



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

나셀변환함수를 이용한
풍력터빈 출력성능평가 및
불확도 분석

제주대학교 대학원

풍력특성화협동과정

김 현 우

2013 년 6 월

나셀변환함수를 이용한
풍력터빈 출력성능평가 및
불확도 분석

指導教授 許 鐘 哲

金 賢 優

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013 年 6 月

金賢優의 工學 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

2013 年 6 月

Wind Turbine Power Performance Testing using Nacelle Transfer Function and Uncertainty Analysis

Hyeon-Wu Kim
(Supervised by professor Jong-Chul Huh)

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

2013 . 6 .

This thesis has been examined and approved.

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

.....
Thesis director, Jong-Hwan Lim, Prof. of Mechatronics engineering

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

.....
Date

Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	iv
Nomenclature	v
Abstract	vii
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구동향	3
3. 연구목적	5
II. 테스트 개요	6
1. 테스트 사이트	6
2. 테스트 풍력 터빈 사양	7
3. 측정 데이터	8
1) 측정 데이터 요소와 측정 장비	8
2) 측정 기준과 데이터 처리	9
III. 출력성능평가	12
1. 나셀 변환함수(NTF)	12
1) 나셀 변환함수를 위한 측정 방위구간	12
2) 지형에 따른 결과값 보정(site calibration)	13
3) 마스트 풍속과 나셀 풍속 상관관계	15
4) 나셀 변환함수 검증	18

2. 나셀 출력곡선(NPC)	23
1) 지형 등급(Terrain class)	24
2) 나셀 출력곡선 측정 방위구간	26
3) 나셀 출력곡선	29
4) AEP 예측량을 이용한 나셀 출력곡선 검증	34
IV. 불확도	40
1. 불확도 이론적 배경	40
1) 불확도(Uncertainty)	40
2) 불확도의 A형 평가(Type A uncertainty)	40
3) 불확도의 B형 평가(Type B uncertainty)	40
4) 합성표준불확도(Combined standard uncertainty)	42
5) 확장불확도(Expanded uncertainty)	42
2. 나셀 출력곡선 불확도 구성요소	43
1) 나셀 변환함수(NTF)	43
2) 나셀 출력곡선(NPC)	46
3. IEC 61400-12-1에 의한 불확도와 비교	52
V. 결 론	56
참고문헌	57

List of Figures

Fig. 1 Korea large offshore wind farm plan	1
Fig. 2 Kim-Nyoung wind turbine testing site in Jeju	1
Fig. 3 Error of wind turbine performance	2
Fig. 4 Nacelle wind anemometer	3
Fig. 5 Cost of performance verification	3
Fig. 6 Methodology of power curve verification via nacelle anemometer	4
Fig. 7 Test site	6
Fig. 8 View of WTG under test	7
Fig. 9 Comparison of power output between transducer end and SCADA	9
Fig. 10 Nacelle anemometer of No.6 WTG	10
Fig. 11 Measurement sector for NTF	13
Fig. 12 Area for terrain evaluation	13
Fig. 13 NTF as form of fitted function	15
Fig. 14 NTF as form of table	16
Fig. 15 Comparison of No.6 WTG power curves between mast wind speed and nacelle wind speed	19
Fig. 16 Local terrains of No.6 WTG and No.9 WTG	23
Fig. 17 Measurement sector for No.9 WTG	26
Fig. 18 Self-consistency check for No.9 WTG	27
Fig. 19 Calculation of σ from power output	28
Fig. 20 Power scatter plots of No.9 WTG	29
Fig. 21 NPC of No.9 WTG and power curve of the manufacturer	30
Fig. 22 Uncertainty in power	32
Fig. 23 Uncertainty range on power curve	32
Fig. 24 Uncertainty in annual energy production	35
Fig. 25 Estimated AEP and actual AEP	36
Fig. 26 Wind energy per met-mast measured direction	37
Fig. 27 Weibull distribution and actual wind distribution	39
Fig. 28 Rectangular distribution	41
Fig. 29 Triangular distribution	41
Fig. 30 Normal distribution probability density	42
Fig. 31 Comparison of uncertainty between met-mast power curve and nacelle	

power curve	52
Fig. 32 Uncertainty components in power	54
Fig. 33 Nacelle wind speed uncertainty components in power	55

List of Tables

Table 1 Causes of wind turbine downgrade	2
Table 2 Met-mast measured data	6
Table 3 Specification of WTG under test	7
Table 4 Measured data of met-mast	8
Table 5 Measured data of wind turbine	8
Table 6 Terrain evaluation	14
Table 7 Table of transfer function from to	17
Table 8 Power differences of bins	20
Table 9 AEP differences	22
Table 10 RIX terrain classification	24
Table 11 Slope terrain classification	25
Table 12 Excluded sectors from No.9 WTG	26
Table 13 Database for NPC	29
Table 14 Combined uncertainties (No.9 WTG)	31
Table 15 Power performance result of test	33
Table 16 Estimated annual energy production	34
Table 17 Rayleigh distribution AEP against actual AEP	36
Table 18 Weibull distribution AEP against actual AEP	39
Table 19 Expanded uncertainty	42
Table 20 Estimates for uncertainty components from NTF measurement	43
Table 21 Uncertainties from NTF (No.6 WTG)	45
Table 22 Estimates for uncertainty components from NPC measurement	46
Table 23 Sensitivity Factor (No.9 WTG)	50
Table 24 Category B uncertainties (No.9 WTG)	51
Table 25 Uncertainty difference (No.6 WTG)	53

Nomenclature

기 호	설 명	단 위
	풍력터빈 로터의 회전 면적	[m ²]
AEP	연간 에너지 생산량(Annual energy production)	
AGL	지상 고도(Above ground level)	[m]
B	기압	[Pa]
B_{0min}	측정된 10분 평균 기압	[Pa]
C	출력계수	
$C_{P,i}$	i번째 빈의 출력계수	
	감도계수(sensitivity factor on parameter)	
$c_{B,i}$	i번째 빈의 기압 감도계수	[W/Pa]
$c_{d,i}$	i번째 빈의 데이터 수집 감도계수	
$c_{T,i}$	i번째 빈의 온도 감도계수	[W/K]
$c_{V,i}$	i번째 빈의 풍속 감도계수	[W/ms ⁻¹]
D	로터 직경(Rotor diameter)	[m]
D_n	인근에서 운행 중인 풍력터빈의 로터 직경	[m]
Δz_i	인근 고도 지점간의 수직차	[m]
$F(V)$	풍속의 레일리 누적확률분포함수	
f_i	i번째 빈의 풍속 평균 레일리 확률 분포	
	i번째 빈의 풍속 레일리 누적 확률 분포	
g	지표면 중력 가속도 [9.80665 m/s ²]	
H	허브 높이(Hub height)	[m]
h	해발고도	[m]
L	풍력터빈으로부터 met-mast 까지의 거리	[m]
L_n	풍력터빈 또는 met-mast와 인근에서 운행 중인 풍력터빈 간의 거리	[m]
M	건조 공기의 몰 질량 [0.0289644 kg/mol]	
N	데이터의 총 수	
N_h	1년 중 시간 수 (=8760)	
N	추출간격내 데이터 수	
N_i	i번째 빈의 10분 평균 데이터 수	
NPC	나셀 출력곡선(Nacelle power curve)	
NTF	나셀 변환함수(Nacelle transfer function)	
P	높이 에서의 기압	[Pa]
P_W	수증기의 압력	[Pa]
P_0	해수면 표준 기압	[m]
P_i	i번째 빈의 표준화된 평균 출력	[W]
P_n	표준화(normalization)된 출력	[W]
P_{10min}	10분 평균 측정 출력	[W]

