



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](#)

碩士學位論文

복잡지형에서의 기상탑 및 나셀변환함수를
이용한 풍력터빈 출력성능 비교연구

濟州大學校 産業大學院

風力工學科

姜 旻 尙

2016年 6月

복잡지형에서의 기상탑 및 나셀변환함수를 이용한 풍력터빈 출력성능 비교연구

指導教授 高 旻 男

姜 旻 尙

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016年 6月

姜旻尙의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 김 병 석 
委 員 김 경 남 
委 員 최 기 철 

濟州大學校 産業大學院

2016年 6月

Comparative Study of Wind Turbine Power Performance in Complex Terrain Using Met Mast Data and Nacelle Transfer Function

Minsang Kang

(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

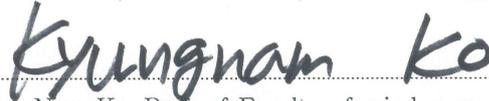
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Engineering

2016 . 6 .

This thesis has been examined and approved.



Thesis director, Bum-Suk Kim, Prof. of Faculty of wind energy engineering



Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of wind energy engineering



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



Date

Department of Wind Energy Engineering
Graduate School of industry
Jeju National University

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	v
I. 서 론	6
1. 연구배경	6
2. 연구동향	8
3. 연구목적	9
II. 시험개요	10
1. 시험장 사양	10
2. 나셀변환함수	14
3. 시험장비	15
4. 데이터수집 및 처리	17
III. 나셀변환함수를 이용한 출력성능 시험	21
1. 연구절차	21
2. 시험장 평가	22
3. 나셀변환함수 도출	29
4. 출력곡선 도출	33
5. 연간에너지생산량 산정	41
IV. 측정불확도 추정	43
1. 나셀변환함수를 이용한 연간에너지생산량 불확도 평가	43
2. 불확도 비교분석	49
V. 결 론	50
참고문헌	52

List of Figures

Fig. 1 Cumulative wind power capacity worldwide	6
Fig. 2 Modules in component certification and their applications for type certification	7
Fig. 3 Location of A wind farm, Jeju, Korea	10
Fig. 4 Layout of A wind farm, including a met mast and the wind turbine tested ..	11
Fig. 5 The wind turbine tested (WTG15, 2000 kW)	12
Fig. 6 The 80 m-height met mast for this study	13
Fig. 7 An example of the wake behind a wind turbine	14
Fig. 8 Data acquisition system for power performance testing	15
Fig. 9 Research methodology for this study	21
Fig. 10 The procedure for test site assessment	22
Fig. 11 The neighboring main obstacles around the wind turbine tested	23
Fig. 12 The region for terrain assessment of the test site	27
Fig. 13 Terrain variation within 2L at 270° direction	28
Fig. 14 The correlation of the nacelle wind speed and met mast wind speed	29
Fig. 15 Sector self-consistency check for NTF validation	30
Fig. 16 Directional stability check for NTF validation	31
Fig. 17 Power curve comparison for NTF validation	32
Fig. 18 Active power vs met mast wind speed using all data	33
Fig. 19 Active power vs met mast wind speed using filtered data	33
Fig. 20 Comparison of scatter plots of various power curves	34
Fig. 21 Comparison of various averaged power curves	34
Fig. 22 Measured power curve(Database A)	37
Fig. 23 Extrapolated power curve(Database A)	37
Fig. 24 Comparison of measured power curves (Database A)	38
Fig. 25 Comparison of extrapolated power curves (Database A)	38
Fig. 26 Turbulence intensity vs wind speed	39

Fig. 27 Turbulence intensity vs wind direction	39
Fig. 28 Wind speed vs wind direction	40
Fig. 29 Rotor speed vs wind speed	40
Fig. 30 Measured AEP comparison with methods provided by IEC 61400-12-1 and IEC 61400-12-2 ..	42
Fig. 31 Extrapolated AEP comparison with methods provided by IEC 61400-12-1 and IEC 61400-12-2 ..	42
Fig. 32 Uncertainty estimate procedures for the power curve and AEP	43
Fig. 33 The comparison of uncertainties in AEPs derived from IEC 61400-12-1 Ed.1.0 and IEC 61400-12-2 Ed.1.0	49

List of Tables

Table. 1	Specification of the wind turbine tested (WTG15, 2000 kW)	12
Table. 2	Specification of the 80 m-height met mast	13
Table. 3	The measurement sensor list and its specifications	16
Table. 4	The wake effect of neighboring wind turbines on the wind turbine tested ..	24
Table. 5	The wake effect of neighboring wind turbines on the met mastt	25
Table. 6	The wake effect of neighboring building obstacles on the wind turbine tested and met mast	26
Table. 7	The result of site terrain assessment for the maximum terrain slope and variation ..	28
Table. 8	Power curve comparison for NTF validation	32
Table. 9	Table of measured power curve (Database A)	35
Table. 10	Table of extrapolated power curve (Database A)	36
Table. 11	AEP comparison with methods provided by IEC 61400-12-2 and IEC 61400-12-1 ..	41
Table. 12	List of uncertainty categories A and B for Nacelle Power Curve	44
Table. 13	Estimate for uncertainty components from NTF measurement	45
Table. 14	Combined standard uncertainty for wind turbine active power	46
Table. 15	Combined standard uncertainty for wind turbine active power(Database A) ..	47
Table. 16	The estimates of uncertainty in AEP	48

Abstract

In order to examine how the wind turbine power performance changes under the situation of complex terrain, the power performance testing was conducted on the A wind farm, Jeju Island, Korea. Topography of the A wind farm was assessed according to the International Standard, IEC 61400-12-1, which led to the fact that the A wind farm needs site calibration for power performance testing. Without site calibration, however, power performance measurement was conducted in accordance with the procedure provided by IEC 61400-12-1 and IEC 61400-12-2. The power curve was drawn using wind data from an 80 m-height met mast in compliance with IEC 61400-12-1, and it was also estimated using nacelle wind data from the wind turbine SCADA data in accordance with IEC 61400-12-2. Finally, measurement uncertainties were estimated for comparing uncertainty estimates from the two International Standards. As a result, the derived nacelle transfer function, NTF, did not meet the regulation for its validation. The comparison of Annual Energy Productions, AEPs, estimated by the met mast wind data and NTF showed that AEP-measured presented the difference between 1.2% and 2.4% and the difference of AEP-extrapolated ranged from 0.4% to 2.4%. That is, the derived NTF could not be used for another wind turbine power performance measurement since the difference should be within 1% regulated by IEC 61400-12-2. This result was caused by the difference of the two power curves estimated using the met mast wind data and the NTF, which came from not performing site calibration in this investigation. In addition, the magnitude of measurement uncertainty by IEC 61400-12-2 was two times that by IEC 61400-12-1.

I. 서 론

1. 연구배경

풍력발전설비는 전세계적으로 2004년부터 2013년 까지 연간 25.3% 증가율을 보이면서 19배 가까이 증가하였고, 2013년에는 전년대비 20.2% 증가한 누적용량 318GW에 이르렀다. 상위 10개국이 풍력발전 시장을 85% 점유하고 있으나, 2013년말 85개국에서 상업적 풍력사업이 진행되고 있으며 71개국 이상에서 10MW급 규모 이상의 가파른 설비증설이 이루어지고 있다. Fig. 1은 전세계 풍력발전터빈의 누적용량이 가파르게 증가하는 모습을 보여주는 그래프로 풍력발전시장의 급격한 성장을 보여준다.

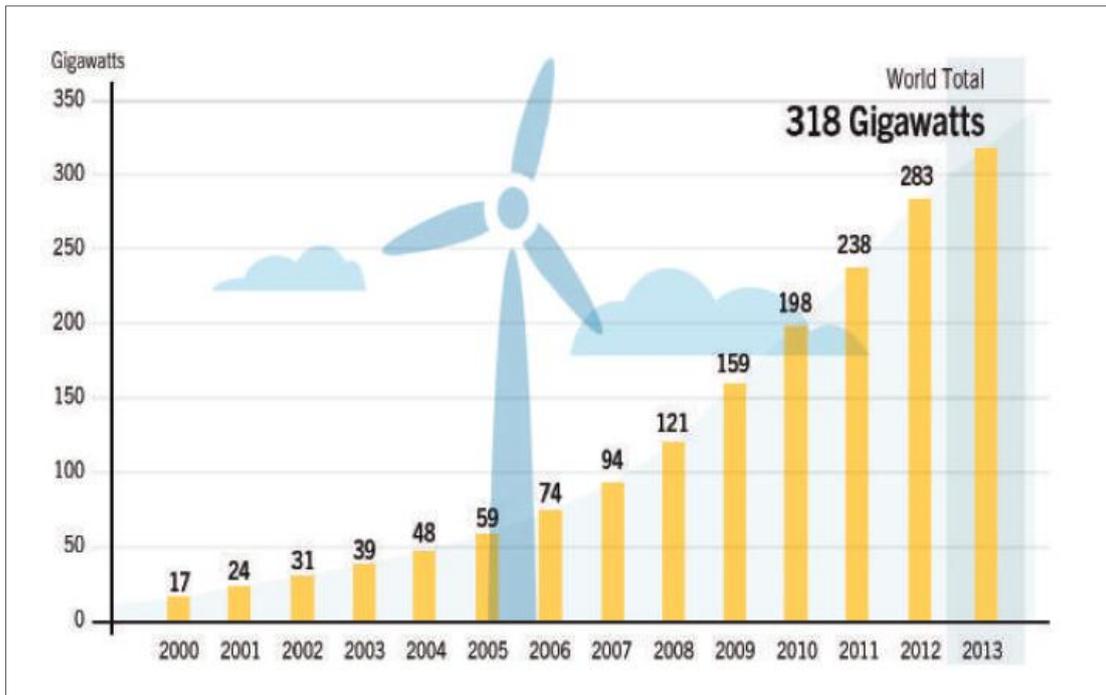


Fig. 1. Cumulative wind power capacity worldwide [1]

국내에서는 정부의 신재생에너지 보급정책과 맞물려 높은 경제성을 인정받은 풍력발전사업이 활발히 진행되었다. 2015년 풍력발전 신규설비용량은 196,350kW로 전년도

47,200kW보다 약 4.2배 증가하여 누적설비용량 804,850kW를 차지하였다. [2]

상용 풍력발전단지는 지속적으로 늘고 있지만, 국내 해상풍력발전에 대한 뚜렷한 진전을 보이지 못하여 국내 풍력발전 제작사의 신규개발 풍력터빈은 점차 감소 추세에 있는 실정이다.

하지만 분명히 풍력발전 시장은 지속적으로 성장하고 있으며, 이에 발맞추어 풍력발전단지의 출력성능 검증(Power performance verification)의 수요는 증가하고 있다. 풍력발전단지의 출력성능 검증의 목적은 조성된 풍력발전단지에서 제작사가 제시한 출력성능이 제대로 나오는지 현장에서 측정을 통하여 검증하는데 있으며, 이 결과에 따라 성능이 나오지 않는 경우, 풍력발전단지 사업자는 제작사에게 일정부분의 패널티를 요구하게 된다.

따라서 출력성능 검증은 현재 국내에서 법제화되지는 않았지만 단지 조성 시 반드시 거쳐야할 절차이며, 풍력발전단지 사업자와 제작사 모두 민감하게 다루는 문제이다.

또한 출력성능시험은 풍력발전단지의 출력검증을 위한 목적 외에도, 신규 개발 풍력터빈의 수출, 설치 및 운전을 위한 제품 인증의 목적으로 형식시험(Type testing)의 일환으로 반드시 수행되어야하는 의무 시험이다. [3] 풍력터빈의 출력성능 시험은 터빈의 인증, 운전 및 검증 시 다양한 목적으로 적용될 수 있는 시험으로 활용도가 높으며, 보다 정확한 시험을 위한 연구의 필요성을 갖고 있다.

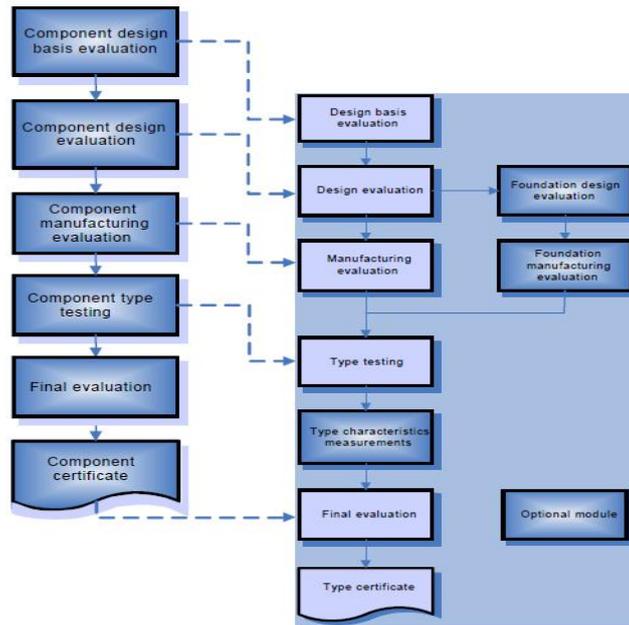


Fig. 2. Modules in component certification and their applications for type certification [3]

2. 연구동향

이미 풍력터빈은 기술적 성숙도를 고려하였을 때, 연구단계를 지나 상용화·보급화의 단계에 도달하였다. 풍력발전의 높은 사업성으로 전세계적으로 대단위 풍력발전단지 운영되고, 지속적으로 신규 풍력발전단지가 건설·계획 중에 있다. 따라서 풍력단지의 사업성 평가, 풍력터빈의 제품 경쟁력 등에 있어서 풍력터빈의 출력성능은 중요한 평가지표로 작용되어 왔고, 필연적으로 정확하고 객관적인 풍력터빈 출력성능평가를 위하여 시험 기술도 보다 고도화 되어왔다. [4] 기상탑을 이용한 출력성능시험 IEC 국제 시험표준(IEC 61400-12-1 Ed.1.0)이 2005년에 추가되었고[5], 현재 원격탐사장치 (Remote Sensing Device)를 활용한 시험방법(IEC 61400-12-1 Ed.2.0)이 추가된 개정본이 발행될 예정이다. 이 외로 나셀 풍속계를 이용한 출력성능 시험 표준(IEC 61400-12-2 Ed.1.0)도 2013년에 발행되어 시험기준으로 활용되고 있다.[6]

정확하고 객관적이며 합리적인 출력성능 시험기술에 대한 필요성이 대두되어 많은 국·내외 기술연구가 이루어졌고 이에 대한 결과로 시험표준이 정립되어 있는 상황이다. 국내에서는 출력성능 시험표준(IEC 61400-12-1 Ed.1.0)이 발행된 이후 2005년부터 출력성능 시험분야 연구가 진행되었고 [7], 2006년 본격적으로 시험표준에 따른 출력성능시험

및 불확도 평가가 수행되었다. [8]

이후 다양한 풍력터빈 기종 및 시험장 환경조건에 따라 출력성능시험기술 연구가 진행되었고, 나셀 풍속계를 이용한 출력성능 시험 표준(IEC 61400-12-2 Ed.1.0)이 제정(2013년 3월)된 후 이에 발맞추어 국내에서도 이를 이용한 출력성능시험 연구가 수행되었다. [9]

하지만 현재까지 진행된 나셀 풍속계를 이용한 출력성능시험 기술연구는 평탄지형에 설치된 풍력터빈에 대하여 시험방법을 적용한 것으로, 산악지형이 국토의 70% 이상을 차지하고 있는 국내 시험 여건을 감안하여 폭넓게 시험표준을 적용하기 위해서는 복잡지형에서의 시험표준 적용 및 관련연구가 수행될 필요가 있다고 생각된다.

3. 연구목적

2013년 3월, 나셀변환함수 기반의 풍력터빈 출력성능 시험규격인 IEC 61400-12-2가 발행되었고, 국내에서 단순지형에서의 나셀변환함수를 이용한 출력성능시험 연구가 수행된 바 있다.[9] 하지만 이는 단순지형에서 시험이 수행되어, 실제 측정변수가 다양해진 복잡지형에서는 나셀변환함수가 어떻게 적용될 수 있을지에 대한 연구가 진행된 바는 아직 없다. 산악지대가 많은 우리나라에서 향후 풍력발전단지가 개발되는 경우 평탄한 지형보다 주변에 산, 언덕 등이 위치한 복잡지형에 발전단지가 만들어질 가능성이 높다. 따라서 복잡지형에서 나셀변환함수를 적용한 출력성능시험 기술에 대한 연구가 선행되어야 할 필요가 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 나셀변환함수 기반 출력성능시험관련 국제규격인 IEC 61400-12-2 Ed.1.0을 이용하여 복잡지형에서 나셀변환함수 기반의 출력성능 시험을 수행하여, 이를 기상측정탑 기반 출력성능시험 국제규격인 IEC 61400-12-1 Ed.1.0에 따른 시험결과와 비교함으로써 나셀변환함수를 이용한 출력성능시험을 실제 현업에서의 활용방향을 연구하고자 한다.

또한 기상탑 기반 출력성능 시험규격인 IEC 61400-12-1 Ed.1.0과 나셀변환함수

기반의 시험규격인 IEC 61400-12-2 Ed.1.0의 불확도 평가결과를 비교분석하여, 시험규격에 따른 불확도 범위가 어떻게 달라지는지 연구하는 것을 연구목적으로 한다.

II. 시험개요

1. 시험장(Test site) 사양

1) A 풍력발전단지

출력성능시험에 활용된 데이터가 수집된 장소는 현재 상업운전 중인 A풍력발전 단지로(2MW×15기, 총 30MW 단지규모)로 2015년 8월부터 상업운전을 개시하여 제주에너지공사에서 직접 운영하고 있다.

A풍력발전단지는 해안선으로부터 약 1.9km 떨어져 있으며 주변에는 채석장 및 풍력단지를 중심으로 좌·우로 골프장이 위치하고 주변에는 약 높이 5~10m 나무가 숲을 이루고 있다.

