증시험장이 요구되고 있으나 현재 제주도에 설치된 시험장으로 제한적이다.

기업에서 추진하는 풍력터빈시스템 개발이 완료되는 시점에서는 성능평가를 위한 실증시험장 확보가 선행되어야 하나 제주도 실증시험장이 포화상태가 되어 유럽과 미국 등 외국 실증시험장을 이용해야 하는 실정이다. 본 연구에서는 우리나라 내륙지방의 실증시험장 구축을 위한 풍황자원의 조사, 분석 및 대형 기상탑 구축 등을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 풍력터빈 실증시험장 구축을 위한 풍황자원조사, 와 분석을 통하여 영광 백수 하사리 지역에 대한 5MW 이상 대형 풍력터빈의 실증시험장의 적합성을 확인하였다.

(2) 성능평가를 위한 실증시험장 풍력터빈의 배치를 설계하여 제시하였으며, 설치된 기상탑 풍황자료가 정상적으로 얻어지는 것을 확인하였다.

(3) 구축된 대형기상탑의 140M 높이와 120M 높이 평균 시간대별 최대 풍속은 7.14m/s로 분석되었으며, 평균 월별로 분석하면 최대 풍속은 9.69m/s를 확인하였다.

(4) 제시된 실증시험장은 5MW급 이상의 초대형 풍력터빈 성능평가 시험장으로 설계되었으며, 평가가 종료 후에는 발전사업 용도로 장기 입대가 가능하며, 장기적으로 풍력터빈의 성능 및 내구성 측정하여 새로운 모델 개발에 있어서 구성요소 응답을 수학적으로 모델링할 수 있는 사이트이다.

(5) 향후 대형기상탑에서 수집된 풍황자원의 실시간 원격모니터링시스템을 구축할 계획이며, 장시간의 운영데이터를 분석하여 우리나라 풍력조건을 분석하고자 한다.

(6) 본 실증시험장 구축으로 제주도 실증시험장 규모 확장의 어려움을 해소하고 대형터빈의 접근성을 향상시키는 최상의 실증시험장 될 것으로 기대한다.

## References

- [1] H. Jang, J. Park, Y. Park, and J. Park, "A Study on the Improvement of Domestic Wind Turbine Certification System," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 31, no. 6, 2011, pp. 125-131.
- [2] C. Moon, Y. Chang, T. Park, M. Jeong, H. Joo, O. Kwon, D. Kwag, and G. Jeong, "A study on design of offshore meteorological tower," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 34, no. 2, 2014, pp. 60-65.
- [3] J. Lim, G. Ryu, H. Son, Y. Kim, and C. Moon, "A study on the optimal site selection by constraint mapping and park optimization for offshore wind farm in the southwest coastal area," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 6, 2022, pp. 1145-1156.
- [4] J. Choi and H. Choi, "Prediction of wind power generation using deep learning," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, 2021, pp. 329-338.
- [5] J. Kim, G. Ryu, Y. Kim, S. Kim, and C. Moon, "Selecting the geographical optimal safety site for offshore wind farms to reduce the risk of coastal disasters in the southwest coast of south korea," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 5, 2022, pp. 1003-1012.
- [6] S. Kim, G. Ryu, Y. Kim, and C. Moon, "Sensitivity analysis of wake diffusion patterns in mountainous wind farms according to wake model characteristics on computational fluid dynamics," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, 2021, pp. 265-278.
- [7] C. Moon, Y. Chang, S. So, T. Kim, Y. Kim, M. Jeong, and S. Jeong, "A study on development of test site for wind turbine prototype test," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 33, no. 2, 2013, pp. 101-107.
- [8] J. Kim, K. Oh, M. Kim, and K. Kim, "Evaluation and characterization of offshore wind resources with long-term met. mast data corrected by wind lidar," *Renewable Energy*, vol. 144, 2019, pp. 41-55.
- [9] IEC Standard 61400-12-1, *Wind Turbines Part*

12-1:Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines, 3<sup>rd</sup> Ed., 2005.

- [10] IEC WT 01, *IEC System for Conformity Testing and Certification of Wind Turbines, International Electrotechnical Commission*, 2001.

## 저자 소개

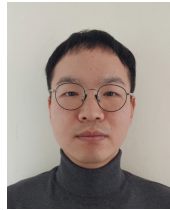
### 김상만(Sang-Man Kim)



2011년, 2014년 및 2022년 목포대학교 공학사, 공학석사, 공학박사  
2013년~2021년 (주)해바람에너지  
2021년~2022 목포대학교 스마트리드 연구소 전임연구원  
2023년~현재 (사)에너지밸리산학융합원 선임연구원

※ 관심분야 : 마이크로그리드, 태양광발전시스템, 소형풍력발전시스템, 계측기(라이다), 해양구조물

### 정태윤(Tae-Yoon Jeong)



2008년 및 2010년 부경대학교 공학사, 공학석사  
2011년 한국에너지기술연구원 위촉연구원  
2012년~현재 (재)전남테크노파크 선임연구원

※ 관심분야 : 풍력발전단지 개발, 풍력발전기 인증, 신재생에너지 정책

### 문채주(Chae-Joo Moon)



1981년, 1983년 및 1994년 전남대학교 공학사, 공학석사, 공학박사  
1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기및제어공학과 교수  
2017년~현재 (사)에너지밸리산학융합원장

한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼니스트, 전력전자학회 부회장, 이투스 및 한국전기신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장 역임

※ 관심분야: 풍력발전 및 전력변환시스템, 전력시스템, 에너지정책