PC	출력 곡선(Power curve)	
	일반 가스 상수 [8.31447 J/(mol · K)]	
R	수증기의 가스 상수 [461.5 J/(kg · K)]	
RIX	거칠기 지수(Ruggedness index)	
	i번째 빈의 A형 불확도	[W]
$s_{P,i}$	i번째 빈의 출력 A형 불확도	[W]
T_{10min}	측정된 10분 평균 절대온도	[K]
T_0	해수면 표준 온도 [288.15 K]	
u_{AEP}	연간 예측 생산량의 합성표준불확도	[Wh]
$u_{B,i}$	i번째 빈의 공기밀도 B형 표준불확도	[Pa]
$u_{c,i}$	i번째 빈의 합성표준불확도	[W]
u_{FS}	자유 풍속의 표준불확도	[m/s]
u_i	i번째 빈의 B형 불확도	
u_N	나셀 풍속의 표준불확도	[m/s]
$u_{NTF,M,i}$	일년중 NTF를 측정하는 기간에 따라 변동폭 측정치	[m/s]
$u_{P,i}$	i번째 빈의 출력 B형 표준불확도	[W]
$u_{V,i}$	i번째 빈의 풍속 B형 표준불확도	[m/s]
u_{WD}	풍향의 불확도	[°]
u_T	대기온도의 B형 표준불확도	[K]
V	풍속	[m/s]
V_{ave}	허브 높이에서의 평균 풍속	[m/s]
V_{free}	측정된 나셀 풍속과 마스트 풍속을 이용하여 예측한 자유 풍속	[m/s]
$V_{free,i}$	i번째 빈에서의 마스트 풍속 평균	[m/s]
V_i	i번째 빈의 표준화된 평균 풍속	[m/s]
V_n	표준화된 풍속	[m/s]
$V_{nacelle}$	$_{ree}$ 를 예측하고자 하는 측정된 나셀 풍속	[m/s]
$V_{nacelle,i}$	i번째 빈에서의 나셀 풍속 평균	[m/s]
V_{10min}	측정된 10분 평균 풍속	[m/s]
V_P	출력으로부터 도출한 풍속	[m/s]
WD	풍향(Wind direction)	[°]
WS	풍속(Wind speed)	[m/s]
WTG	풍력터빈(Wind turbine generator)	
ρ_{10min}	측정된 10분 평균 공기밀도	[kg/m ³]
ρ_0	표준공기밀도 [1.225kg/m ³]	
$\sigma_{P,i}$	i번째 빈의 표준화된 출력의 표준편차	[W]
\emptyset	상대습도 [범위 0~1]	

Abstract

A study on power performance testing of a wind turbine which has no met-mast at a distance of 2~4 rotor diameter was carried out using the Nacelle Transfer Function, NTF, according to IEC 61400-12-2. The wind data for this study was measured at HanKyoung wind farm of Jeju Island.

The NTF was modeled using the correlation between wind speeds from the met-mast and from the wind turbine nacelle within 2~4 rotor diameter from the met-mast. The NTF was verified by the comparison of estimated Annual Energy Productions, AEPs, and binned power curves. The Nacelle Power Curve, NPC, was derived from the nacelle wind speed data corrected by NTF. The NPC of wind turbine under test and the power curve offered by the turbine manufacturer were compared to check whether the wind turbine is properly generating electricity. Overall the NPC was in good agreement with the manufacturer's power curve. The result showed power performance testing for a wind turbine which has no met-mast at a distance of 2~4 rotor diameter was successfully carried out in compliance with IEC 61400-12-2.

An uncertainty of the power curve is caused by measurement equipment, environmental condition, and the number of data. In order to obtain the uncertainty of NPC, additional parameters such as NTF, terrain class, seasonal variation, turbulence, and wind shear were considered. The uncertainty of NPC in compliance with IEC 61400-12-2 and the power curve in compliance with IEC 61400-12-1 were compared. The amount of uncertainty of NPC was larger than that of power curve using met-mast wind speed through all wind speed range because of NTF and method uncertainty.

I. 서 론

1. 연구배경

대한민국 지식경제부는 2010년 12월 “해상풍력 추진단”을 구성하여 Fig. 1과 같이 2019년까지 3단계로 나누어 서남해안에 총 2.5GW 규모의 해상풍력발전단지 개발을 추진하고 있다.[1] 국내 풍력터빈 제조사들은 프로젝트 참여를 통한 트랙 레코드(Track record)가 수출을 위한 발판이 될 수 있을 것으로 기대하고 있다.



Fig. 1 Korea large offshore wind farm plan

이에 따라 국산 풍력터빈의 국제인증 획득을 위한 실증의 필요성이 대두되어 전남 영광 실증단지가 개발되고 있으며 대형 풍력터빈(5~7MW)의 실증을 위해 Fig. 2의 제주 김녕 풍력터빈 실증단지의 확장이 진행되고 있다.[2]



Fig. 2 Kim-Nyoung wind turbine testing site in Jeju

풍력터빈 출력성능평가(Wind turbine power performance testing)란 측정된 풍속과 출력

을 이용하여 풍력터빈의 출력곡선과 예측 연간에너지 생산량 산출함으로서 풍력터빈의 성능을 평가하는 것이다. 하중 측정, 블레이드 검사를 비롯하여 풍력터빈 형식 인증 (Type certification)을 위해 수행되어야 하는 한 요소이다.[3]

풍력터빈 출력성능평가는 시제품(Prototype)의 인증을 위해서 뿐만 아니라 풍력단지에 설치되어 운전 중인 풍력터빈의 성능검사를 위해서도 필요하다. 풍력단지의 경제성 여부는 풍력터빈의 적정 출력이 유지되는가에 따라 좌우되기 때문이다. 풍력터빈 출력의 가이드라인은 제조사에서 제공하는 제시 출력곡선이다. 하지만 실제 운영되는 풍력터빈의 출력은 Table 1[4]와 같은 다양한 요인으로 제시 출력을 만족하기 어렵다.

Table 1 Causes of wind turbine downgrade

Environmental condition	Wind turbine operation
Wind shear	Blade condition
Wind veer	Turbine suitability
Turbulence	Control algorithm
Wake effect	Wind farm layout
Icing	Maintenance

Fig. 3은 풍력터빈 출력성능에 문제가 있는 사례이다. 고풍속 구간에서 심각한 성능저하를 보이기 때문에 제어 시스템의 결함이 있거나 결빙이나 손상의 의한 블레이드 공역학적 문제를 의심할 수 있다. 풍력터빈 출력성능평가에 따라 풍력터빈의 이상 증세를 조기에 진단하고 유지보수 시기를 판단하여 풍력단지 운영 손실을 최소화할 수 있다.

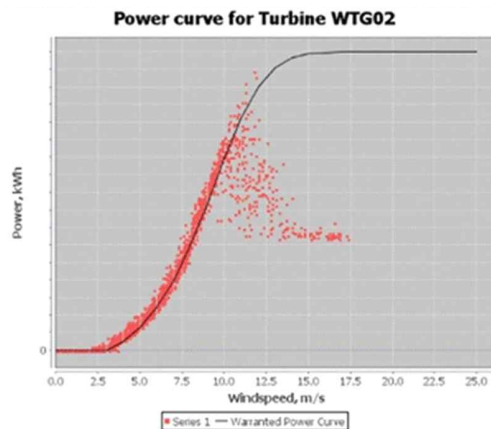


Fig. 3 Error of wind turbine performance

대한민국에서도 풍력사업 개발 초기단계에 건설되어 기 운영 중인 풍력단지들의 운전횟수가 늘어남에 따라 운전 중인 풍력터빈의 적정 출력 생산 여부를 확인하기 위한 풍력단지 단위의 풍력터빈 출력성능평가의 필요성이 대두되고 있다.