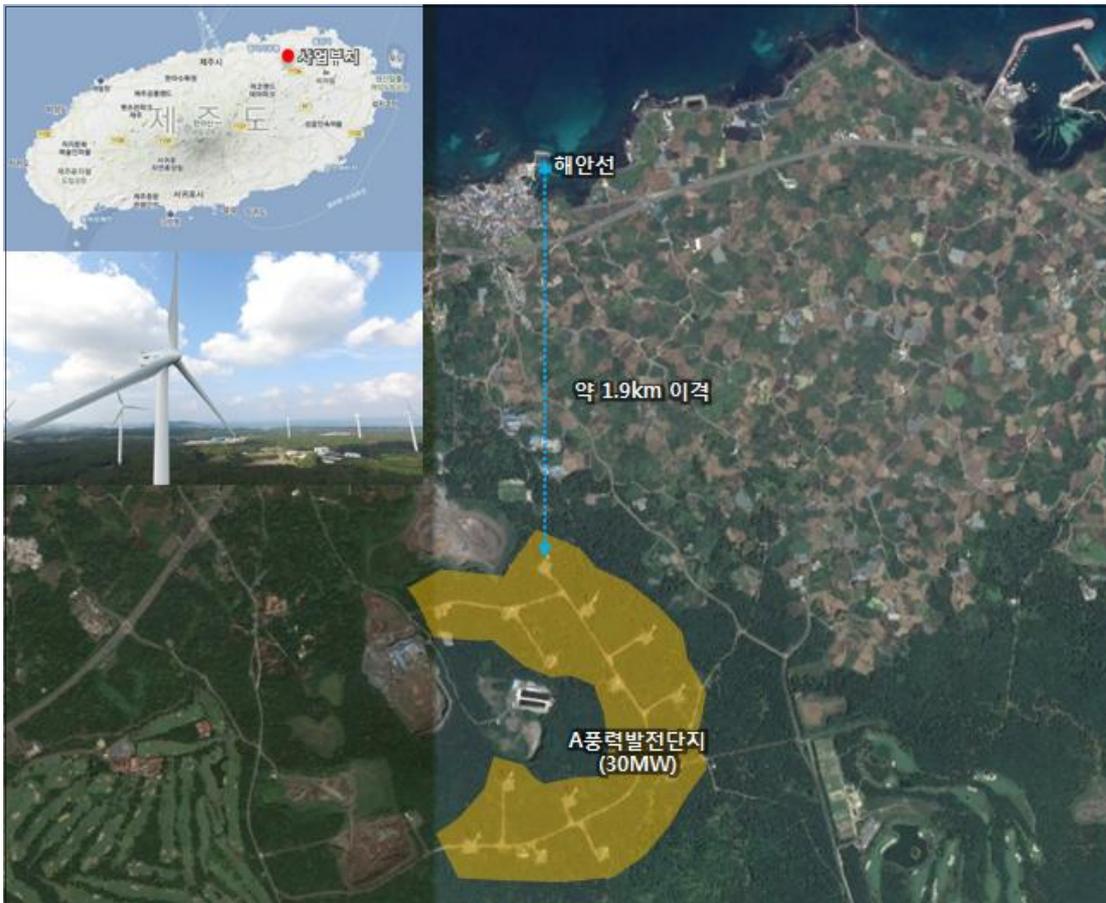


Fig. 3. Location of A wind farm, Jeju, Korea

2) 시험대상 풍력터빈 및 기상측정탑 사양

Fig. 4는 시험장 내 시험대상 풍력터빈과 주변 풍력터빈의 위치를 나타낸다. 시험대상 풍력터빈(WTG15)은 풍력발전단지의 가장 북쪽에 위치해 있으며, 기상측정탑도 정북방향으로 약 220m 떨어져 설치되어 있다. A 풍력발전단지의 주풍향은 북풍으로, 기상측정탑의 설치위치는 후류영향을 받지 않은 유효데이터를 수집하는데 유리하도록 설치되어 있다. Fig. 5는 시험대상 풍력터빈의 모습을 보여주며, 시험 풍력터빈은 정격출력 2MW의 출력을 갖고 시동풍속(V_{in}) 3.5m/s에서 부터 중단풍속(V_{out}) 25m/s의 풍속범위에서 운전하며, 이에 대한 상세사양은 Table 1과 같다. 기상측정탑 구조물은 Fig. 6과 같이 cylindrical mast가 아닌, triangular lattice mast 타입으로 건설되어 세 방향의 지선을 이용하여 고정된 형태를 갖는다. 기상측정탑의 상세 사양은 Table 2와 같다.

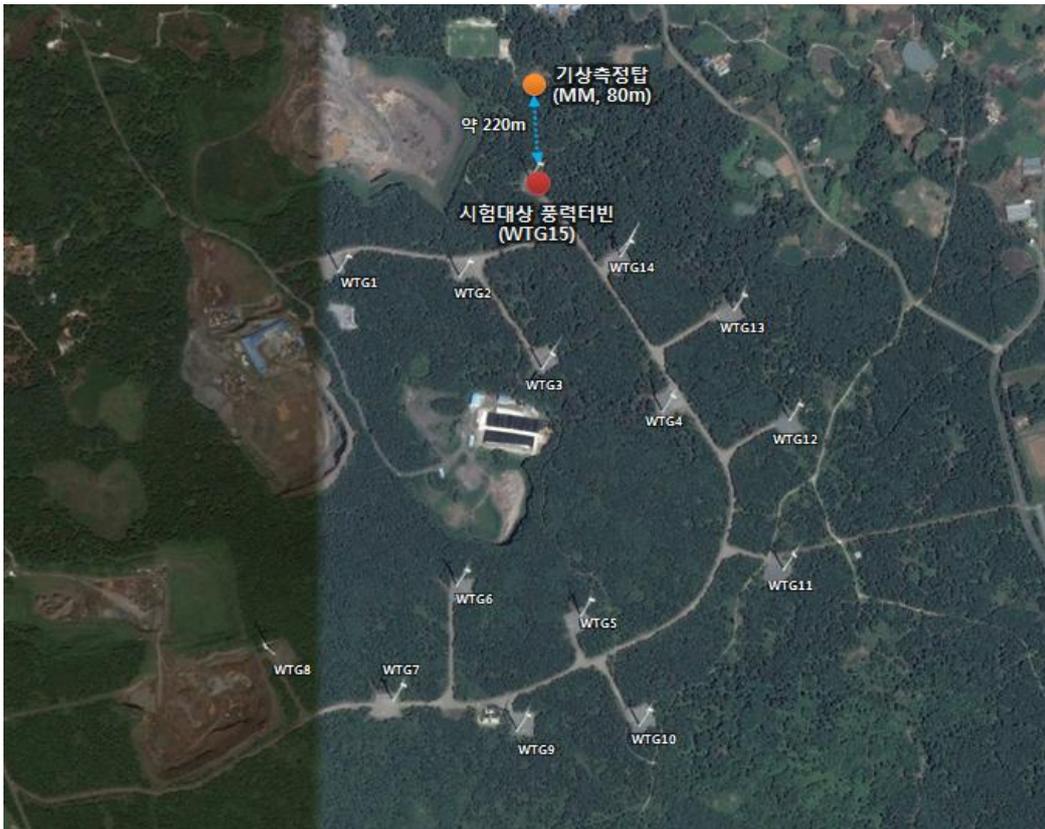


Fig. 4. Layout of A wind farm, including a met mast and the wind turbine tested



Fig. 5. The wind turbine tested (WTG15, 2000 kW)

Table 1. Specification of the wind turbine tested (WTG15, 2000 kW)

항 목	내 용
IEC Class	IEC II A
정격출력	2000 kW
로터직경	87 m(날개길이 42.2 m)
타워높이	80 m
운전풍속	3.5 m/s ~ 25 m/s
정격풍속	12 m/s
극한풍속	42.5 m/s
전압/주파수	690 V / 60 Hz



Fig. 6. The 80 m-height met mast for this study

Table 2. Specification of the 80 m-height met mast

항 목	내 용	비 고
기상측정탑 구조	Triangular lattice tower	지선 지지
기상측정탑 높이	80 m	
구 성	27개 Section	
중 량	3,200 kg	
설치센서	풍속계 3EA	
	풍향계 3EA	
	온·습도계 2EA	
	대기압계 2EA	
	강우계 1EA	

2. 나셀변환함수

Fig. 7은 풍력터빈의 로터로 인하여 발생하는 후류영향을 유동분석 프로그램을 이용하여 가시화한 것이다. Upwind 형식의 풍력터빈인 경우 Fig. 7과 같이 유입되는 풍속에 따라 로터가 회전하며 회전자 뒤편으로 난류성분의 풍속변화를 발생시키게 되고, 로터 뒤편에 설치된 나셀 위 풍속계에서는 후류영향을 받는 풍속을 측정하게 된다. [10]

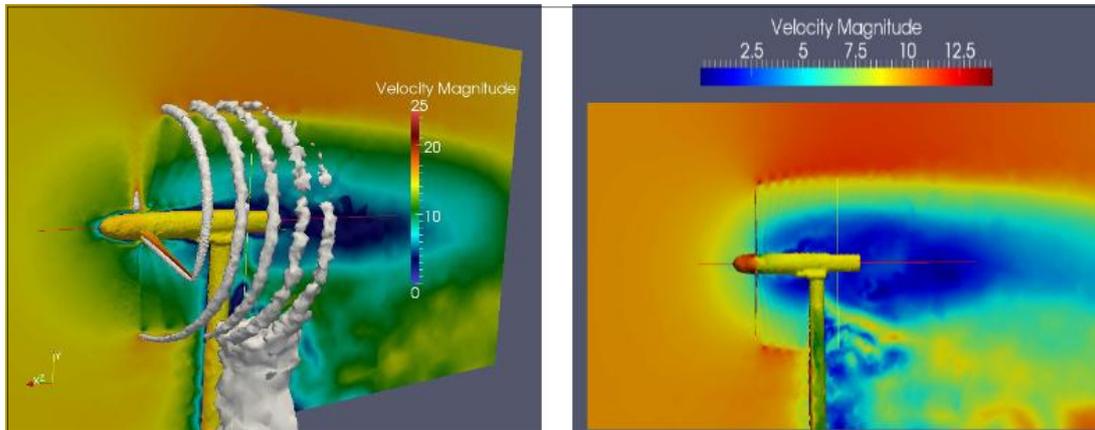


Fig. 7. An example of the wake behind a wind turbine [11]

출력성능시험에서 풍속은 가장 중요한 변수 중에 하나이므로, 일반적으로 별도의 기상측정탑을 설치하여 시험대상 풍력터빈으로 인한 후류영향을 받지 않는 정확한 풍속을 측정하여 출력성능 시험을 수행하여야한다. 하지만 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에서는 기상측정탑과 나셀 위에 설치된 풍속계와의 상관관계를 이용하여 나셀에서 측정된 풍속데이터를 보정하고, 이를 이용하여 출력성능 시험을 수행할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 만약 기존에 도출된 나셀 풍속계와 기상측정탑의 상관관계식이 도출되어 있고, 시험환경이 기존 상관관계식 도출 시의 시험환경과 유사하다면, IEC 61400-12-2 Ed.1.0 시험표준에서는 별도의 기상측정탑을 설치하지 않고 나셀 풍속계만을 이용하여 출력성능시험을 할 수 있는 절차를 제시하고 있다. 나셀 풍속계와 기상측정탑간의 상관관계를 의미하는 수학적 모델을 나셀변환함수(Nacelle Transfer Function, NTF)라고 하고, 나셀변환함수를 구하는 방법은 관련 시험표준에 따라 구간법(Method of bins) 또는 Fitting방법에 따라 도출할 수 있다. 이에 대한 상세한 설명은 3장에서 언급하였다.

3. 시험장비

1) 데이터 수집 시스템

성능시험 수행을 위하여 구축된 측정시스템은 Fig. 8과 같다. 풍속, 풍향, 온·습도, 대기압, 강우데이터는 1Hz의 Sampling rate으로 수집되며 10분 평균데이터로 Climate DAQ(CR1000)에 저장된다. 풍력터빈의 출력, 상태신호, 나셀 풍속, 로터 속도, 피치각 등의 신호는 풍력터빈 내 자체 SCADA system으로 5분 평균데이터로 저장된다. Climate DAQ 및 SCADA system의 시간 동기화는 internet time으로 동기화되어있다. Data server에서 Climate DAQ 및 SCADA system으로 접속하여 수집된 데이터를 로딩하고, 이를 후처리하여 데이터를 분석하였다.

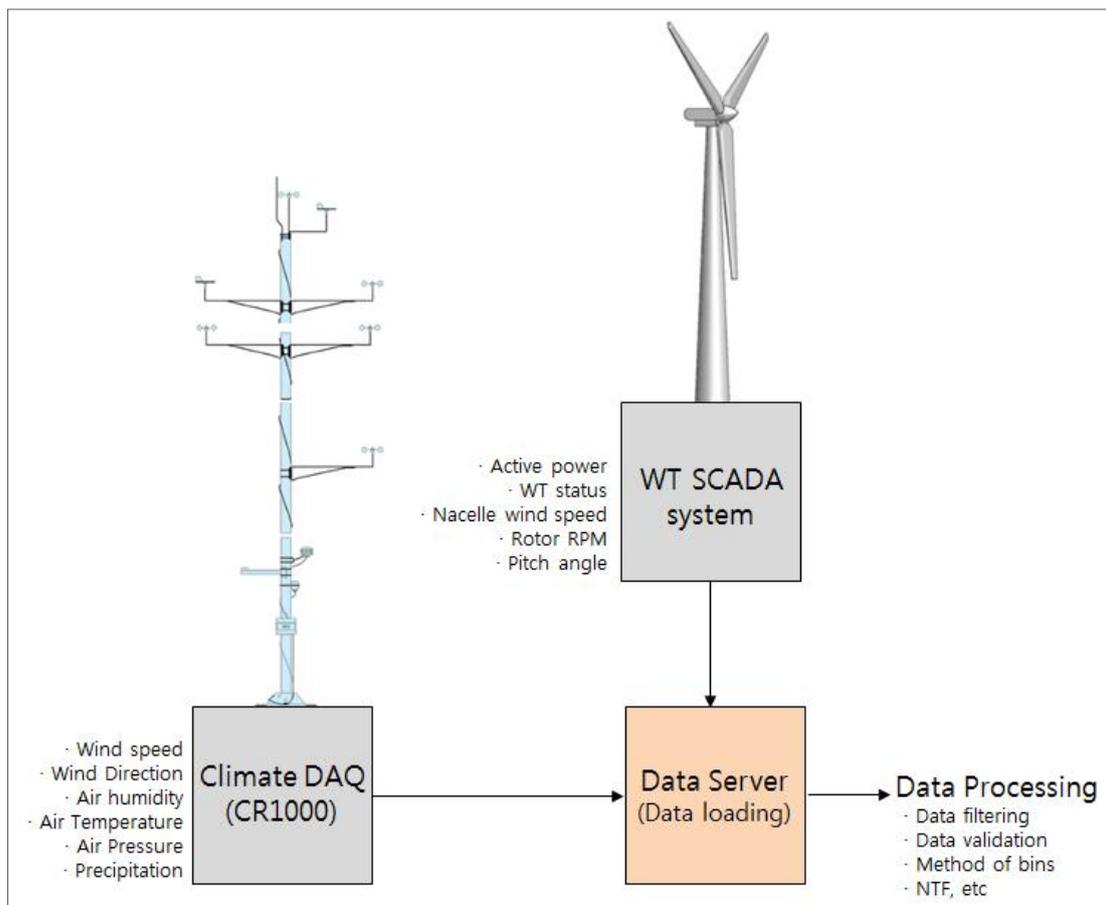


Fig. 8. Data acquisition system for power performance testing

2) 측정장비 사양

시험에 사용된 기상측정탑 내 기상센서는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0 시험기준에 부합한 장비를 사용하였지만 전력측정을 위한 장비는 Class 1급의 변류기(Current transformer), PT(Power transducer)를 이용하여 측정한 SCADA 자료를 이용하였다. 이에 대한 상세한 내용은 Table 3과 같다.

Table 3. The measurement sensor list and its specifications

Install Posi.	Sensor (Install height)	Type	Model name	Specification	Remark
Met mast	Wind speed (80m)	Cup anemometer	Thies first class advanced	Class0.9A/3.0B Accuracy:1%	
	Wind speed (78.5m)	Cup anemometer	Thies first class advanced	Class0.9A/3.0B Accuracy:1%	
	Wind speed (40m)	Cup anemometer	Thies first class advanced	Class0.9A/3.0B Accuracy:1%	
	Wind Direction (78.5m)	Wind vane	Thies wind vane first class	No north gap Accuracy:0.25%	
	Wind Direction (40m)	Wind vane	Thies wind vane first class	No north gap Accuracy:0.25%	
	Air temperature (78.5m)	Hygro clip2	ROTRONIC hygromer	Accuracy:±0.1K -50℃ ~ 100℃	
	Air Humidity (78.5m)	Hygro clip2	PT100 ClassA	Accuracy:±0.8% 0% ~ 100%	
	Air pressure (78.5m)	Piezo crystal	P-GE6/11	Accuracy:±0.1% 600hpa~1100hpa	
Wind turbine	Current transducer	Closing Type	-	Class 1급	SCADA
	Power transducer	3 phase 4 wires	-	Class 1급	SCADA
	Nacelle wind speed	Cup anemometer	wind transmitter	Accuracy:±0.5m/s or ±3%	SCADA

4. 데이터 수집 및 처리

1) 수집데이터 현황

기상데이터 및 풍력터빈 데이터는 1Hz이상의 sampling rate으로 수집되어 10분 최대, 최소, 평균, 표준편차 값으로 통계 처리되었다. 시험에 사용된 데이터는 2016.3.4.~2016.4.17.까지 45일동안 수집된 데이터이다.

2) 데이터 처리

수집된 데이터는 시험기준인 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따라 데이터 제거, 데이터 보정, 데이터 표준화 및 구간법 등의 데이터 처리 절차를 수행하였다.