2. 연구동향

현재 풍력터빈 출력성능평가는 국제규격 IEC 61400-12-1 에 의거하여 실시되고 있다.[5] IEC 61400-12-1에 의한 평가방법은 풍력터빈에서 로터 직경의 2~4 배 거리에 meteorological mast (이하 met-mast)가 설치되어 있어야 하기 때문에 비용이 많이 소요되고 met-mast를 설치하고 특정 수량 이상의 바람 데이터가 수집되어야 하기 때문에 평가 기간이 5개월 이상으로 길어진다.

A. Albers et al.[6] 의 논문에 의하면 Fig. 4와 같이 풍력터빈 나셀에 부착된 나셀 풍속계를 이용하여 풍력터빈 출력성능평가를 실시할 경우 Fig. 5와 같이 met-mast를 설치하여 실시할 경우보다 비용을 1/3 정도로 줄일 수 있다.



Fig. 4 Nacelle wind anemometer

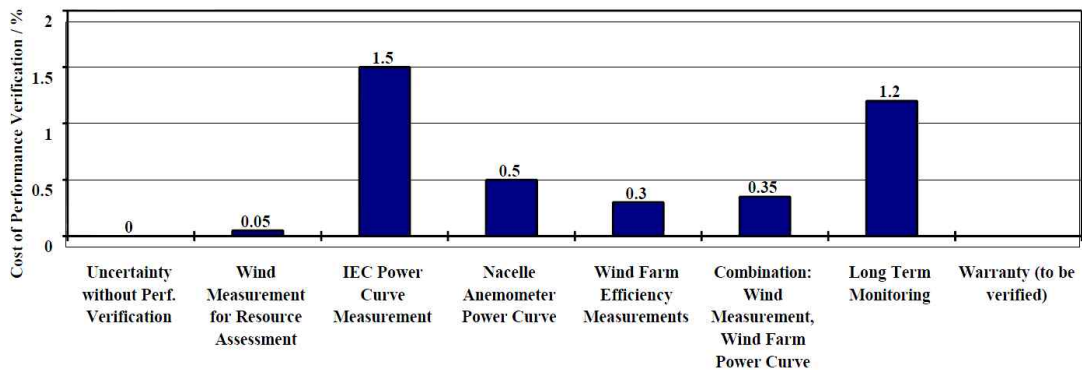


Fig. 5 Cost of performance verification

이에 따라 나셀 풍속계에서 측정된 풍속(이하 나셀 풍속)을 풍력터빈 출력성능평가에 적용하기 위하여 많은 연구들이 진행되었다.

B. Smith et al.[7] 의 NREL(National Renewable Energy Laboratory) 보고서에서는 다양한 풍력터빈 기종에 대하여 met-mast 풍속을 근거로 한 출력곡선과 나셀 풍속을 근거로 한 출력곡선에 차이를 비교하였다.

A. Albers et al.^[8] 의 논문에서는 나셀 풍속을 풍력터빈 출력성능평가에 사용하기 위하여 Fig. 6과 같이 met-mast 풍속과 나셀 풍속의 상관관계를 도출하여 적용할 것을 제안하였다.

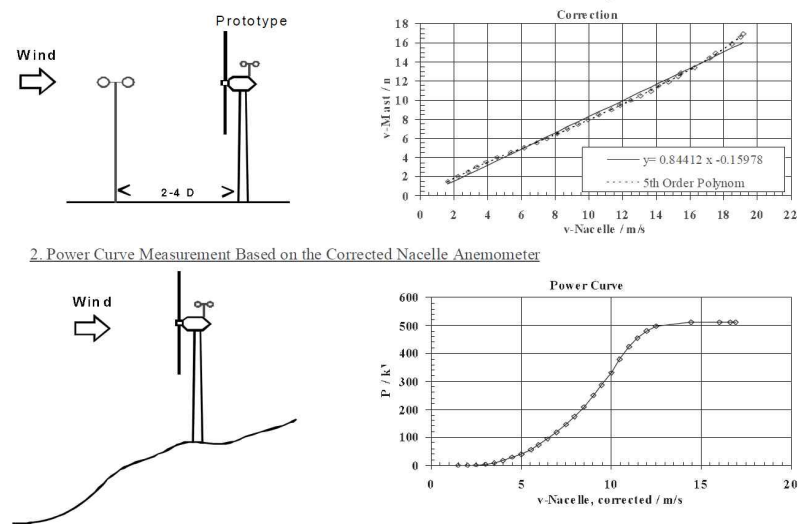


Fig. 6 Methodology of power curve verification via nacelle anemometer

위와 같은 다양한 연구와 실험을 통하여 나셀 풍속을 이용한 풍력터빈 성능평가가 IEC(International Electrotechnical Commission)에 의해 국제표준으로 인정되었다. 이 방법론을 규정한 IEC 61400-12-2 ed.1^[9] 가 2013년 3월 출간됨으로서 특정 거리에 met-mast가 설치되지 않은 풍력터빈도 기존에 도출된 나셀 풍속과 마스트 풍속간의 상관관계를 통하여 출력성능평가가 가능하게 되었다.

3. 연구목적

IEC 61400-12-2 표준을 통해 나셀 풍속을 이용한 풍력터빈 출력성능평가가 인정되었지만 나셀 변환함수를 통한 풍력터빈 출력성능평가는 나셀 풍속과 마스트 풍속간의 상관관계를 사용하기 때문에 환경조건이나 운전특성에 따라 적용 가능 여부와 정확도가 달라질 수 있다.

그럼에도 불구하고 아직까지 본 표준을 이용하여 풍력터빈 출력성능평가를 실시한 사례가 없어 이에 대한 고찰이나 비교 기준이 없는 상태이다. 따라서 본 논문에서는 국제표준 IEC 61400-12-2를 근거로 현재 운영 중인 제주 한경 풍력발전단지를 대상으로 나셀 변환함수를 이용한 풍력터빈 출력성능평가를 실시하여 그 결과를 분석하였다.

II장에서는 나셀 변환함수를 이용한 풍력터빈 출력성능평가에 필요한 데이터 요소, 데이터 측정의 방법과 기준, 데이터 측정 결과를 제시하였다.

III장에서는 테스트 사이트의 지형을 분석하고 나셀 풍속과 마스트 풍속간의 상관관계로 도출한 나셀 변환함수의 적용 가능성 여부를 검증하였다.

IV장에서는 나셀 출력곡선을 이용하여 예측한 연간 에너지 생산량과 실제 연간 에너지 생산량과의 비교를 통해 나셀 출력곡선의 유효성을 확인하였다.

V장에서는 나셀 출력곡선과 예측 연간 에너지 생산량의 불확도를 계산하고 불확도의 요소들을 분석하였다.

II. 테스트 개요

1. 테스트 사이트

한경풍력발전단지는 한국남부발전(주)이 운영하고 있으며 제주특별자치도 제주시 한림읍 한경면 신창리에 위치하고 있다. 한라산을 중심으로 제주도 서북서쪽에 위치하고 있으며 해안에 위치하여 지형은 매우 평탄하다.

Table 2 와 Fig. 7 과 같이 한경풍력 1단계와 2단계 그리고 제주도청의 그린빌리지 사업으로 설치된 풍력터빈 2기가 산재하여 다소 복잡한 배치형태를 보이고 있다. 본 사이트에서 No.6 풍력터빈에 대하여 IEC 61400-12-1를 근거하여 한국에너지기술연구원[10] 에서 풍력터빈 출력성능평가를 실시한 바가 있다.

Table 2 Met-mast measured data

Wind farm	Turbine model	WTG
Hankyong I (2004)	NEG MICON 72C 1500kW H:60m D:72m	No.1 ~ No.4 1.5MW · 4 = 6MW
Hankyong II (2007)	VESTAS 90 3000kW H:80m D:90m	No.5 ~ No.9 3MW · 5 = 15MW
Green village (2006)	VESTAS 52 850kW H:60m D:52m	No.10 ~ No.11 850kW · 2 = 1.7MW

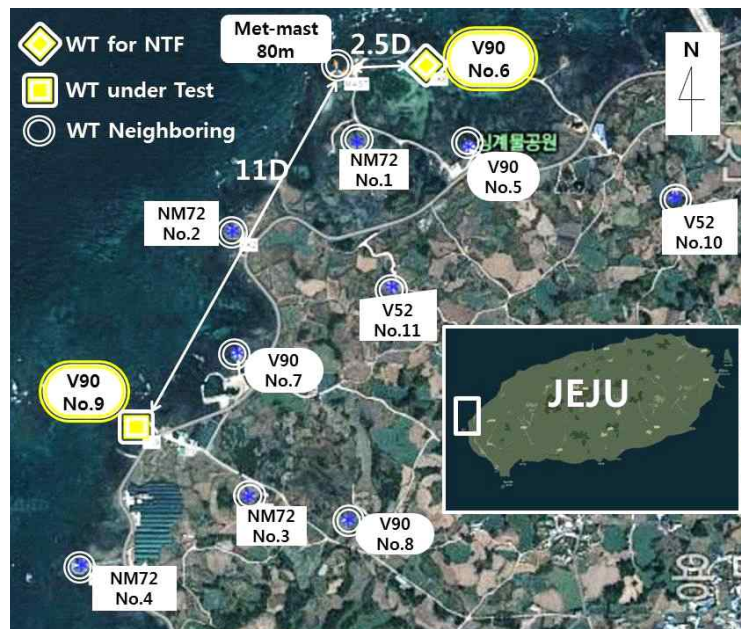


Fig. 7 Test site

2. 테스트 풍력 터빈 사양

나셀 변환함수를 도출하기 위해 사용된 No.6 WTG와 나셀 변환함수를 적용하여 테스트를 실시한 No.9 WTG은 같은 터빈 모델이며 전경은 Fig. 8 에 제품의 사양은 Table 3 에 나타내었다.



Fig. 8 View of WTG under test

Table 3 Specification of WTG under test

WTG model	VESTAS / V90
Rated power (kW)	3,000
Cut-in / Rated / Cut-out wind speed (m/sec)	3.5 / 15 / 25
Rotor diameter (m) / Swept area (m ²)	90 / 6,362
Hub height (m) / Tower type	80 / tubular steel
Design tip speed (RPM) / Rated speed	9.0 - 19.0 / 16.1
Power control	active blade pitch control(three separate)
IEC Class	IA
Gearbox	2 planet/ 1 helical gear system
Generator	Asynchronous DFIG
Brake systme	Full feathering of blade / Mechanical disc barke

3. 측정 데이터

1) 측정 데이터 요소와 측정 장비

데이터의 측정일자는 2009년 9월 17일 부터 2010년 2월 17일까지 6개월이다. 데이터는 한국남부발전(주)의 의뢰로 에너지기술연구원에 의해 측정되었으며 WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH사가 시험장비의 설치를 담당하였다. 제주대학교와 한국남부발전(주) 간의 연구 기술 교류 협정을 통해 데이터 사용이 가능했음을 밝힌다. Met-mast에서 측정한 데이터의 요소와 측정 장비는 Table 4 에서 설명하였고 풍력터빈에서 측정한 데이터의 요소와 측정 장비는 Table 5 에서 설명하였다.

Table 4 Measured data of met-mast

Parameters	Product type	Mounted height
Wind speed	cup anemometer(primary) / Risoe P2546A	80m
Wind direction	Potentiometer / Friedrichs 4121.1000	77m
Pressure	Vaisala PTB100A	1m
Temperature	Thies 2.1280.00.141	77m
Data Acquisition system	DAQ Campbell CR3000	Ground level

Table 5 Measured data of wind turbine

Parameters	Product type	Mounted height
Nacelle wind speed	FT 702LT ultrasonic	80m
Nacelle wind direction	FT 702LT ultrasonic, Revised by the specific offset	80m
Electric power	No.6 WTG : CURRENT TRANSFORMER MBS EASK 123.3(3000A/5A) 0.2class Ritz EKS 160-12(1500/5A) 0.2class VOLTAGE TRANSFORMER Ritz KSZR 104(1000V/100V) 0.2class POWER TRANSDUCER 1000V : EMH ELMU-AHW4BB-174 (100V, 5A) 0.5class(#385404) 400V : EMH ELMU-AHW4BB-774 (400V, 5A) 0.5class(#413778)	-
	No.9 WTG : Vestas SCADA (Verified by comparing transducer end signals)	-

2) 측정 기준과 데이터 처리

(1) 출력(Electric power)

No.6 WTG 는 전력 변환기(power transducer)을 이용하여 각 상(phase)에서 전류와 전압을 측정하였다. 변류기(Current transformer)는 IEC 60044-1의 요구사항에 만족하는 0.2 등급이고 변압기(Voltage transformer)는 IEC 60186의 요구사항을 만족하는 0.2 등급이다. 수집 단위시간은 1초(1Hz sampling rate)이며 10분 단위로 평균한 데이터를 사용하였다.

No.9 WTG 은 SCADA(supervisory control and data acquisition system)에서 수집된 출력을 사용하였다. IEC 61400-12-2 Annex D에 따라 풍력터빈 출력성능 평가에 SCADA 출력 데이터를 사용하기 위해서는 전력 변환기(power transducer)을 이용하여 측정한 값과의 비교 검증이 필요하다. Fig. 9은 No.6 WTG에서 동시간에 측정된 전력변환기 출력과 SCADA 출력을 나타낸다. 두 출력값 간의 선형 관계선의 기울기가 0.98 이상이며 결정계수가 0.99 이상으로 상관관계가 높으며 동일한 값으로 판단할 수 있다.

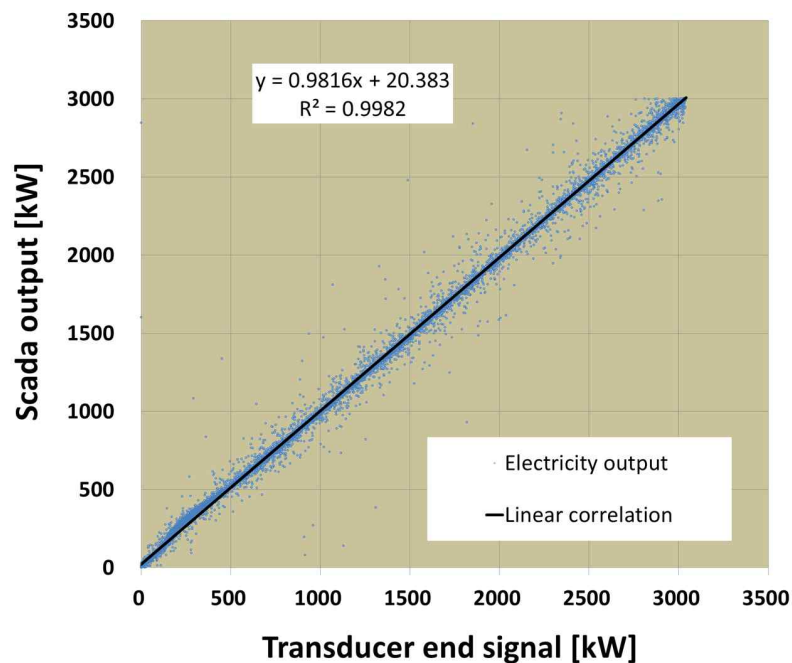


Fig. 9 Comparison of power output between transducer end and SCADA

(2) 풍속(Wind speed)

Met-mast에서의 풍속 측정은 컵형 풍속계(Cup anemometer)를 이용하였다. 출력 성능 측정용 풍속계 등급은 1.7A 등급 이상이 권장된다. IEC 61400-12-1 Annex B 의 지형조건을 만족하지 못할 경우는 2.5B 혹은 1.7S 등급 이상이 추천된다. 본 테스트에서는 1.9A 등급 제품이 사용되었다. 풍속계는 허브 높이 80m에 장착되어 허브 높이(Hub height)의 $\pm 2.5\%$ 범위를 만족하였다.