① 데이터 제거(Data rejection)

측정된 데이터 중 다음 조건에 해당하는 데이터는 측정데이터에서 제거하여 데이터 분석을 수행하였다.[12]

- 측정영역 외 불어온 바람에 의한 데이터
- 결빙(icing) 조건(대기온도 2°C 이하 및 상대습도 80% R.H.이상)
- 풍력터빈의 계통연계 신호(Grid connection)이 low인 경우
- 풍속이 1.75m/s 이하인 경우
- 측정시스템 내 문제발생 시(센서 및 장비에러, 전원, 통신에러 등)

② 데이터 보정(Data correction)

데이터가 수집된 시험장의 지형조건은 IEC 61400-12-1 Ed.1.0 AnnexB의 평탄 지형조건을 만족하지 않는 복잡지형(Complex terrain)으로 별도의 사이트 보정(Site calibration)이 필요한 시험환경을 갖추고 있었다. 사이트 보정을 수행하기 위해서는 시험풍력터빈 위치에도 기상측정탑을 설치하여 기준이 되는 기상측정탑과 시험풍력터빈 위치의 기상측정탑간의 측정풍속 상관관계를 도출해야 하지만 기존에 이미 풍력터빈이 설치되어있는 현실적인 여건을 감안하여 사이트 보정을 수행하지

않고 시험을 수행하였다.

대기압계는 풍력터빈의 허브높이 80m 근처인 78.5m에 설치되어 있기 때문에 ISO 2533에 따른 대기압보정을 수행하지 않고 측정대기압을 이용하여 데이터를 분석하였다. [13]

③ 데이터 표준화(Data normalization)

데이터 표준화는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0의 시험기준에 따라 다음의 두 가지의 기준 공기밀도를 이용하여 수행하여야 한다.

- 첫 번째, 기준 공기밀도를 해수면 기준 공기밀도인 1.225kg/m^3 로 하여 풍속에 대한 표준화(피치제어 풍력터빈인 경우에 한함)
- 두 번째, 만약 시험장의 평균 공기밀도 값이 1.225kg/m^3 의 $\pm 0.05\text{kg/m}^3$ 범위를 벗어나는 경우, 기준 공기밀도를 시험장 평균 공기밀도로 하여 풍속에 대한 표준화를 수행(피치제어 풍력터빈인 경우에 한함)

데이터가 수집된 시험장은 해수면 기준 공기밀도의 $\pm 0.05\text{kg/m}^3$ 범위를 벗어나지 않아 식1에 따라 해수면 기준 공기밀도에 대하여 표준화를 수행하였다.

(식 1) 해수면 공기밀도에 대한 풍속 표준화 수식

$$V_n = V_{10\text{min}} \left(\frac{\rho_{10\text{min}}}{\rho_0} \right)^{1/3}$$

V_n is the normalized wind speed
 $V_{10\text{min}}$ is the measured wind speed averaged over 10 min

④ 구간법(method of bins) 적용

표준화된 풍속에 대하여 구간법을 적용하여 전체 데이터베이스 구간은 $V_{\text{cut-in}}$ 풍속의 -1.5 m/s 풍속에서 $V_{\text{cut-out}}$ 풍속까지로 하고, 각 풍속 구간을 0.5 m/s 단위로 나누어 중간값을 0.5 m/s의 정수배로 설정하였다.

데이터 수집기간이 충분하지 않았기 때문에 $V_{\text{cut-out}}$ 풍속까지 충분한 데이터가 수집되지 않아 외삽법을 통해 측정된 가장 낮은 풍속 아래로 출력은 0이 유지된다고 하고 측정된

가장 높은 풍속 위로는 최종 측정된 출력이 유지된다고 가정하여 시험을 수행하였다.

⑤ 데이터베이스화

측정기간 중 중단 풍속으로 인한 풍력터빈 기동이 측정기간 중 발생한다면 Database를 A와 B로 나누어 Database를 작성해야하지만 중단풍속으로 인한 기동이 발생하지 않았기 때문에 Database A로만 데이터베이스를 작성하였다.

현재 측정기간 중 $V_{cut-out}$ 풍속까지 충분한 데이터가 수집되지 않았기 때문에 IEC 61400-12-1 Ed.1.0에 따라 측정된 데이터를 외삽하여 작성하였다.

⑥ 출력곡선(Power curve) 결정

구간법으로 나눈 구간별 표준화 및 평균화된 풍속과 출력값을 식2에 따라 결정하였다.

(식 2) IEC61400-12-2 Ed1.0에 따른 표준화 및 평균화된 각 구간별 풍속 및 출력값 결정식 [5]

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j}, \quad P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j}$$

V_i is the normalized and averaged wind speed in bin i
 P_i is the normalized and averaged power output in bin i

⑦ Rayleigh 누적 확률 분포함수(CDF) 산출

구간법으로 나눈 구간별 평균풍속이 발생할 확률을 식3에 따라 산출하였다.

(식 3) IEC61400-12-2 Ed1.0에 따른 레일리 확률 누적분포함수(CDF) 산출식 [5]

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right]$$

$F(V)$ is the Rayleigh cumulative probability distribution function for wind speed
 V_{ave} is the annual average wind speed at hub height
 V is the wind speed

⑧ 연간에너지생산량(AEP) 산출

연 평균풍속 4m/s에서 11m/s까지 발생하는 풍력단지라고 가정하였을 때, 각 구간별 풍속이 발생할 확률과 풍력터빈 출력을 고려하여 1년 동안 풍력터빈이 운전한 연간 에너지생산량(AEP)를 식4에 따라 산출하였다.

(식 4) IEC61400-12-2 Ed1.0에 따른 연간에너지생산량(AEP) 산출식 [5]

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right)$$

AEP is the annual energy production
 N_h is the number of hours in one year ≈ 8760
 N is the number of bins
 V_i is the normalized and averaged wind speed in bin i
 P_i is the normalized and averaged power output in bin i

⑨ 출력계수(Power coefficient, C_p) 산정

이론상 바람이 가진 출력에너지에 대한 실제 풍력터빈에서 측정된 출력의 비를 식5에 따라 산정하였다.

(식 5) IEC61400-12-2 Ed1.0에 따른 출력계수(C_p) 산출식 [5]

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3}$$

$C_{P,i}$ is the power coefficient in bin i
 V_i is the normalized and averaged wind speed in bin i

Ⅲ. 나셀변환함수를 이용한 출력성능시험

1. 연구절차

풍력터빈의 2가지 출력성능시험 국제기준인 IEC 표준을 적용하여 개별적으로 출력 성능시험을 수행하여 Fig. 9에 나타난 것처럼 풍력터빈의 출력곡선, 연간에너지생산량, 측정불확도를 서로 비교하는 방법으로 본 연구를 수행하였다.

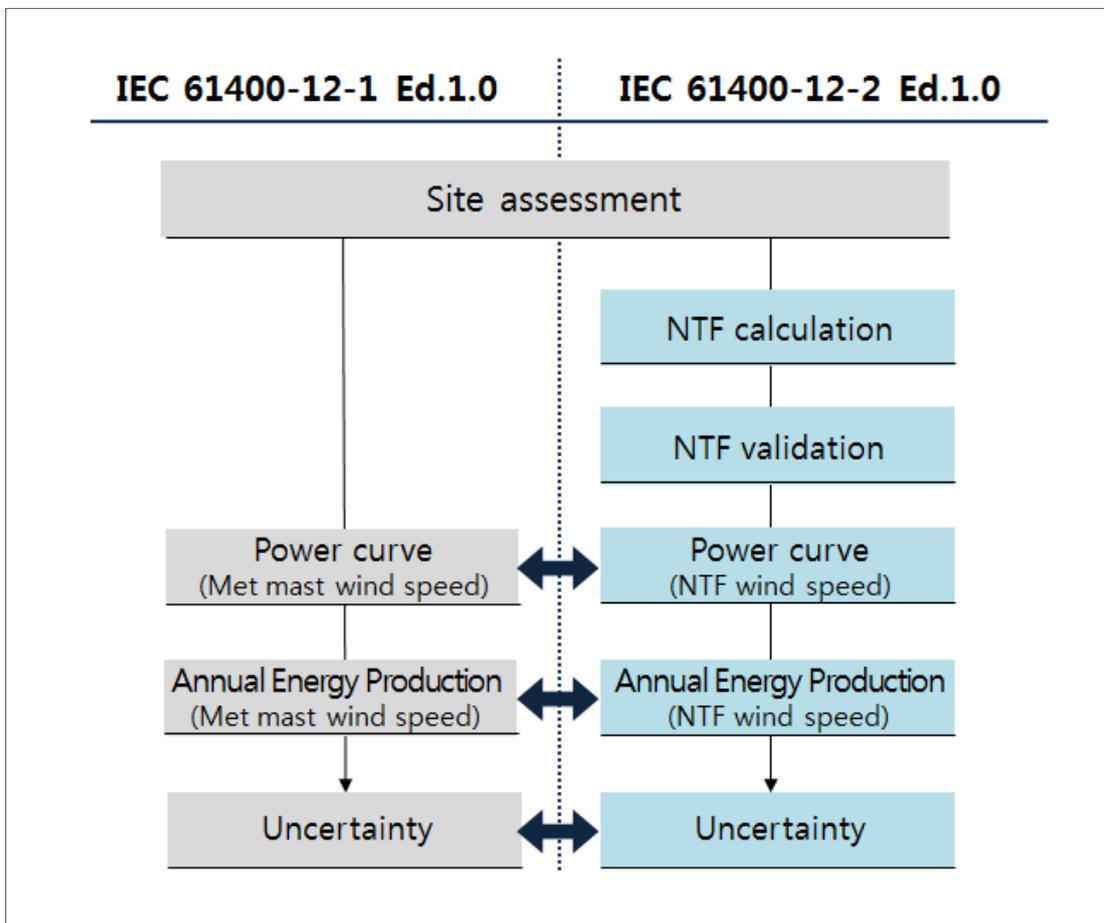


Fig. 9. Research methodology for this study

2. 시험장 평가

시험장 평가는 Fig. 10과 같이 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따라 기상측정탑 및 시험 대상 풍력터빈 주변 장애물(건물, 나무, 주변 풍력터빈 등)에 대하여 유동영향 평가를 실시하고, 유동영향이 있는 장애물에 대하여 각 장애물별 배제각을 산정하였다. 기상측정탑 및 시험대상 풍력터빈에 대하여 각 장애물들로 인한 배제각을 중첩하였을 때, 최종적으로 측정영역을 도출하였다.

도출된 측정영역을 기준으로 하여 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따라 시험장 지형의 지형기울기 및 지형편차를 분석하였고, 시험장 지형조건이 복잡지형인지 평탄지형인지 판단하였다.

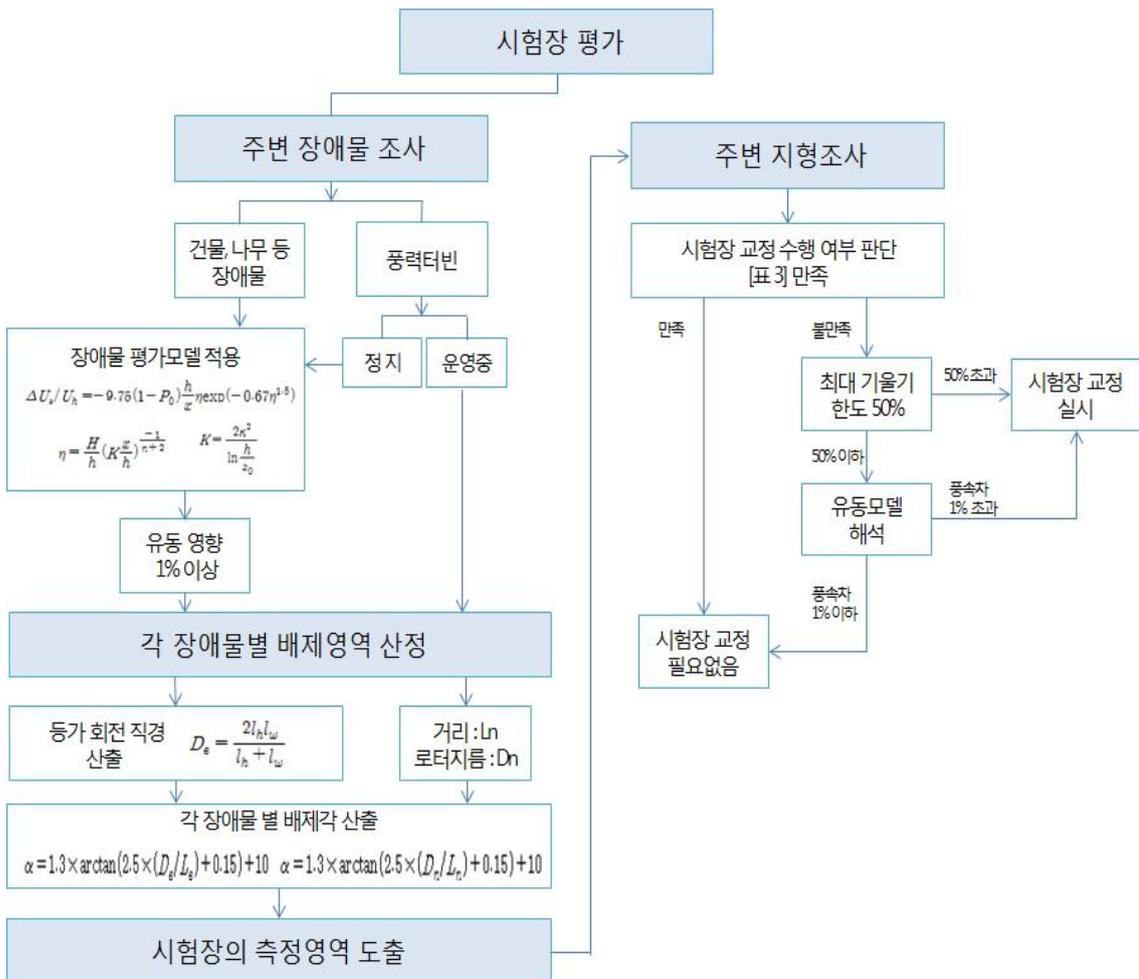


Fig. 10. The procedure for test site assessment

1) 시험장 장애물 평가

기상측정탑 및 시험대상 풍력터빈 주변에 있는 주요건물, 풍력터빈 등을 주요 장애물로 선정하여 장애물의 높이, 폭, 위치 등의 정보를 수집하였다. 장애물의 위치 좌표 및 폭에 대한 데이터는 Google earth 및 한국국토지리정보원에서 제공하는 수치지도(1:5000)을 이용하여 정보를 수집하였다. 장애물의 높이에 대한 데이터는 실제 현장에서 거리측정기로 측정하여 데이터를 수집하였다. Fig. 11은 시험대상 풍력터빈 인근에 위치한 건물 및 풍력터빈 장애물의 위치를 나타낸다.



Fig. 11. The neighboring main obstacles around the wind turbine tested

① 인근 풍력터빈이 기상측정탑 및 시험대상 풍력터빈에 미치는 영향

Table 4는 주변의 풍력터빈이 시험대상 풍력터빈에 미치는 유동왜곡 영향을 분석한 결과를 나타낸다. 분석결과 주변에서 운전 중인 풍력터빈은 모두 시험대상 풍력터빈에 유동왜곡 영향을 미치며, 이에 대한 후류영역을 도출하였다.

Table 4. The wake effect of neighboring wind turbines on the wind turbine tested

No.	Object	L _n (m)	h (m)	L _n /D _n	Wake effect(%)	Wake sector(°)		Remark
						Start	End	
neighboring WTG → testing WTG								
1	WTG1	483.5	80	5.56	74.40	219.27	269.51	
2	WTG2	269.2	80	3.09	99.94	182.49	249.38	
3	WTG3	436.4	80	5.02	79.60	151.21	204.06	
4	WTG4	607.9	80	6.99	62.70	129.97	174.96	
5	WTG5	998.3	80	11.48	39.98	156.53	192.78	
6	WTG6	940.4	80	10.81	42.41	172.47	209.60	
7	WTG7	1214.5	80	13.96	32.68	191.69	225.37	
8	WTG8	1216.8	80	13.99	32.61	178.42	212.08	
9	WTG9	1249.1	80	14.36	31.71	165.76	199.10	
10	WTG10	1262.3	80	14.51	31.36	153.63	186.85	
11	WTG11	1053.0	80	12.10	37.89	131.39	166.90	
12	WTG12	795.5	80	9.14	49.71	115.13	154.97	
13	WTG13	541.8	80	6.23	68.55	101.39	148.92	
14	WTG14	268.2	80	3.08	100.06	99.52	166.55	

Table 5는 주변의 풍력터빈이 기상측정탑에 미치는 유동왜곡 영향을 분석한 결과를 나타낸다. 분석결과 주변에서 운전 중인 풍력터빈은 모두 기상측정탑에 유동왜곡 영향을 미치며, 이에 대한 후류영역을 도출하였다.

Table 5. The wake effect of neighboring wind turbines on the met mast

No.	Object	L_n (m)	h (m)	L_n/D_n	Wake effect(%)	Wake sector(°)		Remark
						Start	End	
neighboring WT → Met mast								
0	Testing WTG	227.22	80	2.61	103.74	146.38	218.67	
1	WTG1	623.71	80	7.17	61.40	203.42	247.88	
2	WTG2	475.66	80	5.47	75.23	175.36	226.01	
3	WTG3	663.05	80	7.62	58.37	157.70	200.92	
4	WTG4	812.53	80	9.34	48.75	140.78	180.25	
5	WTG5	1223.82	80	14.07	32.41	159.32	192.91	
6	WTG6	1165.59	80	13.40	34.12	172.29	206.47	
7	WTG7	1422.16	80	16.35	27.55	188.56	220.47	
8	WTG8	1439.34	80	16.54	27.19	177.36	209.15	
9	WTG9	1476.34	80	16.97	26.43	166.68	198.21	
10	WTG10	1485.08	80	17.07	26.26	156.37	187.84	
11	WTG11	1249.02	80	14.36	31.72	138.22	171.57	
12	WTG12	963.74	80	11.08	41.40	126.67	163.44	
13	WTG13	691.38	80	7.95	56.32	120.03	162.42	
14	WTG14	450.22	80	5.17	78.03	129.58	181.62	

② 인근 건물이 기상측정탑 및 시험대상 풍력터빈에 미치는 영향

Table 6은 주변의 건물 장애물이 시험대상 풍력터빈 및 기상측정탑에 미치는 유동 왜곡영향을 분석한 결과를 나타낸다. 주변건물이 미치는 후류영향을 평가하였을 때, 주변건물과 시험대상 풍력터빈간의 거리(L_e)와 등가로터직경(D_e) 거리가 $20D$ 이상으로 벗어나므로 후류영향이 없는 것으로 간주하였다. 또한 기상측정탑에 대해서는 유동영향을 평가하였을 때 1%를 넘지 않으므로 주변건물들은 기상측정탑 및 시험대상 풍력터빈에 미치는 후류영향이 없는 것으로 판단하였다.