나셀 풍속계는 소닉 풍속계(Sonic anemometer)가 사용되었다. 나셀 풍속계의 성능은 2.5B 이상을 권장하고 있다. 사용된 풍속계는 FT702 sonic anemometer 로 IEC 에 따른 등급을 갖고 있지 않으므로 IEC 61400-12-2에 따라 4.0B 등급으로 계산하였다. Fig. 10 은 No.9 WTG 에 설치된 나셀 풍속계의 모습이다. 수집 단위시간은 1초(1Hz sampling rate)이며 10분 단위로 평균한 데이터를 사용하였다.



Fig. 10 Nacelle anemometer of No.6 WTG

(3) 풍향(Wind direction)

Met-mast 풍향계는 77m에 설치되어 주 풍속계 최소 1.5m 아래 그리고 지면으로부터 허브 높이의 10% 이내 높이를 만족하였다.

나셀 풍향은 풍속을 측정한 소닉 센서에서 함께 측정되었다. 나셀 풍향이 특정 각을 중심으로 대칭 offset 되어있어 met-mast 풍향을 기준으로 보정하였다. 소닉 센서 같은 경우 풍향의 불확도가 높기 때문에 바람 데이터의 불확도 산출시 풍향에 의한 불확도를 추가적으로 계산한다. 수집 단위시간은 1초(1Hz sampling rate)이며 10분 단위로 평균한 데이터를 사용하였다.

(4) 공기 밀도(Air density)

공기 밀도는 대기압과 대기온도를 이용하여 정해진다. 대기온도 센서와 습도 센서가 사용될 경우 풍력발전기 로터 중심의 대기온도를 나타내기 위해 허브 높이의 10m 이내에 기상 측정탑상에 부착되어야 한다. 대기압 센서는 풍력발전기 로터 중심의 대기압을 나타내기 위해 허브 높이와 거의 동일한 위치의 기상 측정탑에 부착되어야 하지만, 본 테스트에서 대기압 측정이 지상 1m에서 이루어졌으므로 ISO 2533[11]에 따라 아래 식을 통하여 기압을 보정 하였다.

$$P \times \exp\left(-\frac{g \times M \times h}{R \times T_0}\right) \quad (1)$$

여기서,

- P : 높이 h 에서의 기압[Pa]
- P_0 : 해수면 표준 기압[101,325 Pa]
- h : 해발고도 [m]
- T_0 : 해수면 표준 온도[288.15 K]
- g : 지표면 중력 가속도[9.80665 m/s²]
- M : 건조 공기의 몰 질량[0.0289644 kg/mol]
- R : 일반 가스 상수[8.31447 J/(mol · K)]

온도가 높은 경우는 상대습도(Relative humidity)를 측정하여 대기 습도의 밀도 효과를 보정하여야 한다. 본 테스트에서는 측정 없이 0.5 값을 대입하였다. 공기밀도의 계산식은 아래와 같다.

$$\rho_{10min} = \frac{1}{T_{10min}} \left(\frac{B_{10min}}{R_0} - \phi P \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_W} \right) \right) \quad (2)$$

여기서,

- ρ_{10min} : 산출된 10분 평균 공기밀도[kg/m³]
- T_{10min} : 측정된 10분 평균 절대온도[K]
- B_{10min} : 측정된 10분 평균 기압[hPa]
- R_0 : 건조 공기의 가스 상수[287.05 J/(kg1 · K)]
- ϕ : 상대습도[범위 0~1]
- R_W : 수증기의 가스 상수[461.5 J/(kg1 · K)]
- P_W : 수증기의 압력[Pa] = 0.0000205exp(0.0613846 T)

III. 출력성능평가

1. 나셀 변환함수(NTF)

나셀 풍속 데이터는 업윈드(Upwind)에서 로터 회전의 영향을 받기 때문에 풍력터빈 출력성능평가를 위한 자료로 사용하지 못하여 왔다. IEC 61400-12-2에서는 나셀 변환함수(Nacelle Transfer Function, NTF)를 통해 나셀 풍속과 마스트 풍속의 상관관계를 구하고 이를 이용하여 업윈드(upwind)에서의 풍속을 예측 가능하도록 하였다.

나셀 변환함수를 도출하기 위해 No.6 WTG에서 나셀 풍속을 측정하고 로터 직경의 2.5배 떨어져있는 80m 허브 높이의 met-mast에서 마스트 풍속을 측정하였다.

1) 나셀 변환함수를 위한 측정 방위구간^[2]

IEC 61400-12-1 Annex A에 의거하여 met-mast와 No.6 WTG의 주변에 풍력발전기가 있거나 심각한 장애물이 있어 유동의 왜곡이 생기는 풍향에서 측정된 풍속은 나셀 변환함수를 위한 데이터에서 배제시켜야 한다. 왜곡의 의한 풍속의 변화와 발전량의 변화를 정확히 예측하지 못하기 때문이다. Met-mast와 No.6 WTG 인근 풍력터빈에 의해 발생한 배제 풍향각의 범위()는 아래의 식을 통해 결정된다.

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5 / L_n + 0.15) + 10 \quad (3)$$

여기서,

L_n : 풍력터빈 또는 met-mast와 인근에서 운행 중인 풍력터빈간의 거리[m]

D_n : 인근에서 운행 중인 풍력터빈의 로터 길이[m]

Met-mast와 No.6 WTG의 배제 방위구간(Excluded sector)을 제외한 유효 측정 방위 구간(Measurement sector)은 Fig. 11과 같이 252°~46°로 결정되었다.

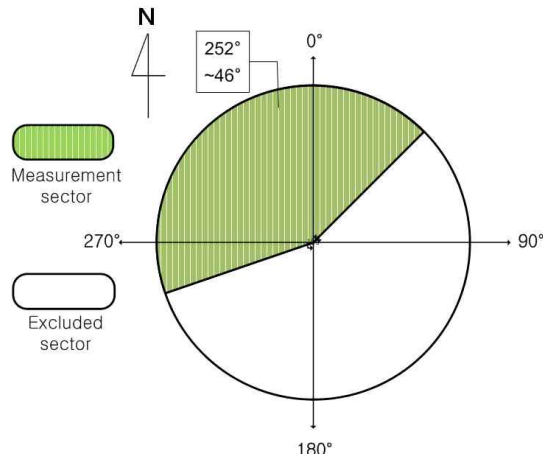


Fig. 11 Measurement sector for NTF

2) 지형에 따른 결과값 보정(site calibration)

지형이 복잡하여 met-mast와 풍력터빈 사이에 유동왜곡이 발생할 경우 데이터 결과를 보정(site calibration)해야 하기 때문에 국소지형의 복잡도 (Complexity)를 평가해야 한다.[13]

IEC 61400-12-1 Annex B에 따라 지형 평가를 시행했다. 테스트 사이트에서 met-mast와 No.6 WTG 사이의 거리(L)가 221m 이므로 2L(442m), 4L(884m), 8L(1768m)을 반지름으로 하는 원형 구역을 만들고 측정 방위구간과 그 외 구간으로 구분하였다. 표준의 요구사항인 등고선 5m 간격의 수치지도를 지형분석에 사용하였다. Fig. 12 은 지형 분석 영역을 보여주고 있다.