Table 6. The wake effect of neighboring building obstacles on the wind turbine tested and met mast

No.	Object	L_e (m)	h (m)	L_e/D_e	Wake effect(%)	Wake sector(°)		Remark
						Start	End	
neighboring Building → testing WT								
1	B1	638.2	10	34.57	-	-	-	
2	B2	540.1	10	29.70	-	-	-	
3	B3	501.4	10	35.10	-	-	-	
4	B4	426.5	10	28.43	-	-	-	
5	B5	417.8	10	23.50	-	-	-	
6	B6	505.6	10	30.33	-	-	-	
neighboring Building → Met mast								
8	B1	419.0	10	22.69	0.87	-	-	
9	B2	313.0	10	17.22	0.47	-	-	
10	B3	281.3	10	19.69	0.36	-	-	
11	B4	199.3	10	13.29	0.11	-	-	
12	B5	193.4	10	10.88	0.10	-	-	
13	B6	424.4	10	25.46	0.89	-	-	

2) 지형평가

시험장 주변 유효장애물 평가결과 도출된 측정영역은 정북방향을 0°로 기준하였을 때, 296.4°에서 99.5° 였다. Fig. 12는 시험장 지형평가를 수행하는 범위를 나타낸다. IEC 61400-12-2 Ed.1.0의 시험장 평가기준에 따라 도출된 측정영역을 기준으로 2L(L=기상측정탑과 시험대상 풍력터빈간의 거리, 227.2m) 이내, 2L~4L이내, 4L~8L이내, 총 3가지 범위에서 시험장 지형의 최대기울기와 최대지형편차를 평가하였다.

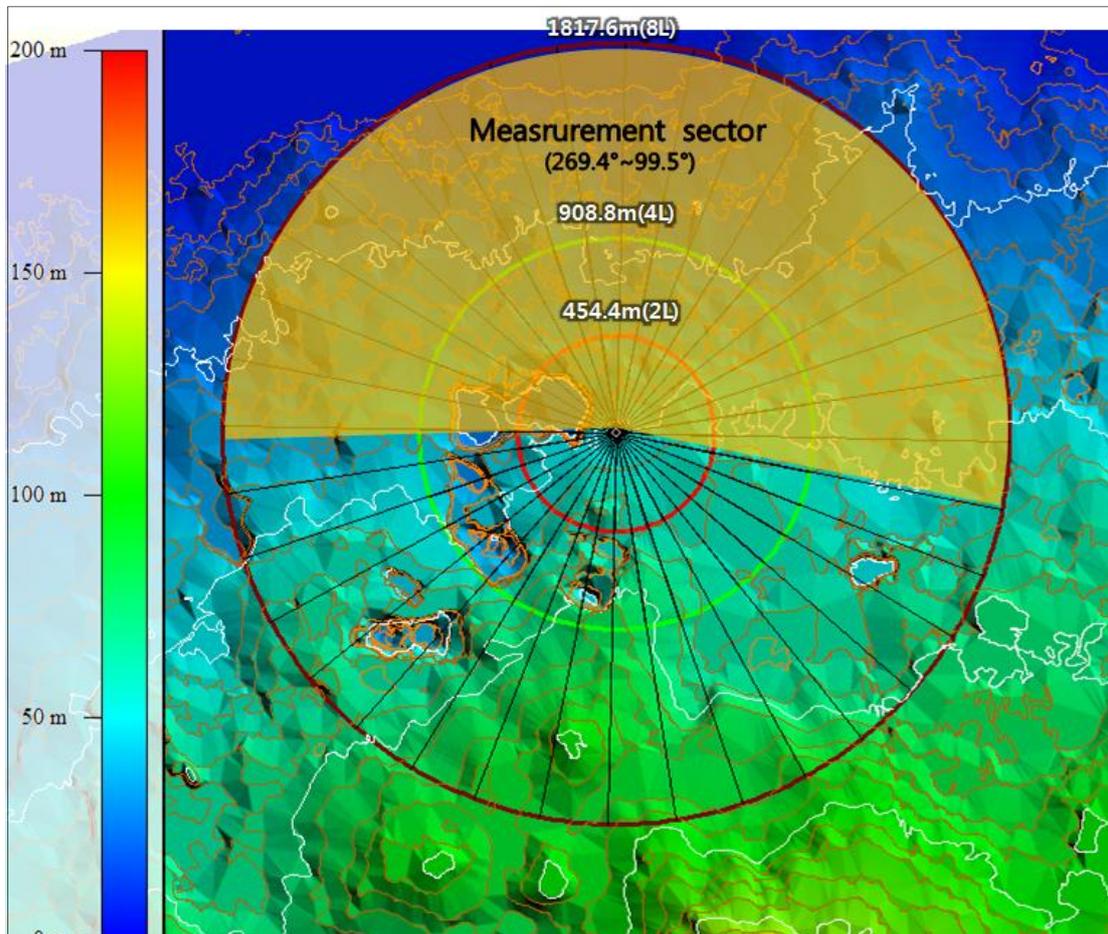


Fig. 12. The region for terrain assessment of the test site
(L=The distance between Met mast and testing wind turbine, 227.2m)

Table 7은 시험장 지형평가 결과를 나타낸다. 평가결과 2L이내에서 최대기울기와 최대지형편차조건을 만족하지 못하였다. 또한 2L~4L이내에서 최대지형편차가 허용 기준을 초과하였다. 따라서 본 연구가 수행된 시험 환경에서는 IEC 61400-12-1 Annex B에 따른 단순지형조건을 만족시키지 못하기 때문에 별도의 사이트 보정이 필요한 시험 환경임을 알 수 있다. 하지만 본 시험장은 인증용 시험장이 아닌 상용 풍력발전단지로 운전 중이기 때문에 현실적인 한계로 사이트 보정은 수행하지 못하였다.

Table 7. The result of site terrain assessment for the maximum terrain slope and variation

Distance	Sector	Maximum slope (%)		Maximum terrain variation from plane(m)	
		measurement	allow limit	measurement	allow limit
<2L	360°	8.1	3	19.54	5.6
≥2L and < 4L	Measurement sector	4.97	5	12.71	11.2
≥2L and < 4L	Outside measurement sector	9.76	10	-	-
≥4L and < 8L	Measurement sector	2.91	10	5	18.2

Fig. 13은 시험장 지형평가 결과 복잡지형 결과를 야기하는 2L이내 270° 방향의 지형상태를 나타낸다. 시험장 주변에 산재한 채석장으로 인하여 경사가 급한 지형 기울기와 지형편차를 갖는다.

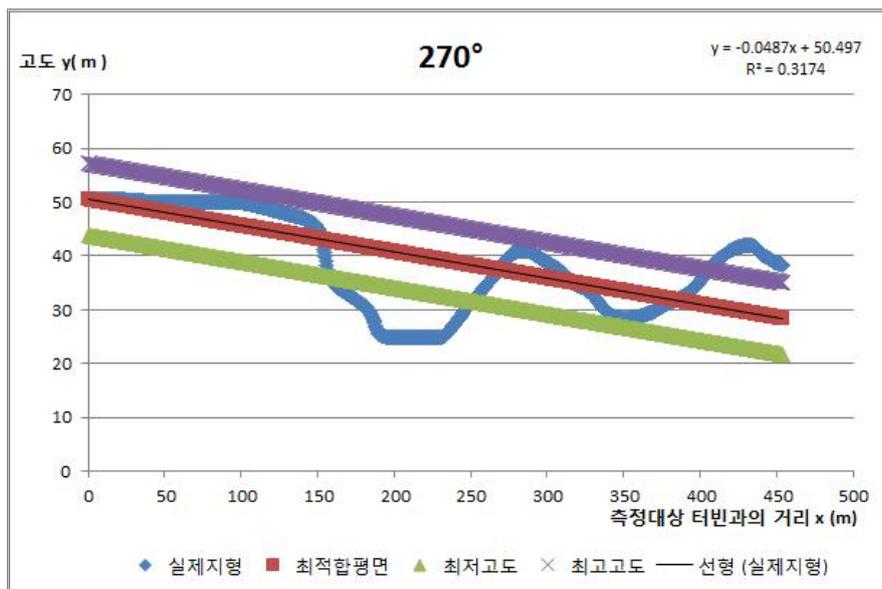


Fig. 13. Terrain variation within 2L at 270° direction

3. 나셀변환함수 도출

1) NTF 이론 및 도출

나셀 위에 설치되어 있는 풍속계는 풍력터빈 로터 뒤편에 위치하기 때문에 로터 회전 시에 발생하는 후류영향을 받게 된다. 이로 인하여 나셀 풍속계에서 측정된 데이터를 바로 시험에 사용할 수 없고, 별도의 보정절차를 따라 나셀 풍속계의 풍속을 보정 한 후 시험에 활용하여야 한다. 나셀 풍속계의 보정방법은 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따라 나셀 위에 설치된 풍속계와 기상측정탑의 풍속계간의 상관관계를 이용하여 각 풍속구간에 대한 나셀보정함수(NTF)를 도출하였다. 나셀보정함수(NTF) 도출 방법에는 Fitted function 방식과 Table 방식이 있다.

첫 번째, Fitted function 방법은 Fig. 14와 같이 나셀풍속계와 기상탑 풍속계간의 선형회귀법(Linear regression)을 이용하여 상관관계식을 도출하여 나셀풍속계 측정값을 보정하는 방법이다.

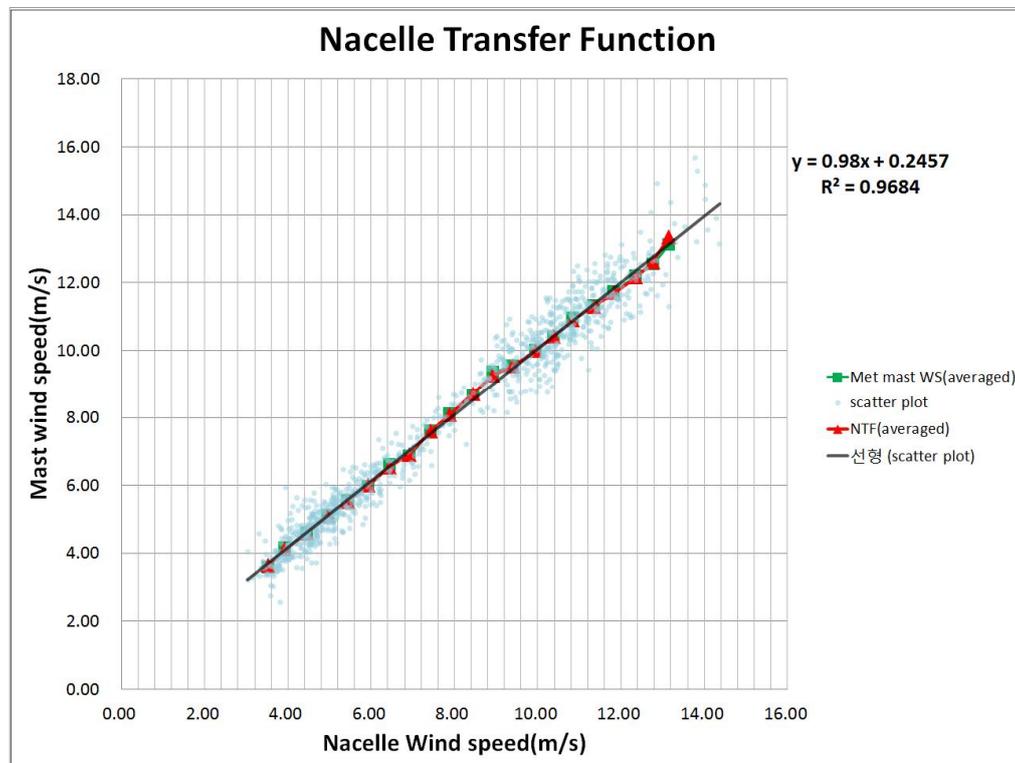


Fig. 14. The correlation of the nacelle wind speed and met mast wind speed [5]

두 번째, Table 방법은 아래 식에 따라 측정된 풍속을 0.5 m/s 풍속구간으로 분류하여 식 6과 같이 각 풍속구간별로 선형보간함으로써 자유유동풍속을 도출하는 방법이다. 본 연구에서는 Table법을 선택하여 아래 식에 따라 NTF함수가 적용된 자유유동풍속을 도출하였다. Table법을 이용하여 구한 자유유동풍속은 Fig. 14와 같다.

(식 6). Table방식에 따른 NTF함수로 보정된 자유유동풍속 도출식

$$V_{free} = \frac{V_{free,i} - V_{free,i+1}}{V_{nacelle,i+1} - V_{nacelle,i}} \times (V_{nacelle} - V_{nacelle,i}) + V_{free,i}$$

- $V_{nacelle,i}$ and $V_{nacelle,i+1}$: 풍속구간 $i, i+1$ 에서 나셀 풍속의 구간평균값
- $V_{free,i}$ and $V_{free,i+1}$: 풍속구간 $i, i+1$ 에서 기상탑 풍속의 구간평균값
- $V_{nacelle}$: 자유유동풍속을 추정하기 위하여 나셀 풍속에서 측정된 풍속
- V_{free} : 나셀 및 기상탑에서 측정된 풍속을 이용하여 구한 자유유동풍속

2) NTF validation check

도출된 NTF함수의 유효성 확인을 위하여 도출된 자유유동풍속(V_{free})와 풍력터빈 출력에서 유도한 풍속(V_p)의 비를 구하였다. Fig. 15와 같이 그 비는 후류영역을 배제한 측정영역($275^\circ \sim 94^\circ$)에서 허용범위인 ± 0.03 이내에 들어오는 것을 확인하였다.



Fig 15. Sector self-consistency check for NTF validation

또한 도출된 NTF함수의 풍향별 안정도 검증에서 Fig. 16과 같이 측정영역 내 전반적으로 안정적인 자유유동풍속과 나셀풍속간의 상관관계 특성을 보여준다.

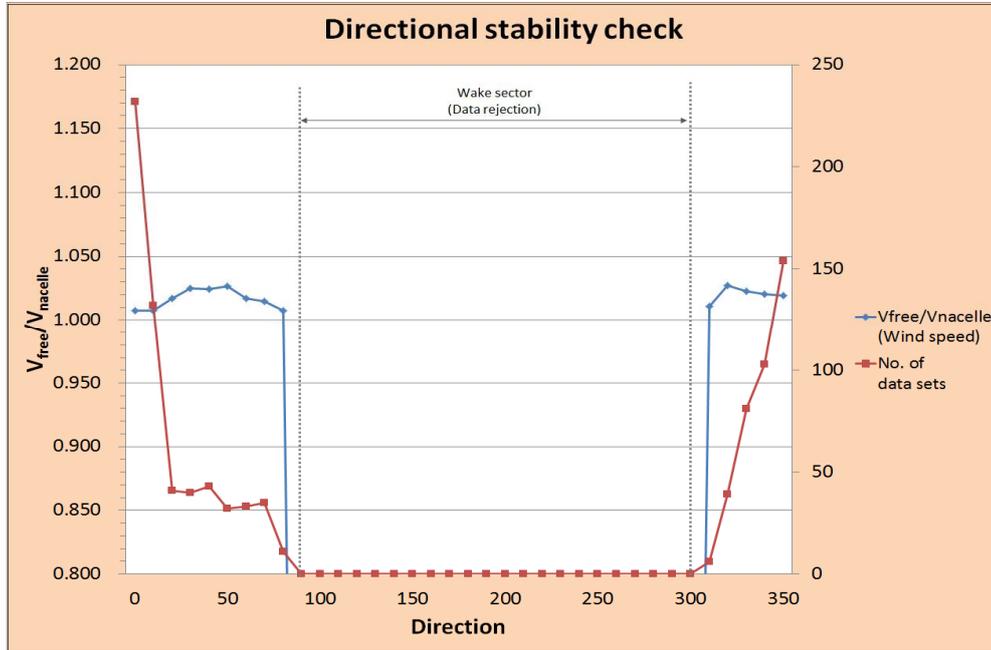


Fig. 16. Directional stability check for NTF validation

이 외로 IEC 61400-12-2 Ed.1.0 Annex D에 따라 도출된 NTF 함수의 검증을 위하여 Table 8과 Fig. 17과 같이 NTF 함수로 보정된 자유유동풍속을 기준으로 구간별 출력값과 기상측정탑 풍속을 기준으로 구간별 출력값을 서로 비교하였을 때, 출력값의 편차가 전반적으로 허용범위인 정격출력의 0.5%, 10kW 또는 측정된 출력의 1% 기준을 넘어서는 결과를 확인하였다.