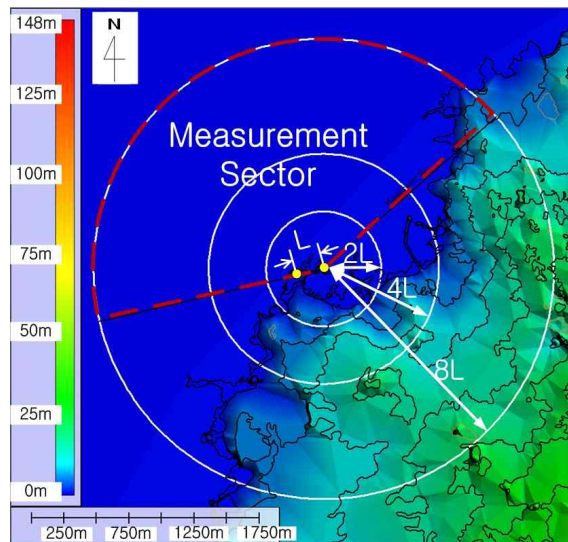


Fig. 12 Area for terrain evaluation

본 테스트 사이트의 지형 복잡도는 Table 6 와 같이 모든 기준을 만족하여 매우 평탄한 지형으로 판단되었고 따라서 결과값 보정이 필요하지 않았다.[14][15]

Table 6 Terrain evaluation

Distance	Sector	Maximum slope[%]	Max. terrain variation[m] H : 80m / D: 90m
<2L	360°	0.63<3 *	4.40 < 0.04(H+D) *
From Pos: 236816.632, 3693195.251 To Pos: 236777.037, 3692762.585			
≥2L<4L	Measurement sector	0.00<5 *	0 < 0.08(H+D) *

offshore area

≥2L<4L	Outside Measurement sector	1.74<10 *	Not application
From Pos: 236822.179, 3693196.654 To Pos: 237173.361, 3692401.328			
≥4L<8L	Measurement sector	0.46<10 *	7.39 <0.13(H+D) *

From Pos: 236820.457, 3693201.818 To Pos: 238147.721, 3694374.14			

3) 마스트 풍속과 나셀 풍속 상관관계

나셀 변환함수는 나셀 풍속(V_{acelle})과 자유풍속(V_{free})간의 상관관계라고 정의할 수 있다. 자유풍속(V_{free})은 나셀 변환함수로 보정한 나셀 풍속이다. 나셀 변환함수를 구하는 방법은 Fitted function 방식과 Table 방식이 있다.

(1) Fitted function 방식

Fig. 13 에서 측정 데이터(raw measurement)는 측정 방위구간에서 측정된 10분 평균 나셀 풍속과 동시간에 측정된 10분 평균 마스트 풍속이다. 측정 데이터들을 선형 회귀식(linear regression)을 통해 나셀 풍속(독립변수, x)과 자유풍속(종속변수, y)간의 관계식을 도출하였고 이를 통해 자유풍속(V_{free})을 예측할 수 있다. 측정 데이터의 결정계수(coefficient determination)는 0.99로 독립변수와 종속변수간의 매우 높은 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.[16] 네덜란드 에너지 연구 센터(ECN)은 이 Fitted function 방식으로 풍력단지의 효율성 연구를 수행한 바 있다.[17]

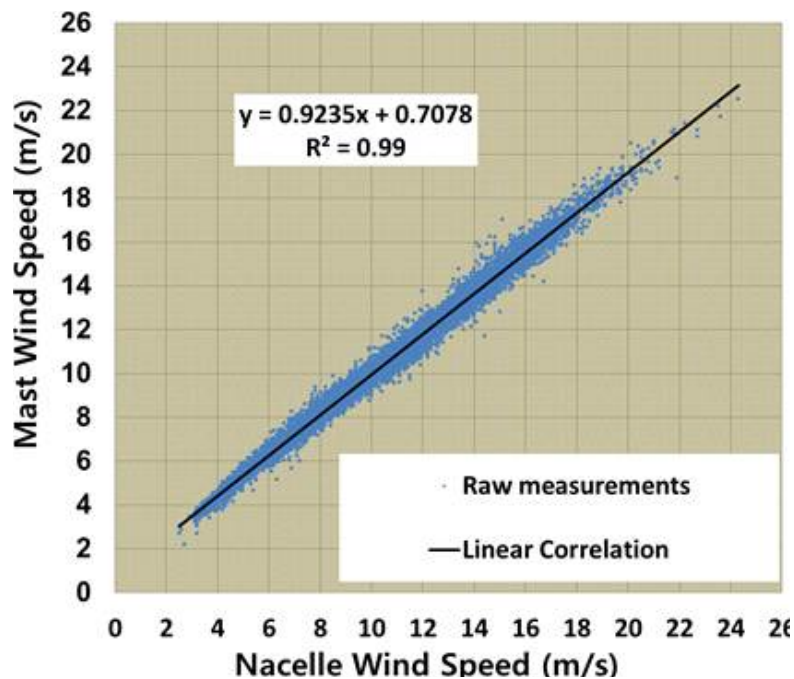


Fig. 13 NTF as form of fitted function

(2) Table 방식

Fig. 14 과 같이 측정 데이터(raw measurement)를 Method of bins에 의해 나셀 풍속을 0.5m/s 빈(Bin) 간격으로 평균값을 구한다. 각 빈의 평균값 사이를 (4) 식을 이용하여 선형내삽(linear interpolation)한다.

$$V_{free} = \frac{(V_{free,i+1} - V_{free,i}) / (V_{nacelle,i+1} - V_{nacelle,i})}{\times (V_{nacelle} - V_{nacelle,i})} + V_{free,i} \quad (4)$$

여기서,

- $V_{nacelle,i}$: i번째 빈에서의 나셀 풍속 평균[m/s]
- $V_{free,i}$: i번째 빈에서의 마스트 풍속 평균[m/s]
- $V_{nacelle}$: V_{free} 를 예측하고자 하는 측정된 나셀 풍속[m/s]
- V_{free} : 측정된 나셀 풍속과 마스트 풍속을 이용하여 예측한 자유풍속[m/s]

내삽된 선을 이용하여 0.1m/s 간격으로 측정된 나셀 풍속을 0.1m/s 간격의 자유풍속으로 변환한다. Table 방식은 빈 간격으로 세분화하여 자유풍속을 예측하여 정확도가 높음으로써 본 연구에서는 Table 방식의 나셀 변환함수를 사용하였다. 나셀 풍속($V_{nacelle}$)과 자유풍속(V_{free})의 변환 값은 Table 7 와 같다.