이는 NTF 함수를 이용하여 나셀풍속값을 보정하였지만 기상측정탑 풍속값이 제대로 반영되지 않고 있음을 보여준다. 결국 NTF 함수를 도출하기 이전에 별도의 사이트 보정 절차를 통해 시험장 지형으로 인해 발생하는 나셀풍속계와 기상측정탑 간에 유동왜곡을 보정하는 절차가 선행되어야 함을 보여주었다. 또한 사이트 보정이 측정 결과 값에서 미치는 영향에 대한 연구에 따르면 최대 측정 결과 값에 약 8%의 영향을 미치기 때문에 측정 결과 값에 상당히 큰 영향을 미치는 변수로 작용하였다. [14]

Table 8. Power curve comparison for NTF validation

Bin No.	Hub height wind speed m/s	$V_{free,i}$ (MM) m/s	V_{free} (NTF) m/s	Power output (Met Mast) kW	Power output (NTF) kW	deviation kW	allow limit kW
3	3.5	3.54	3.65	38.98	30.92	8.06	10
4	4	4.00	4.12	78.34	69.23	9.11	10
5	4.5	4.53	4.60	118.25	121.44	3.19	10
6	5	5.00	5.10	169.30	181.26	11.96	10
7	5.5	5.49	5.52	228.31	245.61	17.30	10
8	6	5.98	5.99	300.30	321.79	21.49	10
9	6.5	6.47	6.54	379.11	405.93	26.82	10
10	7	6.98	6.91	516.28	511.38	4.90	10
11	7.5	7.47	7.60	623.79	691.70	67.91	10
12	8	8.03	8.09	859.98	820.82	39.16	10
13	8.5	8.50	8.71	1062.89	1022.31	40.57	10
14	9	9.01	9.27	1277.03	1214.39	62.64	10
15	9.5	9.50	9.53	1417.29	1338.60	78.69	10
16	10	10.01	9.99	1543.81	1533.00	10.81	10
17	10.5	10.50	10.41	1665.48	1679.19	13.71	10
18	11	10.97	10.91	1812.67	1791.29	21.38	10
19	11.5	11.46	11.30	1867.53	1903.19	35.66	10
20	12	12.01	11.70	1930.03	1942.35	12.32	10
21	12.5	12.47	12.16	1945.43	1981.78	36.35	10
22	13	12.91	12.62	1981.75	2004.00	22.25	10
23	13.5	13.37	13.35	1985.50	2001.50	16.00	10

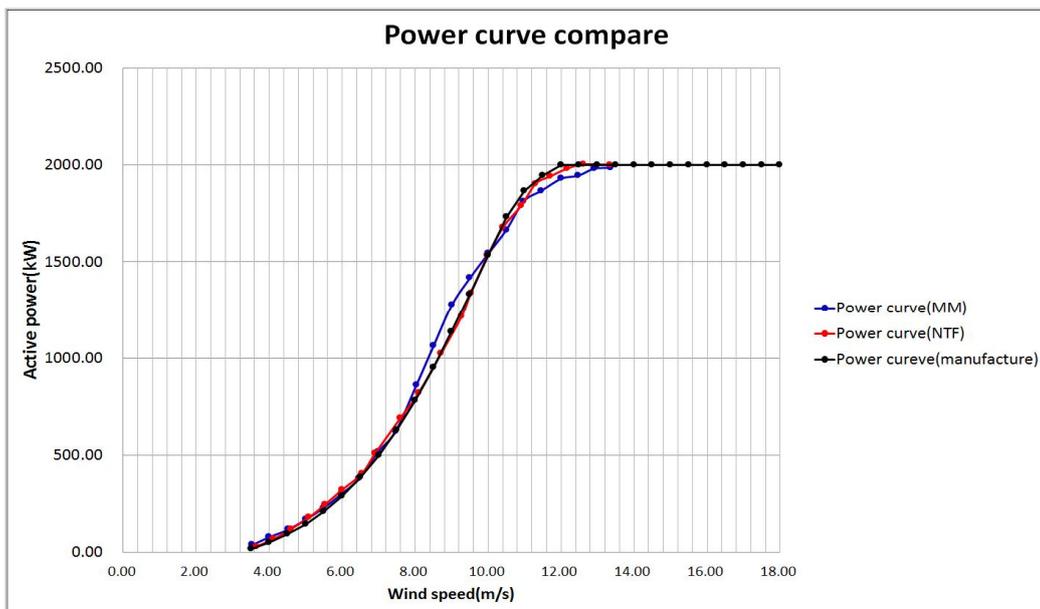


Fig. 17. Power curve comparison for NTF validation

4. 출력곡선 도출

출력곡선을 도출하기 전, 수집된 전체 데이터의 산점도 및 필터링 적용 후의 산점도를 Fig. 18 및 Fig.19과 같이 확인하였다.

1) 수집데이터 산점도

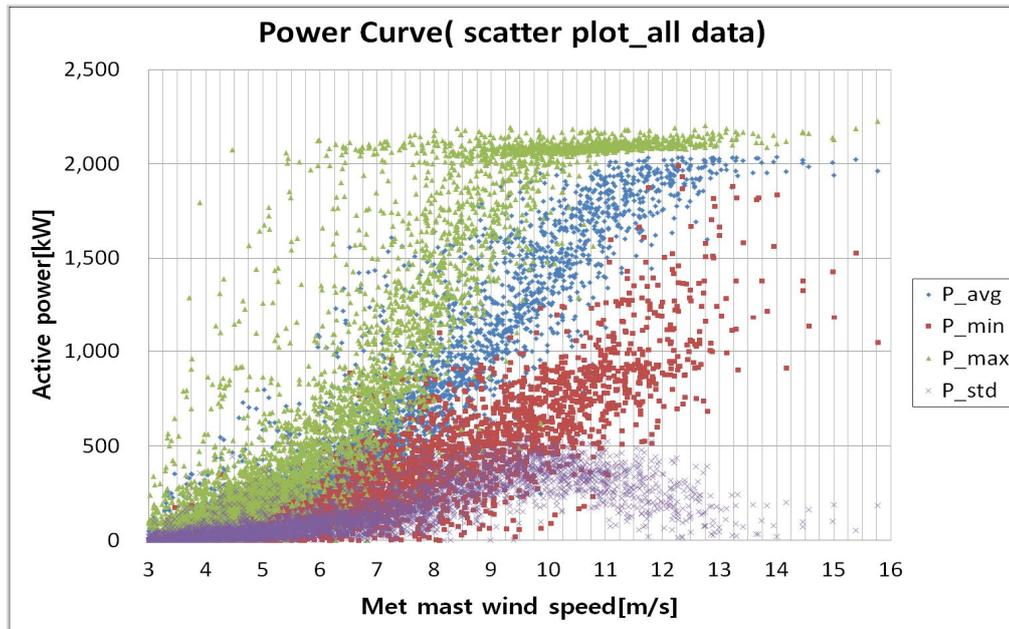


Fig. 18. Active power vs met mast wind speed using all data

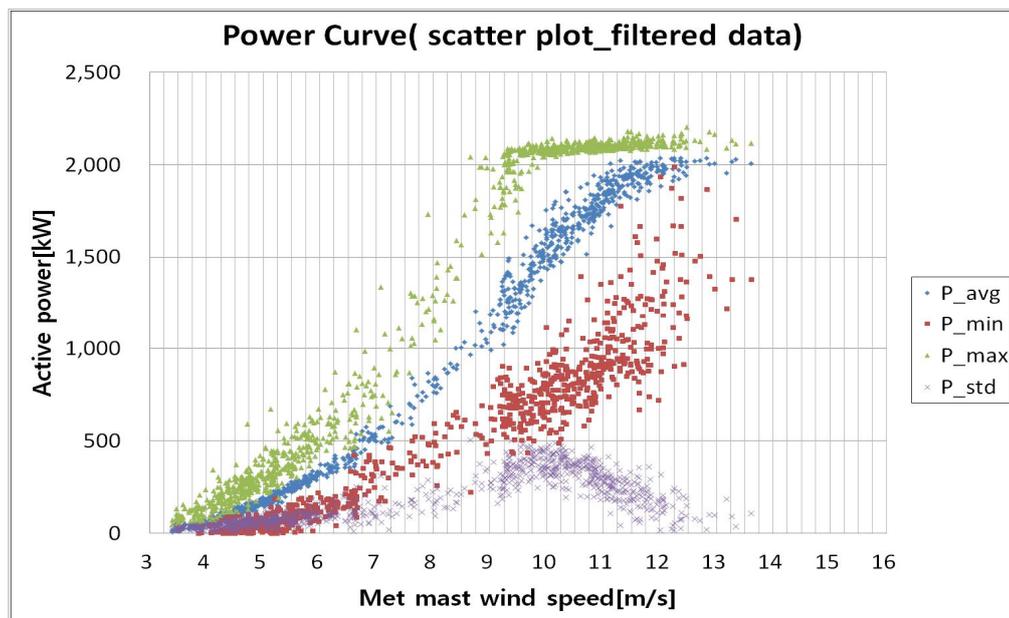


Fig. 19. Active power vs met mast wind speed using filtered data

2) 출력곡선 산점도 비교

각 풍속구간(Numbering은 나셀풍속 기준)에 따라 도출된 자유유동풍속(V_{free}) 대비 출력곡선, 나셀풍속 대비 출력곡선, 기상측정탑 대비 출력곡선을 Fig. 20과 Fig. 21과 같이 산점도 및 평균화된 값으로 서로 비교하였다.

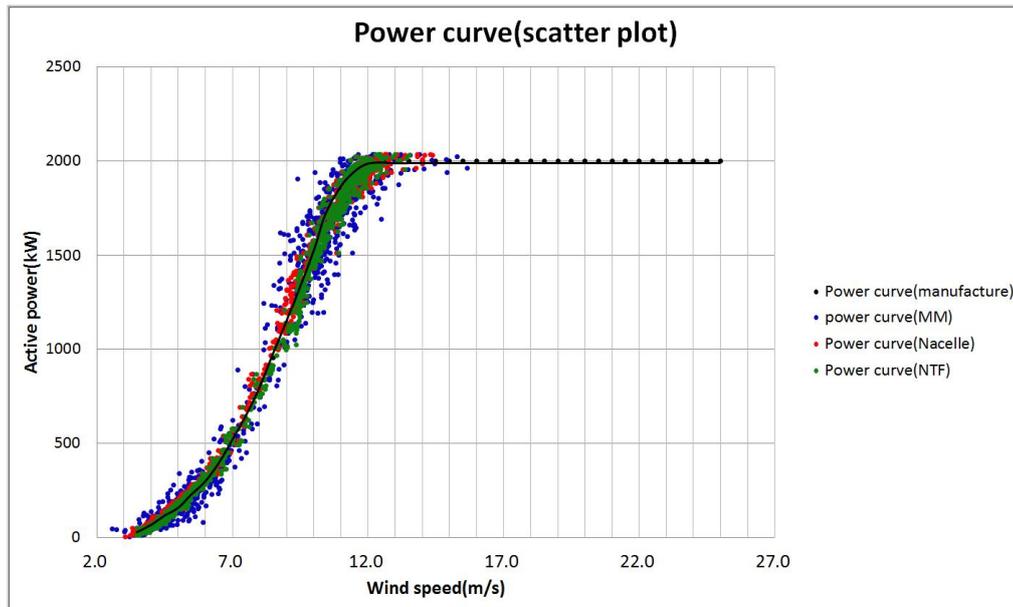


Fig. 20. Comparison of scatter plots of various power curves

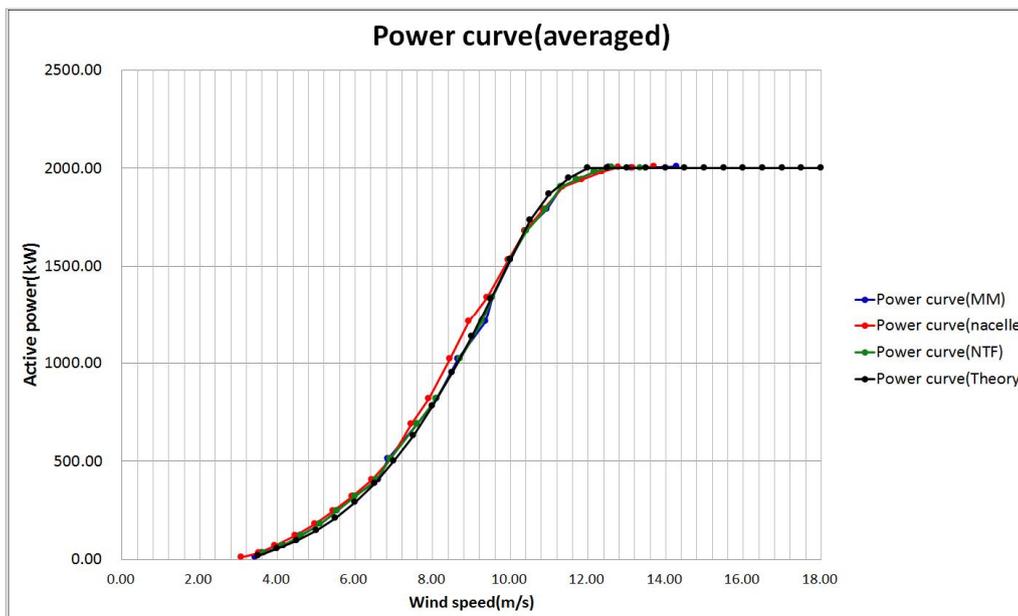


Fig. 21. Comparison of various averaged power curves

3) 출력곡선 도출

각 풍속구간(i =나셀풍속 기준)에 따라 도출된 자유유동풍속(V_{free}), 나셀풍속($V_{nacelle,i}$), 기상측정탑($V_{free,i}$) 풍속대비 측정된 출력테이블을 Table 9과 같이 구하였다.

Table 9. Table of measured power curve (Database A)

Wind Turbine + cor. Nacelle speed, For IEC MT 12-2 (Measured Power Curve)											
Reference air density:1.225kg/m ³									Category A	Category B	Combined uncertainty
Bin No. (nacelle Ref.)	Hub height wind speed m/s	$V_{free,i}$ m/s	$V_{nacelle,i}$ m/s	V_{free} (NTP) m/s	TI	Power output KW	C_p	No.of data sets ($V_{Nacelle}$)	Standard uncertainty S_i kW	Combined standard uncertainty u_i kW	Standard uncertainty $u_{e,i}$ kW
0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
1	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
2	3.0	3.43	3.07	0.00	0.08	10.57	0.00	4	2.9	11.55	11.91
3	3.5	3.59	3.53	3.65	0.13	30.92	0.18	37	1.9	11.66	11.82
4	4.0	4.15	3.94	4.12	0.12	69.23	0.27	70	2.5	23.13	23.26
5	4.5	4.60	4.46	4.60	0.12	121.44	0.34	114	1.9	29.16	29.23
6	5.0	5.11	4.97	5.10	0.12	181.26	0.38	91	2.5	33.19	33.28
7	5.5	5.53	5.44	5.52	0.12	245.61	0.40	64	3.3	42.93	43.06
8	6.0	5.96	5.93	5.99	0.12	321.79	0.41	56	4.8	49.12	49.36
9	6.5	6.60	6.44	6.54	0.09	405.93	0.40	27	8.9	53.51	54.25
10	7.0	6.85	6.91	6.91	0.10	511.38	0.43	27	8.8	93.63	94.04
11	7.5	7.61	7.44	7.60	0.10	691.70	0.43	19	22.1	139.89	141.63
12	8.0	8.10	7.90	8.09	0.09	820.82	0.43	14	14.0	102.06	103.01
13	8.5	8.65	8.45	8.71	0.12	1022.31	0.43	16	21.6	136.49	138.18
14	9.0	9.36	8.93	9.27	0.11	1214.39	0.42	36	15.4	132.07	132.97
15	9.5	9.53	9.40	9.53	0.13	1338.60	0.43	50	11.8	179.63	180.02
16	10.0	10.00	9.95	9.99	0.13	1533.00	0.42	70	8.8	161.41	161.65
17	10.5	10.38	10.38	10.41	0.13	1679.19	0.41	74	9.0	135.17	135.47
18	11.0	10.95	10.85	10.91	0.13	1791.29	0.38	78	8.7	90.39	90.81
19	11.5	11.32	11.35	11.30	0.13	1903.19	0.36	53	7.6	118.80	119.04
20	12.0	11.72	11.84	11.70	0.13	1942.35	0.33	43	7.7	43.73	44.41
21	12.5	12.18	12.37	12.16	0.12	1981.78	0.30	27	7.7	41.24	41.95
22	13.0	12.53	12.77	12.62	0.13	2004.00	0.27	10	8.3	28.53	29.71
23	13.5	13.12	13.16	13.35	0.11	2001.50	0.23	4	16.9	17.19	24.10
24	14.0	14.28	13.71	0.00	0.13	2007.33	0.00	6	11.3	15.57	19.27
25	14.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
26	15.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
27	15.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
28	16.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
29	16.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
30	17.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
31	17.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
32	18.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
33	18.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
34	19.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
35	19.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
36	20.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
37	20.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
38	21.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
39	21.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
40	22.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
41	22.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
42	23.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
43	23.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
44	24.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
45	24.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
46	25.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00

Table 10은 각 풍속구간(i =나셀풍속 기준)에 따라 도출된 자유유동풍속(V_{free}), 나셀 풍속($V_{nacelle,i}$), 기상측정탑($V_{free,i}$) 풍속대비 외삽한 출력테이블을 나타낸다.

Table 10. Table of extrapolated power curve (Database A)

Wind Turbine + cor. Nacelle speed, For IEC MT 12-2 (Extrapolated Power Curve)										
Reference air density: 1.225kg/m ³								Category A	Category B	Combined uncertainty
Bin No. (nacelle Ref.)	Hub height wind speed m/s	$V_{free,i}$ m/s	$V_{nacelle,i}$ m/s	V_{free} (NTF) m/s	Power output KW	C_p	No. of data sets ($V_{Nacelle}$)	Standard uncertainty S_i kW	Combined standard uncertainty u_i kW	Standard uncertainty $u_{c,i}$ kW
0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
1	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
2	3.0	3.43	3.11	0.00	10.57	0.00	4	2.9	11.55	11.91
3	3.5	3.59	3.57	3.65	30.92	0.18	37	1.9	11.66	11.82
4	4.0	4.15	3.99	4.12	69.23	0.27	70	2.5	23.13	23.26
5	4.5	4.60	4.52	4.60	121.44	0.34	114	1.9	29.16	29.23
6	5.0	5.11	5.03	5.10	181.26	0.38	91	2.5	33.19	33.28
7	5.5	5.53	5.50	5.52	245.61	0.40	64	3.3	42.93	43.06
8	6.0	5.96	6.00	5.99	321.79	0.41	56	4.8	49.12	49.36
9	6.5	6.60	6.51	6.54	405.93	0.40	27	8.9	53.51	54.25
10	7.0	6.85	7.00	6.91	511.38	0.43	27	8.8	93.63	94.04
11	7.5	7.61	7.52	7.60	691.70	0.43	19	22.1	139.89	141.63
12	8.0	8.10	8.01	8.09	820.82	0.43	14	14.0	102.06	103.01
13	8.5	8.65	8.54	8.71	1022.31	0.43	16	21.6	136.49	138.18
14	9.0	9.36	9.03	9.27	1214.39	0.42	36	15.4	132.07	132.97
15	9.5	9.53	9.48	9.53	1338.60	0.43	50	11.8	179.63	180.02
16	10.0	10.00	10.02	9.99	1533.00	0.42	70	8.8	161.41	161.65
17	10.5	10.38	10.48	10.41	1679.19	0.41	74	9.0	135.17	135.47
18	11.0	10.95	10.98	10.91	1791.29	0.38	78	8.7	90.39	90.81
19	11.5	11.32	11.50	11.30	1903.19	0.36	53	7.6	118.80	119.04
20	12.0	11.72	11.97	11.70	1942.35	0.33	43	7.7	43.73	44.41
21	12.5	12.18	12.51	12.16	1981.78	0.30	27	7.7	41.24	41.95
22	13.0	12.53	12.93	12.62	2004.00	0.27	10	8.3	28.53	29.71
23	13.5	13.12	13.37	13.35	2001.50	0.23	4	16.9	17.19	24.10
24	14.0	14.28	13.93	14.00	2001.50	0.20	6	11.3	15.55	19.25
25	14.5	14.50	14.50	14.50	2001.50	0.18	2	0.0	15.55	15.55
26	15.0	15.00	15.00	15.00	2001.50	0.16	0	0.0	15.55	15.55
27	15.5	15.50	15.50	15.50	2001.50	0.15	0	0.0	15.55	15.55
28	16.0	16.00	16.00	16.00	2001.50	0.13	0	0.0	15.55	15.55
29	16.5	16.50	16.50	16.50	2001.50	0.12	0	0.0	15.55	15.55
30	17.0	17.00	17.00	17.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
31	17.5	17.50	17.50	17.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
32	18.0	18.00	18.00	18.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
33	18.5	18.50	18.50	18.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
34	19.0	19.00	19.00	19.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
35	19.5	19.50	19.50	19.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
36	20.0	20.00	20.00	20.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
37	20.5	20.50	20.50	20.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
38	21.0	21.00	21.00	21.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
39	21.5	21.50	21.50	21.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
40	22.0	22.00	22.00	22.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
41	22.5	22.50	22.50	22.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
42	23.0	23.00	23.00	23.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
43	23.5	23.50	23.50	23.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
44	24.0	24.00	24.00	24.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
45	24.5	24.50	24.50	24.50	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00
46	25.0	25.00	25.00	25.00	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00

Fig. 22와 Fig. 23은 위 표에 따라 측정된 출력곡선과 외삽된 출력곡선을 보여준다.

현재 테이블에서는 14m/s이상의 고풍속이 없기 때문에 14m/s 부터의 출력값은 가장 높은 출력값이 측정된 구간에서 종단풍속까지 유지된다고 가정하여 외삽하였다. 측정 불확도는 출력변동이 심한 7m/s~11m/s 구간에서에서 가장 큰 불확도를 보여준다.

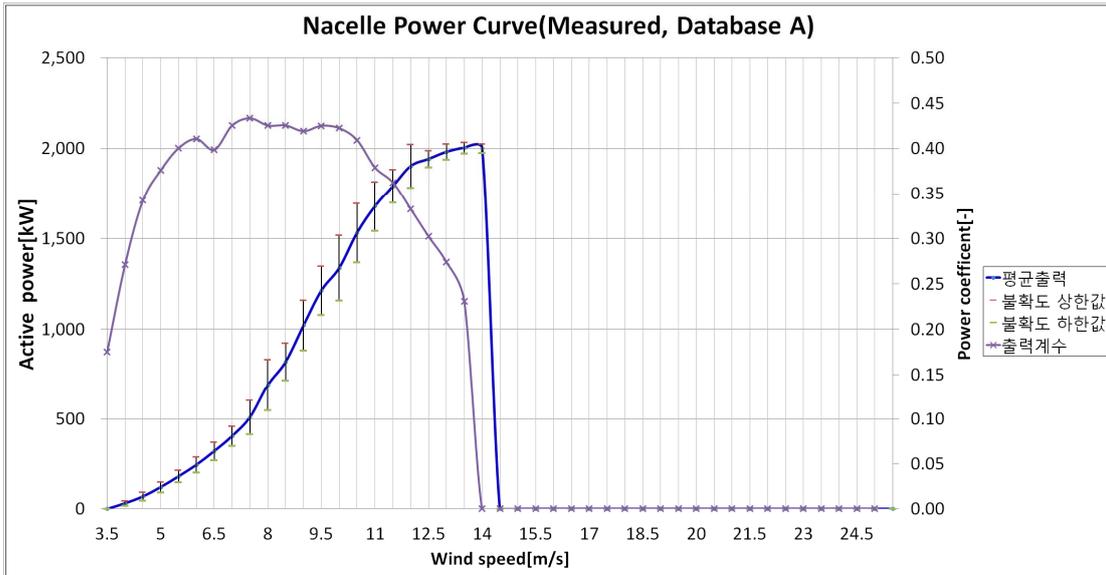


Fig. 22. Measured power curve(Database A)

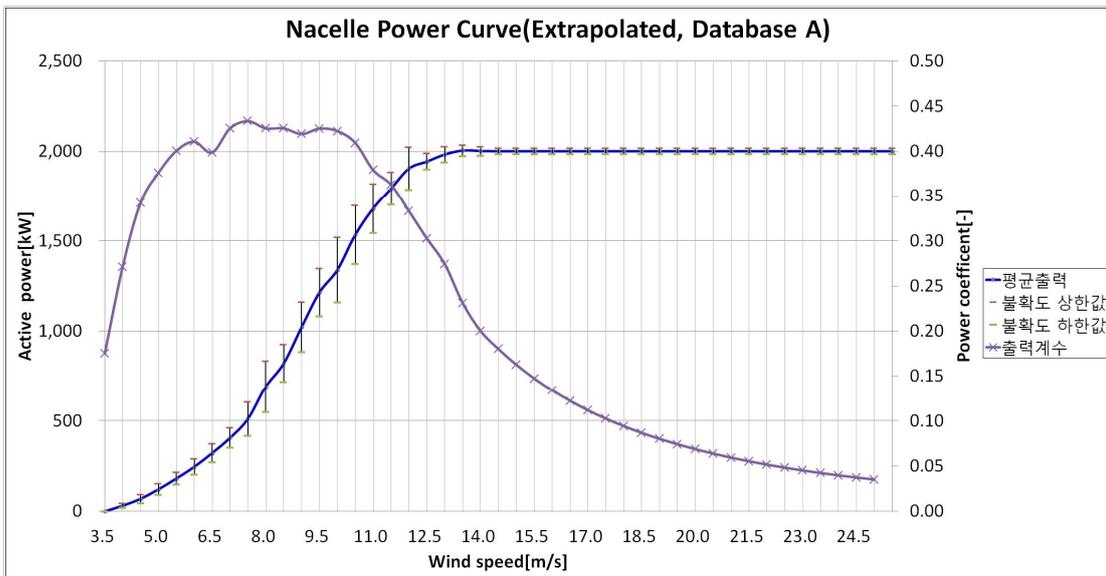


Fig. 23. Extrapolated power curve(Database A)

4) 출력곡선 비교

Fig. 24와 Fig. 25는 서로 다른 분류기준(i =나셀풍속기준, 기상탑풍속기준)을 적용하여 구간법(Method of bins)으로 정리한 출력곡선을 비교한 결과를 나타낸다.

저풍속 구간에서는 기상측정탑 풍속 기준 출력곡선이 자유유동풍속 기준 출력곡선보다 높게 나왔지만 고풍속에서는 오히려 자유유동풍속 기준 출력곡선이 기상측정탑 풍속 기준 출력곡선이 높은 결과를 보였다.

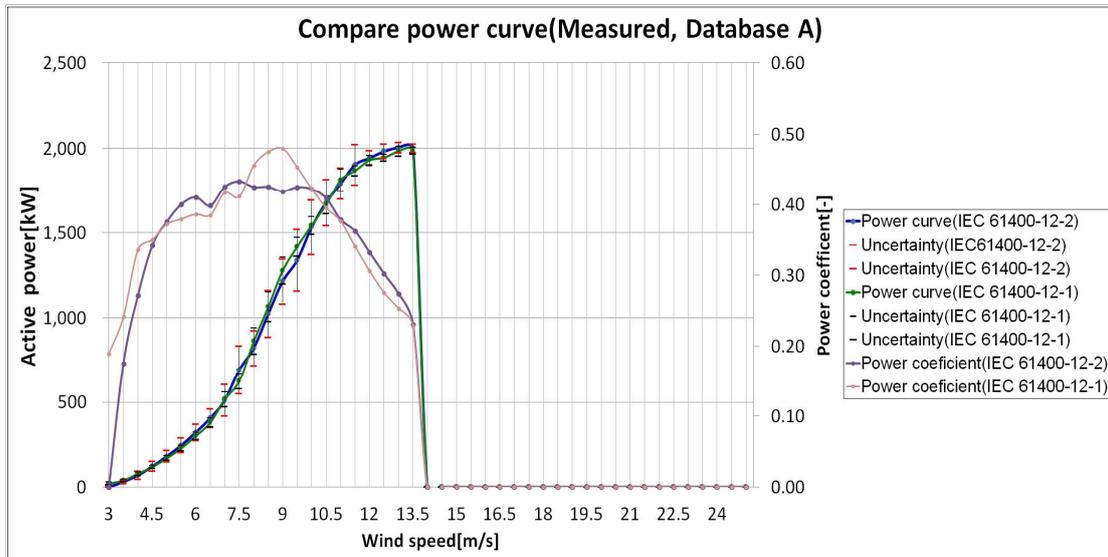


Fig. 24. Comparison of measured power curves (Database A)

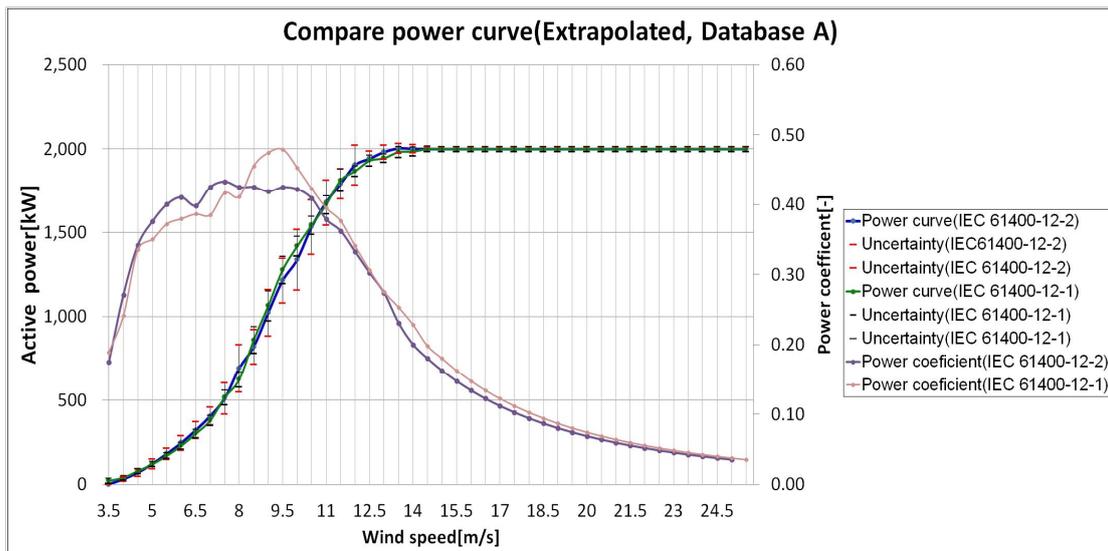


Fig. 25. Comparison of extrapolated power curves (Database A)

5) 기타 산점도 분석

Fig. 26은 시험수행기간 중, 각 풍속구간(i =나셀풍속기준) 대비 난류강도의 산점도와 평균난류강도를 보여준다. 분석 결과 시험장 난류강도는 IEC 61400-1 Ed.3.0 [15] 의 Class A 기준을 초과할 정도로 높은 난류강도가 발생하는 지역임을 알 수 있다.

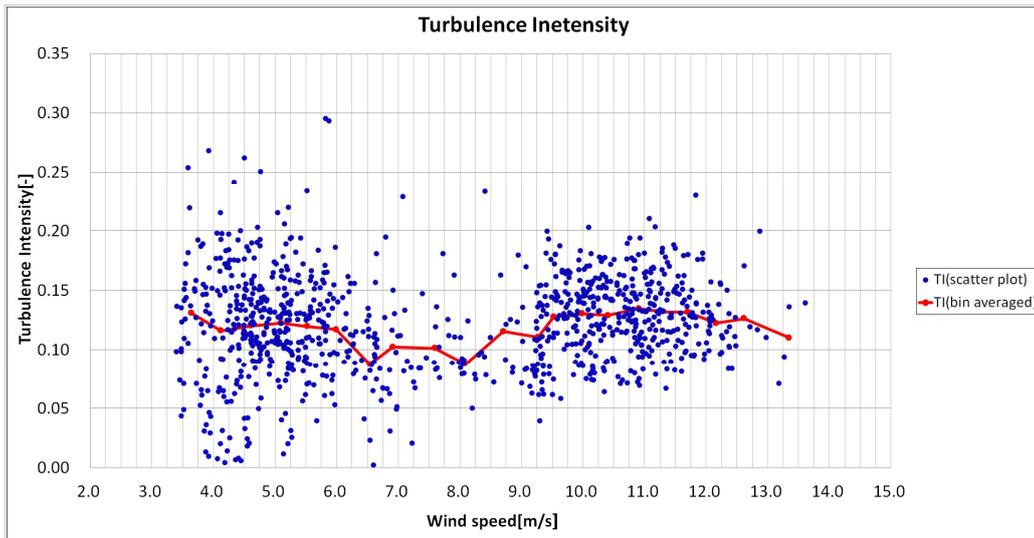


Fig. 26. Turbulence intensity vs wind speed

Fig. 27은 풍향대비 난류강도를 분석한 그래프이다. 분석결과 정북방향 부근에서 불어오는 풍속에서 난류성분이 많은 것을 알 수 있다.

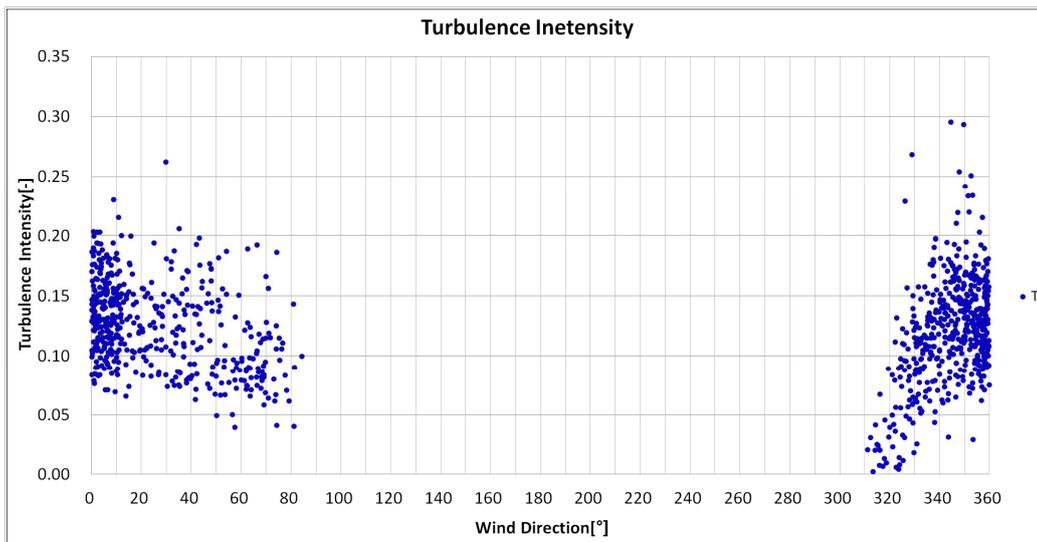


Fig. 27. Turbulence intensity vs wind direction

Fig. 28은 시험 중 풍향대비 풍속에 대하여 분석한 그래프이다. 분석결과 정북방향 부근에서 고풍속이 많은 것을 알 수 있다.

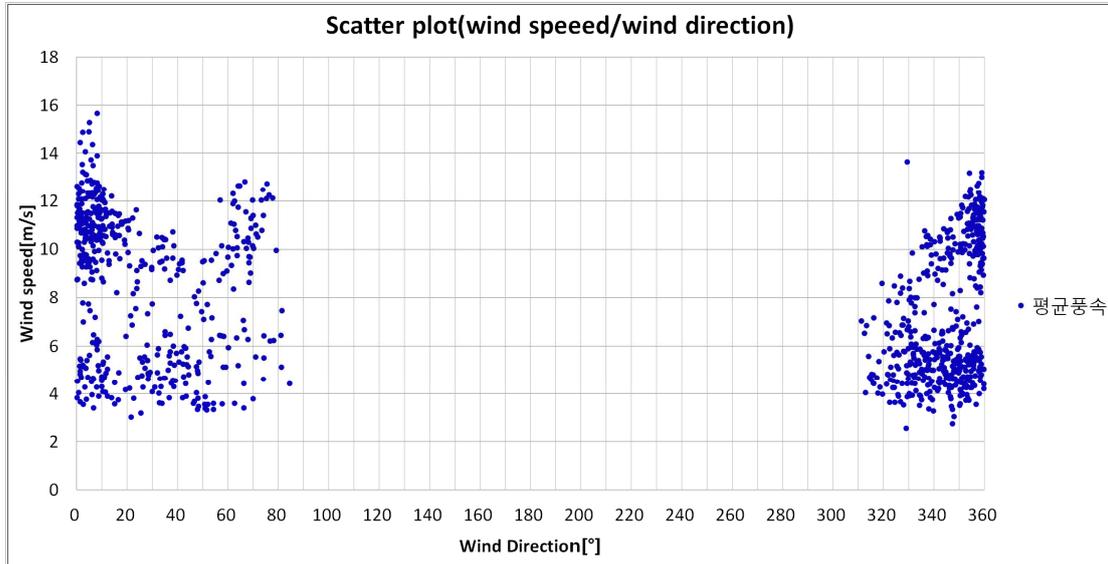


Fig. 28. Wind speed vs wind direction

Fig. 29는 풍속대비 로터속도 변화를 분석한 그래프이다. 분석결과 로터속도의 변화는 출력곡선의 변화와 유사한 거동을 보이고 있으며, 약 10 RPM에서 발전을 시작하여 정격속도 16.5~17 RPM 부근에서 정격운전을 하고 있다.