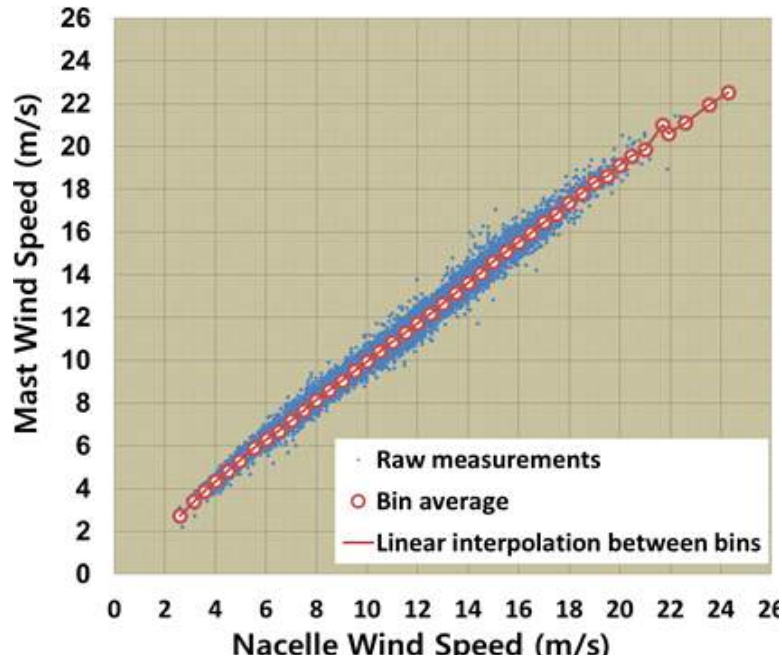


Fig. 14 NTF as form of table

Table 7 Table of transfer function from V_{acelle} to V_{free}

V_{acelle}	V_{free}	$V_{nacelle}$	V_{free}	$V_{nacelle}$	V_{free}	$V_{nacelle}$	V_{free}	$V_{nacelle}$	V_{free}
2.6	2.7	7.1	7.3	11.6	11.4	16.1	15.6	20.6	19.6
2.7	2.8	7.2	7.4	11.7	11.5	16.2	15.7	20.7	19.7
2.8	3.0	7.3	7.5	11.8	11.6	16.3	15.8	20.8	19.7
2.9	3.1	7.4	7.6	11.9	11.6	16.4	15.9	20.9	19.8
3.0	3.2	7.5	7.7	12.0	11.7	16.5	16.0	21.0	19.9
3.1	3.3	7.6	7.8	12.1	11.8	16.6	16.1	21.1	20.0
3.2	3.4	7.7	7.9	12.2	11.9	16.7	16.2	21.2	20.2
3.3	3.6	7.8	8.0	12.3	12.0	16.8	16.3	21.3	20.3
3.4	3.7	7.9	8.1	12.4	12.1	16.9	16.4	21.4	20.5
3.5	3.8	8.0	8.1	12.5	12.2	17.0	16.5	21.5	20.7
3.6	3.9	8.1	8.2	12.6	12.3	17.1	16.5	21.6	20.8
3.7	4.0	8.2	8.3	12.7	12.4	17.2	16.6	21.7	21.0
3.8	4.1	8.3	8.4	12.8	12.5	17.3	16.7	21.8	20.8
3.9	4.2	8.4	8.5	12.9	12.6	17.4	16.8	21.9	20.6
4.0	4.3	8.5	8.6	13.0	12.7	17.5	16.8	22.0	20.7
4.1	4.4	8.6	8.7	13.1	12.8	17.6	17.0	22.1	20.7
4.2	4.5	8.7	8.8	13.2	12.9	17.7	17.1	22.2	20.8
4.3	4.6	8.8	8.9	13.3	12.9	17.8	17.2	22.3	20.9
4.4	4.7	8.9	9.0	13.4	13.0	17.9	17.3	22.4	21.0
4.5	4.8	9.0	9.1	13.5	13.1	18.0	17.4	22.5	21.0
4.6	4.9	9.1	9.1	13.6	13.2	18.1	17.5	22.6	21.1
4.7	5.0	9.2	9.2	13.7	13.3	18.2	17.6	22.7	21.2
4.8	5.1	9.3	9.3	13.8	13.4	18.3	17.7	22.8	21.3
4.9	5.2	9.4	9.4	13.9	13.5	18.4	17.7	22.9	21.4
5.0	5.3	9.5	9.5	14.0	13.6	18.5	17.8	23.0	21.5
5.1	5.5	9.6	9.6	14.1	13.7	18.6	17.9	23.1	21.6
5.2	5.6	9.7	9.7	14.2	13.8	18.7	18.0	23.2	21.6
5.3	5.7	9.8	9.8	14.3	13.9	18.8	18.1	23.3	21.7
5.4	5.8	9.9	9.9	14.4	14.0	18.9	18.2	23.4	21.8
5.5	5.9	10.0	9.9	14.5	14.1	19.0	18.3	23.5	21.9
5.6	6.0	10.1	10.0	14.6	14.2	19.1	18.4	23.6	22.0
5.7	6.0	10.2	10.1	14.7	14.3	19.2	18.4	23.7	22.1
5.8	6.1	10.3	10.2	14.8	14.4	19.3	18.5	23.8	22.2
5.9	6.2	10.4	10.3	14.9	14.5	19.4	18.6	23.9	22.2
6.0	6.3	10.5	10.4	15.0	14.6	19.5	18.6	24.0	22.3
6.1	6.4	10.6	10.5	15.1	14.7	19.6	18.7	24.1	22.4
6.2	6.4	10.7	10.6	15.2	14.8	19.7	18.8	24.2	22.5
6.3	6.5	10.8	10.7	15.3	14.9	19.8	18.9	24.3	22.5
6.4	6.6	10.9	10.8	15.4	15.0	19.9	19.0		
6.5	6.7	11.0	10.9	15.5	15.1	20.0	19.1		
6.6	6.8	11.1	11.0	15.6	15.2	20.1	19.2		
6.7	6.9	11.2	11.0	15.7	15.3	20.2	19.3		
6.8	7.0	11.3	11.1	15.8	15.4	20.3	19.4		
6.9	7.1	11.4	11.2	15.9	15.4	20.4	19.5		
7.0	7.2	11.5	11.3	16.0	15.5	20.5	19.6		

4) 나셀 변환함수 검증

나셀 변환함수로 보정된 나셀 풍속을 근거로 도출한 출력곡선을 나셀 출력곡선(Nacelle power curve, NPC)이라고 한다. No.6 WTG를 대상으로 2.5D 거리에 있는 met-mast에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 출력곡선과 나셀 풍속계에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 나셀 출력곡선의 일치 정도를 비교하였다. 표준공기밀도(1.225kg/m³)를 기준으로 작성된 제조사의 제시 출력곡선과 비교하기 위해 측정 풍속을 표준화(normalization) 하여 테스트 사이트의 조건을 표준공기밀도로 가정한 값으로 바꾸었다. Active power control 제어 방식의 풍력터빈일 경우 식 (5)을 이용하여 풍속을 표준화한다.

$$V_{free} \times \left(\frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

여기서,

V_n : 표준화된 풍속 [m/s]

V_{free} : 나셀 변환함수를 이용하여 보정한 나셀 풍속 [m/s]

ρ_{10min} : 측정된 10분 평균 공기밀도 [kg/m³]

ρ_0 : 표준공기밀도(15°C, 1013hPa) [1.225kg/m³]

실측 출력곡선은 표준화된 풍속 데이터를 식(6)과 같이 0.5m/s bin으로 평균하고 출력은 식(7)과 같이 평균한다.

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1} V_{n,i,j} \quad (6)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^N P_{n,i,j} \quad (7)$$

여기서,

V_i : i번째 bin의 표준화된 평균 풍속 [m/s]

$V_{n,i,j}$: i번째 bin의 표준화된 j번째 풍속 [m/s]

P_i : i번째 bin의 표준화된 평균 출력 [kW]

$P_{n,i,j}$: i번째 bin의 표준화된 j번째 출력 [kW]

N_i : i번째 bin의 10분 평균 데이터 수

Fig. 15 에서 No.6 WTG를 대상으로 2.5D 거리에 있는 met-mast에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 출력곡선(Mast PC_No.6)과 나셀 풍속계에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 나셀 출력곡선(NPC_No.6) 그리고 제조사에서 제공한 Vestas 90 3MW 의 제시 출력곡선(Manufacturer PC)을 함께 제시하였다.