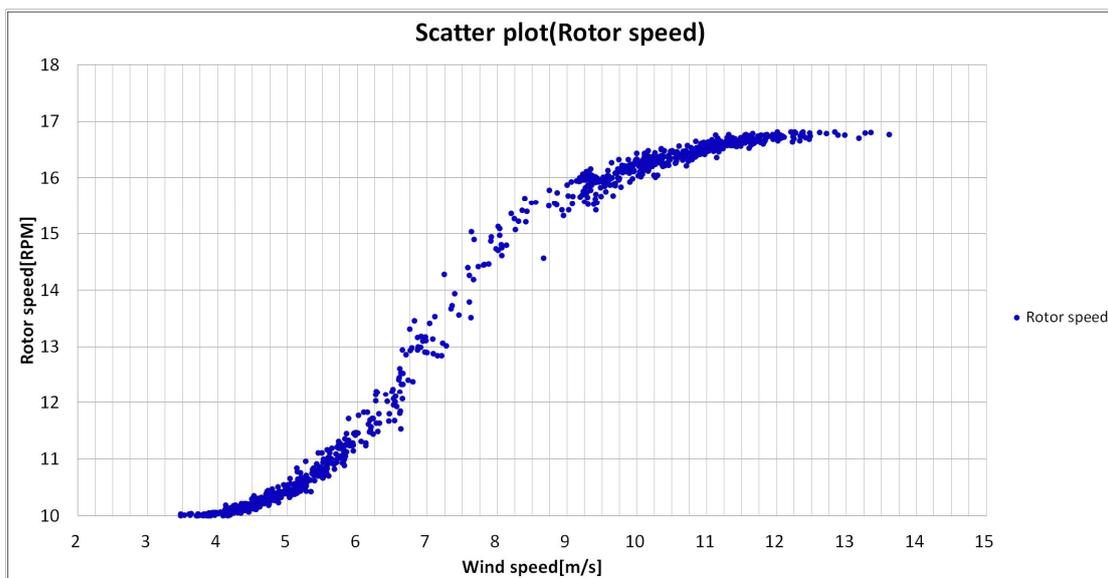


Fig. 29. Rotor speed vs wind speed

5. 연간에너지생산량 산정

최종적으로 IEC 61400-12-2 Ed.2.0에서 도출된 NTF함수의 검증을 위하여 NTF 함수로 보정된 자유유동풍속에 대한 AEP값과 IEC 61400-12-1 Ed.1.0에 따른 기상 측정탑의 풍속을 이용하여 구한 AEP값을 비교하였을 때, 연평균풍속 4~11m/s 이내에서 기상측정탑 기준 AEP에 대하여 최대 1%의 편차를 보여야한다고 규정하고 있다.[5]

Table 11은 NTF함수에 대한 검증을 위하여 두 가지의 다른 시험규격을 통한 연간에너지 생산량을 비교한 표이다. 비교결과 측정된 AEP값에서 연평균풍속이 높아질수록 점점 기상측정탑 풍속 기준 AEP와 NTF함수 기준 AEP간에 AEP차이가 감소하는 결과를 보였다. 이는 Fig.21의 출력곡선 비교 자료를 보면 8m/s~11.5m/s 구간에서는 출력의 차이가 크지만, 12m/s 이상에서는 출력차이가 줄어드는 것에서 기인한다. 하지만 본 시험이 수행된 시험환경은 사이트 보정이 필요한 조건이지만, 단지 교정 절차를 수행하지 않았기 때문에 결국, AEP 결과값 비교에서 Table 11과 같은 차이를 보이는 것으로 생각된다.

Table 11. AEP comparison with methods provided by IEC 61400-12-2 and IEC 61400-12-1

Compare IEC 61400-12-2 with IEC 61400-12-1 (bin processing : ref. nacelle ws, Met mast wind speed)						
AEP-Extrapolated (kWh)						
Annual wind speed (m/s)	NTF (kWh)	Met mast (kWh)	difference (%)	NTF (kWh)	Met mast (kWh)	difference (%)
4	1 440 819.33	1 476 174.09	2.4%	1 443 601.36	1 478 882.32	2.4%
5	2 793 277.59	2 857 968.17	2.3%	2 858 151.86	2 921 720.63	2.2%
6	4 152 831.42	4 238 774.94	2.0%	4 511 751.63	4 593 335.98	1.8%
7	5 162 607.02	5 255 703.92	1.8%	6 168 751.46	6 252 798.41	1.3%
8	5 722 944.17	5 813 938.74	1.6%	7 681 518.62	7 758 912.63	1.0%
9	5 905 447.23	5 989 988.74	1.4%	8 976 897.94	9 044 374.60	0.7%
10	5 827 915.86	5 904 551.42	1.3%	10 020 465.65	10 077 858.02	0.6%
11	5 593 739.42	5 662 434.56	1.2%	10 800 796.78	10 849 176.87	0.4%

Fig. 30과 Fig. 31은 두 가지의 다른 출력성능시험 기준을 적용하였을 때 그 결과값의 차이를 보여준다. 상대적으로 외삽된 AEP에서는 큰 결과값에 차이를 보이지 않는 이유는 현재 수집된 데이터 구간이 3.5m/s에서 13.5m/s 구간으로 전체 운전범위(3.5m/s~25m/s)에 단지 48% 범위에 대해서만 데이터가 수집되었기 때문에 상대적으로 외삽된 출력구간에 AEP비중이 크기 때문일 것으로 분석되었다.

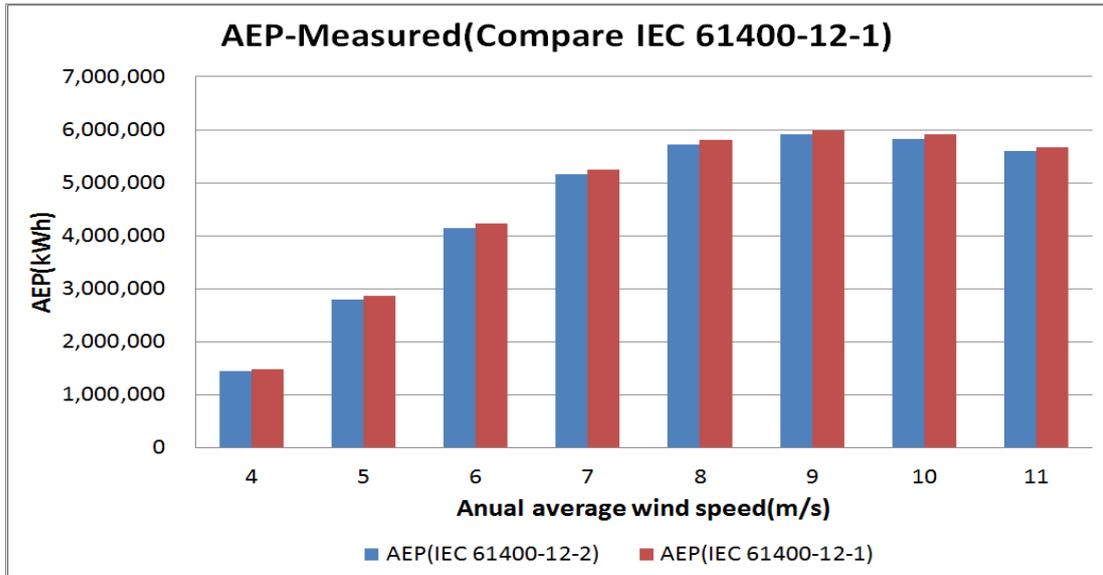


Fig. 30. Measured AEP comparison with methods provided by IEC 61400-12-1 and IEC 61400-12-2

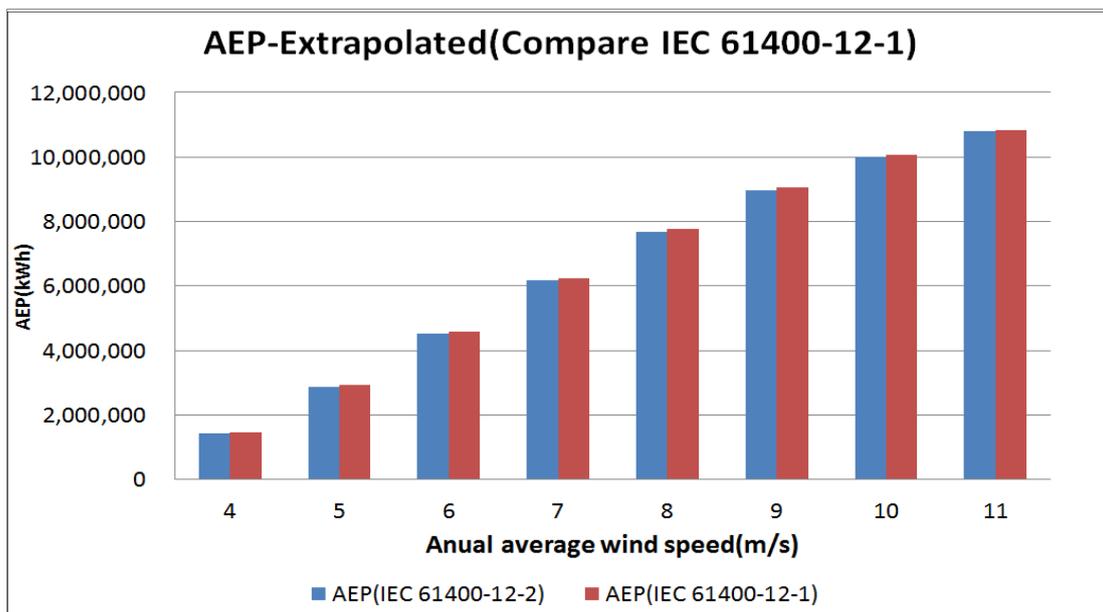


Fig. 31. Extrapolated AEP comparison with methods provided by IEC 61400-12-1 and IEC 61400-12-2

IV. 측정불확도 추정

1. 나셀변환함수를 이용한 연간에너지생산량 불확도 평가

1) 불확도 추정 절차

Fig. 32는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0 Annex E에 따른 측정불확도 추정 절차를 나타낸다. IEC 61400-12-1 Ed.1.0의 측정불확도 관련 기준과 비교하였을 때, 전반적으로 측정불확도 추정 절차와 불확도 인자는 유사하지만, 풍속에 대한 불확도 인자에서 풍향으로 인한 풍속교정에서의 불확도, NTF함수에 대한 불확도가 추가되었다. 따라서 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에서의 측정불확도는 IEC 61400-12-1 Ed.1.0에 따른 불확도 보다 상대적으로 큰 값을 갖는다.

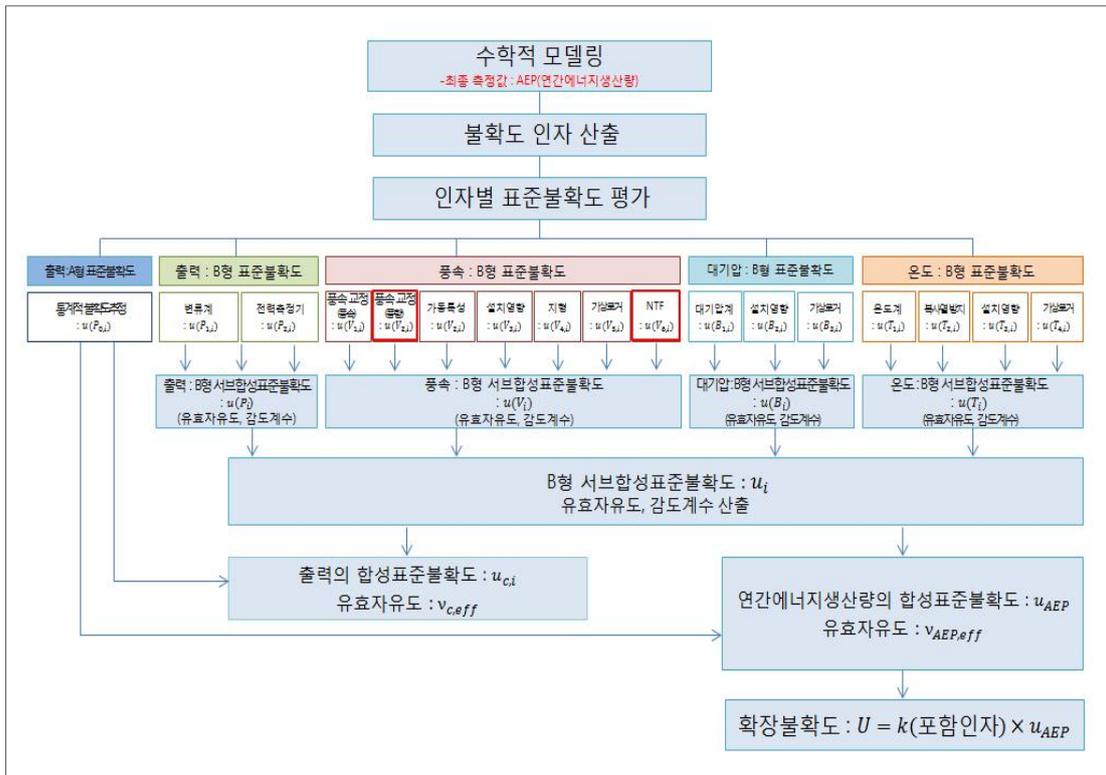


Fig. 32. Uncertainty estimate procedures for the power curve and AEP

2) 불확도 인자분석

IEC 61400-12-2 Ed.1.0 Annex E에 따른 불확도 인자는 Table 12와 같다.

Table 12. List of uncertainty categories A and B for Nacelle Power Curve

Measured parameter	No.	Uncertainty component	Uncertainty category	Sensitivity	
Electric power	1	Current transformers	B	$C_{P,i}=1$	
	2	Voltage transformers	B		
	3	Power transducer or power measurement device	B		
	4	Data acquisition system	B		
	5	Variability of electric power	A		
Wind speed	6	Nacelle anemometer calibration due to wind speed	B	$C_{V,i} = \left \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right $	
	7	Nacelle anemometer calibration due to wind direction	B		
	8	Operational characteristics	B		
	9	Mounting effects	B		
	10	Flow distortion due to terrain	B		
	11	NTF			$C_{V5,i}=1$
		Site calibration	(ref.) Anemometer calibration	B	
			(ref.) Operation characteristics	B	
			(ref.) Mounting effects	B	
			(ref.) Data acquisition system	B	
			(WT posi.) Anemometer calibration	B	
			(WT posi.) Operation characteristics	B	
			(WT posi.) Mounting effects	B	
			(WT posi.) Data acquisition system	B	
		Free stream wind speed	Anemometer calibration	A	
			Operation characteristics	B	
			Mounting effects	B	
			Site calibration	B	
			Data acquisition system	B	
			Nacelle anemometer calibration due to wind speed	B	
			Nacelle anemometer calibration due to wind direction	B	
			Operational characteristics	B	
			Mounting effects	B	
Data acquisition system	B				
Transfer function method	Type A uncertainty in transfer function regression or bin average as appropriate	A			
	Seasonal variation on site calibration results	B			
	Seasonal variation(changing climatic conditions) on NTF	B			
12	Data acquisition system	B			
Air temperature	13	Temperature sensor	B	$C_{T,i} = \frac{C_{V,i} \times V_i}{3 \times T_{Data,i}}$	
	14	Radiation shielding	B		
	15	Mounting effects	B		
	16	Data acquisition system	B		
Air pressure	17	Pressure sensor	B	$C_{B,i} = \frac{C_{V,i} \times V_i}{3 \times B_{Data,i}}$	
	18	Mounting effects	B		
	19	Data acquisition system	B		

3) 표준불확도 산출

Table 13은 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따라 추정된 표준불확도를 나타낸다.

Table 13. Estimate for uncertainty components from NTF measurement

Measured parameter	No.	Uncertainty component	Uncertainty component	Uncertainty estimate	
Electric power	1	Current transformers	$u(P_1)$	0.43 %	
	2	Voltage transformers	$u(P_2)$	0.29 %	
	3	Power measurement device	$u(P_3)$	11.55 kW	
	4	Variability of electric power	$u(P_4)$	$\frac{\sigma_P}{\sqrt{N_i}}$	
Wind speed	5	Nacelle anemometer calibration due to wind speed	$u(V_1)$	0.05 m/s	
	6	Nacelle anemometer calibration due to wind direction	$u(V_2)$	1 %	
	7	Operational characteristics	$u(V_3)$	0.35 %	
	8	Mounting effects	$u(V_4)$	0.65 %	
	9	Flow distortion due to terrain	$u(V_5)$	1.5 %	
	10	NTF		$u(V_6)$	(식)
		Site calibration	(ref.) Anemometer calibration	$u(SC_1)$	미적용
			(ref.) Operation characteristics	$u(SC_2)$	
			(ref.) Mounting effects	$u(SC_3)$	
			(ref.) Data acquisition system	$u(SC_4)$	
			(WT posi.) Anemometer calibration	$u(SC_5)$	
			(WT posi.) Operation characteristics	$u(SC_6)$	
			(WT posi.) Mounting effects	$u(SC_7)$	
			(WT posi.) Data acquisition system	$u(SC_8)$	
			Statistical variation	$u(SC_9)$	
	Free stream wind speed	Anemometer calibration	$u(FS_1)$	0.05 m/s	
		Operation characteristics	$u(FS_2)$	0.35 %	
		Mounting effects	$u(FS_3)$	0.65 %	
		Site calibration	$u(FS_4)$	미적용	
		Data acquisition system	$u(FS_5)$	0.15 m/s	
Nacelle anemometer calibration due to wind speed		$u(FS_6)$	0.75 m/s		
Nacelle anemometer calibration due to wind direction(Sonic type)		$u(FS_7)$	미적용		
Operational characteristics		$u(FS_8)$	1.155 %		
Mounting effects		$u(FS_9)$	1 %		
Data acquisition system		$u(FS_{10})$	0.015 m/s		
Transfer function	Type A uncertainty in transfer function regression or bin average as appropriate	$u(TF)$	$\frac{s_{NIF_i}}{\sqrt{N_j}}$		
method	Seasonal variation on site calibration results	$u(M)$	미적용		
	Seasonal variation(changing climatic conditions) on NIF	$u(NTF)$	미적용		
	11	Data acquisition system	$u(V_7)$	0.015 m/s	
Air temperature	12	Temperature sensor	$u(T_1)$	0.25 °C	
	13	Radiation shielding	$u(T_1)$	2 °C	
	14	Mounting effects	$u(T_1)$	0.33 °C	
	15	Data acquisition system	$u(T_1)$	0.075 °C	
Air pressure	16	Pressure sensor	$u(B_1)$	1.5 hpa	
	17	Mounting effects	$u(B_1)$	0.12 hpa	
	18	Data acquisition system	$u(B_1)$	2 hpa	

4) 합성표준불확도

Table 14는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따른 출력의 합성표준불확도 산출식을 나타낸다. 풍력터빈의 출력에 대한 A형 표준불확도를 아래 식 8에 따라 산출하였다. B형 표준불확도는 풍력터빈의 출력에 대한 합성표준불확도(P), 풍속에 대한 합성표준불확도(V), 대기압에 대한 합성표준불확도(B), 대기온도에 따른 합성표준불확도(T)를 아래 식 9에 따라 합성하여 B형에 대한 합성표준불확도를 산출하였다.

최종적으로는 앞에서 구한 A형 표준불확도와 B형 합성표준불확도를 측정불확도의 전과법칙[16]에 근거, 아래 식 10에 따라 합성하여 출력에 대한 합성표준불확도($u_{c,i}$)를 산출하였다.

Table 14. Combined standard uncertainty for wind turbine active power

	구 분	산출식	감도계수
합성 표준 불확도	A형 표준불확도 : s_i	$u(P_{0,i}) = s_i = \frac{\sigma_{P_i}}{\sqrt{N_i}}$ (식 7) $\sigma_{P_i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2}$ (식 8)	$c_{s_i} = 1$
	B형 합성표준불확도 : u_i	$u_i = \sqrt{c_{P_i}^2 u^2(P_i) + c_{V_i}^2 u^2(V_i) + c_{B_i}^2 u^2(B_i) + c_{T_i}^2 u^2(T_i)}$ (식 9)	$c_i = 1$
출력의 합성표준불확도 : $u_{c,i}$		$u_{c,i} = \sqrt{c_{s_i}^2 s_i^2 + c_i^2 u_i^2}$ (식 10)	

Table 15는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따른 출력의 합성표준불확도 값을 나타낸다. 각 풍속구간별 측정 출력에 대한 합성표준불확도는 A형표준불확도와 B형의 합성표준불확도의 합성으로 나타낼 수 있다.

Table 15. Combined standard uncertainty for wind turbine active power(Database A)

Measured power curve(Database A)								
Reference air density : 1.225 kg/m ³						Category A	Category B	Combined standard uncertainty $u_{c,i}$
Bin No. i	Wind speed (mid)	Measured wind speed avg V_i	Power output P_i	C_P	Number of Data sets (10min avg.)	Combined standard uncertainty s_i	Combined Standard uncertainty u_i	
[-]	[m/s]	[m/s]	[kW]	[-]	[-]	[kW]	[kW]	[kW]
2	3.0	0.00	0.00	0.00	2	0.0	0.00	0.00
3	3.5	3.65	30.92	0.18	37	1.9	11.80	11.96
4	4.0	4.12	69.23	0.27	70	2.5	23.13	23.26
5	4.5	4.60	121.44	0.34	114	1.9	29.16	29.23
6	5.0	5.10	181.26	0.38	91	2.5	33.19	33.28
7	5.5	5.52	245.61	0.40	64	3.3	42.93	43.06
8	6.0	5.99	321.79	0.41	56	4.8	49.12	49.36
9	6.5	6.54	405.93	0.40	27	8.9	53.51	54.25
10	7.0	6.91	511.38	0.43	27	8.8	93.63	94.04
11	7.5	7.60	691.70	0.43	19	22.1	139.89	141.63
12	8.0	8.09	820.82	0.43	14	14.0	102.06	103.01
13	8.5	8.71	1022.31	0.43	16	21.6	136.49	138.18
14	9.0	9.27	1214.39	0.42	36	15.4	132.07	132.97
15	9.5	9.53	1338.60	0.43	50	11.8	179.63	180.02
16	10.0	9.99	1533.00	0.42	70	8.8	161.41	161.65
17	10.5	10.41	1679.19	0.41	74	9.0	135.17	135.47
18	11.0	10.91	1791.29	0.38	78	8.7	90.39	90.81
19	11.5	11.30	1903.19	0.36	53	7.6	118.80	119.04
20	12.0	11.70	1942.35	0.33	43	7.7	43.73	44.41
21	12.5	12.16	1981.78	0.30	27	7.7	41.24	41.95
22	13.0	12.62	2004.00	0.27	10	8.3	28.53	29.71
23	13.5	13.35	2001.50	0.23	4	16.9	17.19	24.10

5) 불확도 평가

연간에너지생산량에 대한 합성표준불확도는 식 11에 따라 구할 수 있다.

구해진 합성표준불확도의 포함인자 $k=1$ 로, 약 신뢰수준 68 %에서의 측정불확도를 추정할 수 있다. 최종적으로는 식 12에 따라 약 신뢰수준 95 %에서의 확장불확도를 추정하였고, 이에 대한 결과값은 Table 16과 같이 도출하였다.

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i\right)^2} \quad (\text{식 11})$$

- u_{AEP} : AEP의 합성표준불확도
- N_h : 1년 중 시간의 수($\cong 8\,760$)
- f_i : i 번째 구간에서 V_{i-1} 과 V_i : $F(V_i) - F(V_{i-1})$ 사이에서의 풍속의 상대발생빈도,
 $f_i = ((F_{i+1} - F_i) + (F_i - F_{i-1})) / 2$
- s_i : i 번째 구간에서 A형 출력 표준불확도
- u_i : i 번째 구간에서 B형 합성표준불확도

$$U = k \times u_{AEP} \quad (\text{식 12})$$

- k : 포함인자 (신뢰수준 약 95 %, $k = 2$)
- u_{AEP} : 연간에너지생산량(AEP)의 합성표준불확도

Table 16. The estimates of uncertainty in AEP

Estimated annual energy production (Database A) Reference air density : 1.225 kg/m ³ Cut-out wind speed : 25 m/s (extrapolation by constant power from last bin)					
Hub height annual average wind speed (Rayleigh) [m/s]	AEP-measured (measured power curve) [kWh]	Uncertainty in AEP (신뢰수준 약95%, $k=2$) [kWh]	Uncertainty in AEP (신뢰수준 약95%, $k=2$) [%]	AEP-extrapolated (extrapolated power curve) [kWh]	
4	1 440 819.33	458 809.64	31.84%	1 443 601.36	
5	2 793 277.59	746 827.01	26.74%	2 858 151.86	
6	4 152 831.42	949 929.07	22.87%	4 511 751.63	incomplete
7	5 162 607.02	1 046 456.55	20.27%	6 168 751.46	incomplete
8	5 722 944.17	1 060 694.51	18.53%	7 681 518.62	incomplete
9	5 905 447.23	1 024 432.89	17.35%	8 976 897.94	incomplete
10	5 827 915.86	962 089.22	16.51%	10 020 465.65	incomplete
11	5 593 739.42	889 177.72	15.90%	10 800 796.78	incomplete

2. 불확도 비교 분석

Fig. 33은 IEC 61400-12-1 Ed.1.0과 IEC 61400-12-2 Ed.1.0 시험기준을 적용하였을 때, 시험기준에 따른 출력곡선 및 연간에너지생산량에서의 측정불확도 차이를 보여준다. 측정불확도의 값의 차이는 IEC 61400-12-1 Ed.1.0과 비교하였을 때, 연평균 풍속 4m/s~11m/s 전반적인 범위에서 약 2배가량 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

이는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0의 시험기준에서는 기존 IEC 61400-12-1 Ed.1.0에서 규정하는 측정불확도 인자 외에 NTF함수를 도출하는 과정에서의 불확도를 포함하고 있기 때문이다. 또한 IEC 61400-12-2 Ed.1.0에서는 풍속계의 불확도에 대한 가중치 인자를 별도로 적용하고 있기 때문에 풍속계의 불확도가 전체적인 불확도에 미치는 결과가 크게 작용하고 있다. 이러한 점으로 인하여 불확도의 차이를 비교하였을 때 큰 차이를 보이고 있다. [17]

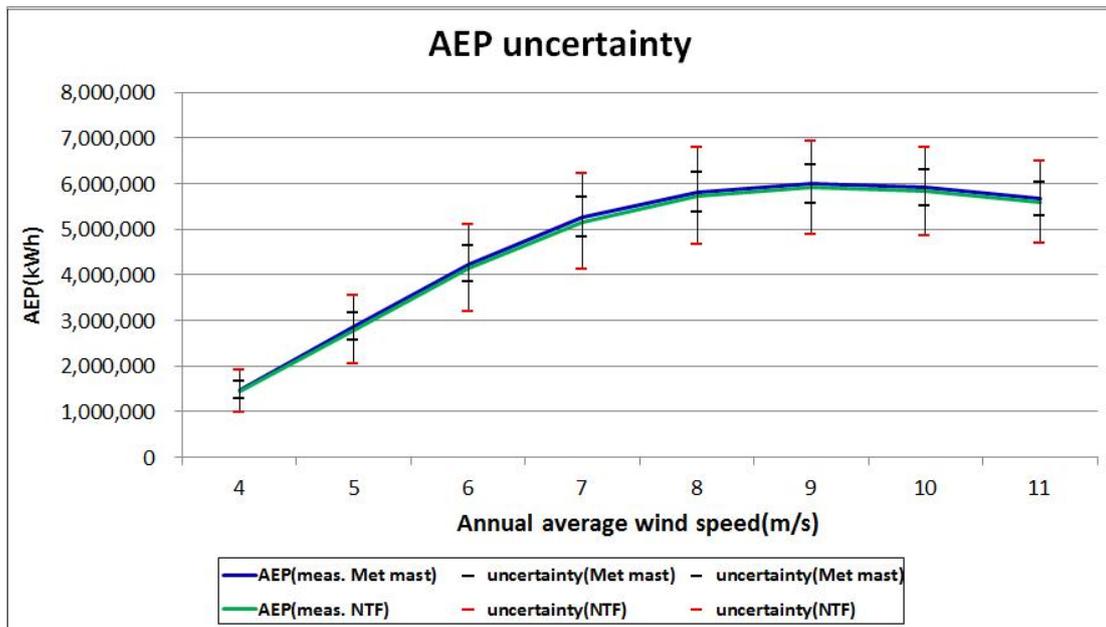


Fig. 33. The comparison of uncertainties in AEPs derived from IEC 61400-12-1 Ed.1.0 and IEC 61400-12-2 Ed.1.0

V. 결 론

IEC 61400-12-2 Ed.1.0의 시험절차에 따라 사이트 보정(Site assessment), 데이터 필터링, 데이터 처리, 나셀변환함수(NTF) 도출, 최종적으로 출력곡선 및 연간에너지 생산량 도출, 결과값에 대한 측정불확도 분석의 절차로 시험을 수행하였다.

시험장 평가 결과 본 연구가 수행된 시험장은 시험장의 지형최대기울기와 지형최대 변화를 분석하였을 때, IEC 61400-12-2 Ed.1.0에서 제시하는 단순지형조건을 초과하여 별도의 사이트 보정이 필요한 복잡지형으로 나타났다. 하지만 시험이 수행된 풍력발전단지에는 이미 풍력터빈이 설치되어 상업운전하고 있는 단지로, 현실적인 여건상 별도의 사이트 보정을 수행하기 불가능한 상황이었다. 따라서 사이트 보정이 필요한 시험환경임에도 불구하고 이를 생략하여 시험을 수행하고 사이트 보정을 하지 않았을 때 어떠한 출력성능 측정결과를 나타낼지 연구해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기상측정탑의 허브높이 풍속 측정값과 풍력터빈의 나셀에서의 풍속측정값의 상관 관계를 분석하여 나셀변환함수(NTF) 함수를 도출하였고 이에 대한 유효성 검증을 수행하였다. 유효성 검증결과 출력곡선에서는 기상측정탑 기준 출력곡선과 비교하였을 때, 대부분의 풍속구간에서 허용 차이값 기준 10kW 벗어났고 9.5m/s 풍속구간에서는 최대 78.69kW의 차이를 보여 허용 기준값을 크게 벗어난 결과를 나타내었다.

2. 기상측정탑 기준 연간에너지생산량과 비교하였을 때, AEP-measured값에서 최소 1.2%에서 2.4%의 차이를 보였고, AEP-extrapolated에서는 최소 0.4%에서 2.4%까지 최대 편차를 보였다. AEP-measured와 비교하였을 때 편차가 작은 이유는 AEP-extrapolated에서는 고풍속의 연평균 풍속을 갖는 시험환경에서 AEP를 추정할수록 연중 고풍속의 비중이 높아지고, 고풍속에서는 기상측정탑 풍속 기준 출력과 NTF 보정 풍속기준 출력값의 차이가 미미해지기 때문이다. 결과적으로는 연평균풍속 8m/s일 때의 연간에너지생산량을 추정하였을 때, 기상측정탑 풍속기준 연간에너지

생산량과 NTF 보정 풍속기준 연간에너지생산량과 비교하였을 때 1%의 차이를 보여, NTF 함수 유효성 검증기준 1%를 만족하는 결과를 나타내었다. 하지만 IEC 61400-12-2 Ed.1.0 시험기준에서는 연평균풍속 4m/s에서부터 11m/s까지 기상측정탑 풍속기준 연간에너지생산량과 비교하였을 때 결과값에서 1% 이내로 수렴해야 함을 기준하고 있기 때문에 실질적으로 도출된 NTF 함수를 이용하여 출력성능시험에 적용하는 데에는 한계가 있는 것으로 보인다.

3. 결론적으로 기상측정탑과 NTF 보정 풍속기준 연간에너지생산량간에 큰 차이를 보이는 이유는 측정된 출력곡선의 차이에서 기인하며, 이는 현실적인 여건으로 인하여 사이트 보정 절차를 생략한 과정에서 원인을 찾아볼 수 있다. 시험을 수행하기 전에, IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 근거한 사이트 보정절차를 수행한 후 NTF 함수를 도출한다면 복잡지형에서도 충분히 NTF 함수를 적용한 출력성능시험을 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

4. IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따른 측정불확도 추정결과와 IEC 61400-12-1 Ed.1.0에 대한 측정불확도 추정결과를 비교하였을 때, IEC 61400-12-2 Ed.1.0에 따른 측정불확도 추정 결과값이 약 2배 이상 크게 나타나는데 이는 풍속에 대한 불확도에서 NTF 함수로 인한 불확도, 풍속계 교정 시 풍향으로 인한 불확도 인자가 추가되었기 때문이다.

5. 아직까지 국내에서는 IEC 61400-12-2 Ed.1.0의 시험절차에 따라 수행된 연구사례가 많이 부족한 실정이다. 특히 복잡지형에서의 NTF 함수를 적용한 출력성능시험 사례는 본 연구가 처음 수행되는 사례이다. 본 연구 결과, 시험장 주변 지형의 복잡도가 출력성능 시험에 미치는 영향이 분석되었고, 이는 향후 복잡지형에 설치된 풍력터빈 및 기상측정탑에 대한 사이트 보정 연구가 추가적으로 필요함을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] REN 21, Renewable 2014 : Global Status Report
- [2] 한국풍력산업협회, 2015 : 2015년 10월 풍력설비용량 현황조사
- [3] IEC 61400-22, 2010-05 : Wind turbines-Part22, Conformity testing and certification
- [4] 김건훈, 한국태양에너지학회, 2005 : 국내외 풍력발전시스템 성능평가 및 인증시스템의 현황과 제언
- [5] IEC 61400-12-1 Ed.1.0, 2005-12 : Wind turbines-Part12-1, Power performance measurements of electricity producing wind turbines
- [6] IEC 61400-12-2 Ed.1.0, 2013-03 : Wind turbines-Part12-2, Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry
- [7] 한국신재생에너지학회 춘계학술대회, 2005. : 풍력발전기 출력성능 측정을 위한 해석 프로그램의 개발
- [8] 한국태양에너지학회, 2006 : 1.5MW 풍력발전시스템 출력성능시험 및 불확도 분석
- [9] 김현우, 2013. 8. : 나셀변환함수를 이용한 풍력터빈 출력성능 평가
- [10] 김유택, 유체기계저널, 2002 : CFD에 의한 500kW급 수평축 풍력발전용 터빈의 성능평가 및 유동해석에 관한 연구
- [11] <http://www.cttc.upc.edu/research/node/93>
- [12] MEASNET guide line, 2009-12 : Power performance measurement procedure version 5
- [13] ISO 2533, 1975-05 : Standard atmosphere
- [14] 김건훈, 한국태양에너지학회, 2011 : Site calibration이 풍력발전시스템 성능시험 불확도에 미치는 영향 연구
- [15] IEC 61400-1 Ed.3.0, 2005. 08 : Wind turbines-Part1, Design requirement
- [16] ISBN 92-67-10188-9, 1995, ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [17] 김현우, 한국태양에너지학회, 2013 : Wind Turbine Power Performance Testing using Nacelle Transfer Function

감사의 글

어느덧 논문을 마치고 감사의 글을 쓰고 있으니 제 대학원 생활이 주마등처럼 지나갑니다. 먼저 제 논문에 대하여 아낌없는 조언과 정성어린 지도를 해주신 고경남 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 항상 연구하시는 모습, 학생들을 향한 열정적인 모습을 잊지 못할 것 같습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문 심사를 맡아주신 허종철 교수님, 김범석 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다. 논문에 대하여 교수님들께서 말씀주신 조언과 충고가 많은 도움이 되었습니다.

그리고 같이 논문을 쓰면서 많은 의지가 되었던 고승훈 학우님, 고정만 학우님, 부용혁 학우님, 이창협 학우님께도 감사드립니다. 또한 논문을 쓸 수 있도록 관련 자료 확보에 도움을 주신 제주에너지공사 강병찬 팀장님에게도 감사의 말씀을 전합니다.

마지막으로 항상 저를 응원해주시면서, 저를 무한한 신뢰로 믿어주시는 저의 부모님께 감사드립니다. 끝으로 대학원 생활을 하면서 이번 논문을 작성하는데 도움을 주신 많은 분들에게 모두 감사드리며, 감사의 글을 마칩니다.