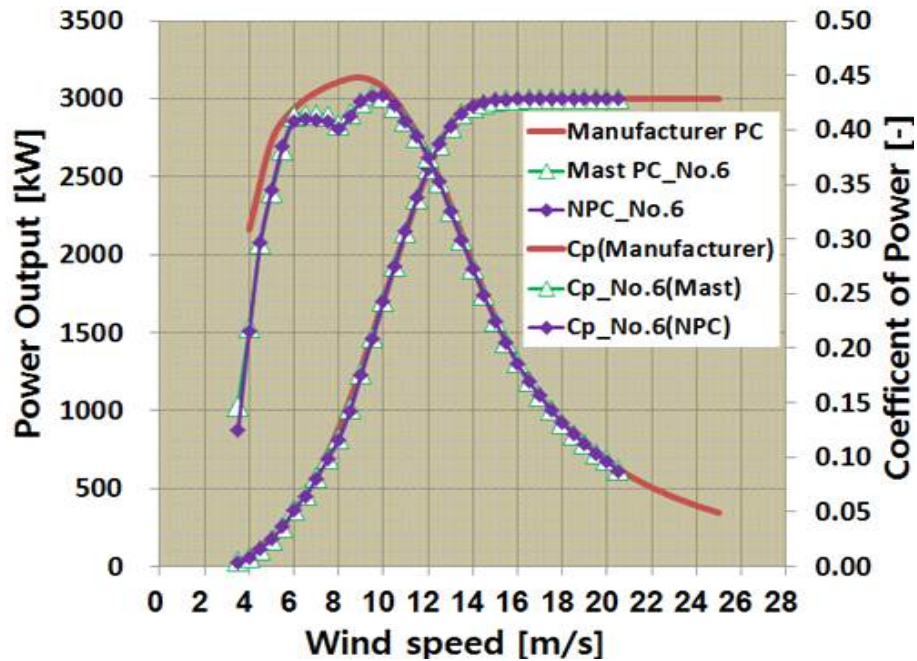


Fig. 15 Comparison of No.6 WTG power curves between mast wind speed and nacelle wind speed

Met-mast에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 출력곡선(Mast PC_No.6)과 나셀 풍속계에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 나셀 출력곡선(NPC-No.6)이 잘 일치한다면 나셀 변환함수가 유효하다고 할 수 있다.

일치성을 검증하기 위해 두 출력곡선의 풍속 빈 별 출력 차이를 비교하였다. 또한 레일리 분포(Rayleigh distribution)를 가정하여 각각의 출력곡선으로 예측한 연간에너지생산량(AEP)을 비교하였다.

IEC 61400-12-2 Annex D에 의하면 풍속 빈 별 최대 출력오차는 각 빈의 출력의 1% 이하이거나 터빈 정격출력의 0.5% 이하여야한다. Table 8 은 No.6 WTG를 대상으로 met-mast에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 각 빈의 출력, 나셀 풍속계에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 각 빈의 출력을 구하고 각 빈의 출력 차이를 나타내었다. 기준은 정격출력의 0.5%인 15kW이다. 측정된 풍속의 모든 빈에서 출력 차이는 기준을 만족하는 수치를 보였다.

Table 8 Power differences of bins

Bin no.	[m/s]	No.6 WTG + mast WS [kW]	No.6 WTG + nacelle WS [kW]	Difference [kW]	Criterion [kW]
7	3.5	29	24	4	15
8	4.0	58	58	0	15
9	4.5	108	112	4	15
10	5.0	171	175	4	15
11	5.5	251	254	4	15
12	6.0	363	359	3	15
13	6.5	454	452	2	15
14	7.0	566	560	6	15
15	7.5	692	688	4	15
16	8.0	821	814	7	15
17	8.5	1011	996	15	15
18	9.0	1235	1225	10	15
19	9.5	1465	1459	6	15
20	10.0	1697	1701	4	15
21	10.5	1922	1929	8	15
22	11.0	2141	2148	6	15
23	11.5	2356	2362	6	15
24	12.0	2551	2551	0	15
25	12.5	2704	2713	9	15
26	13.0	2819	2826	7	15
27	13.5	2903	2905	2	15
28	14.0	2944	2950	5	15
29	14.5	2972	2977	5	15
30	15.0	2986	2988	2	15
31	15.5	2993	2995	2	15
32	16.0	2995	2997	2	15
33	16.5	2997	2999	1	15
34	17.0	3000	3000	0	15
35	17.5	3000	3000	0	15
36	18.0	3000	3001	1	15
37	18.5	3001	3000	1	15
38	19.0	3000	3000	1	15
39	19.5	3000	3001	1	15
40	20.0	3001	3001	0	15
41	20.5	3001	3001	0	15

연간에너지생산량(AEP)을 계산하기 위해 풍속의 빈도는 레일리 분포(Rayleigh distribution)를 가정하고 가동율(Availability)은 100%로 가정한다.

레일리 분포는 형상계수가 2인 와이불 분포(Weibull distribution)와 동일한 것으로 연간 평균 풍속을 알면 풍속 분포를 가정할 수 있다. 레일리 누적확률분포(Rayleigh cumulative probability distribution)는 식(8)과 같다.

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right) \quad (8)$$

여기서,

$F(V)$: 풍속의 레일리 누적확률분포함수

V_{ave} : 허브 높이에서의 연간 평균 풍속[m/s]

V : 풍속 [m/s]

레일리 누적확률분포를 이용하여 연간에너지생산량(AEP) 예측은 식(9)를 이용하여 계산한다.

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (9)$$

여기서,

AEP : 연간 에너지 생산량

N_h : 1년 중 시간 수 (=8760)

N : Bin 수

V_i : i번째 빈의 표준화된 평균 풍속[m/s]

P_i : i번째 빈의 표준화된 평균 출력[kW]

Met-mast에서 측정된 풍속을 근거로 도출한 출력곡선(Mast PC_No.6)을 통해 예측한 연간에너지생산량(AEP)과 나셀 출력곡선(NPC_No.6)을 통해 예측한 연간 에너지생산량(AEP)을 비교하였다. 테스트 사이트의 연간평균풍속이 4~11m/s 의 각 경우에 최대 AEP 차이는 1% 이하여야 한다. Table 9 에 나타난 바와 같이 각 연간평균풍속에서 두 출력곡선으로 도출한 AEP의 차이가 기준을 만족함을 알 수 있다.

Table 9 AEP differences

Annual avg. WS [m/s]	AEP_ Mast PC [MWh]	AEP_ NTF PC [MWh]	Difference [MWh]	Criteria [MWh]
4	1572	1567	5	16
5	3187	3179	8	32
6	5225	5215	10	52
7	7402	7394	8	74
8	9440	9435	5	94
9	11130	11127	3	111
10	12371	12370	1	124
11	13156	13158	2	132

No.6 WTG를 대상으로 도출한 마스트 풍속 출력곡선과 보정한 나셀 풍속 출력곡선의 풍속 빈 별 출력 차이와 연간에너지생산량(AEP) 차이를 분석한 결과 모든 경우에서 조건을 만족하는 결과를 보여주었다. 따라서 마스트 풍속과 나셀 풍속을 이용하여 도출한 나셀 변환함수(NTF)가 나셀풍속을 자유풍속으로 변환하는 도구로 유효하다는 것을 검증할 수 있었다. 따라서 도출된 나셀 변환함수는 No.9 WTG 나셀 풍속계에서 측정된 풍속을 보정하여 자유풍속으로 변환시켜 줄 수 있다.

2. 나셀 출력곡선(NPC)

나셀 변환함수를 적용할 수 있는 풍력터빈은 나셀 변환함수를 도출한 동일한 기종의 풍력터빈이어야 한다. 평가대상 풍력터빈은 No.9 WTG으로 나셀 변환함수를 도출한 No.6 WTG 와 같은 기종이다. Fig. 16 과 같이 No.9 WTG은 met-mast와 11 로터 직경 거리에 위치해 있으므로 마스트 풍속과 출력 간의 상관관계가 떨어진다. 따라서 No.9 WTG에서 측정된 나셀 풍속을 나셀변환함수로 보정 후 출력성능평가를 실시하였다.

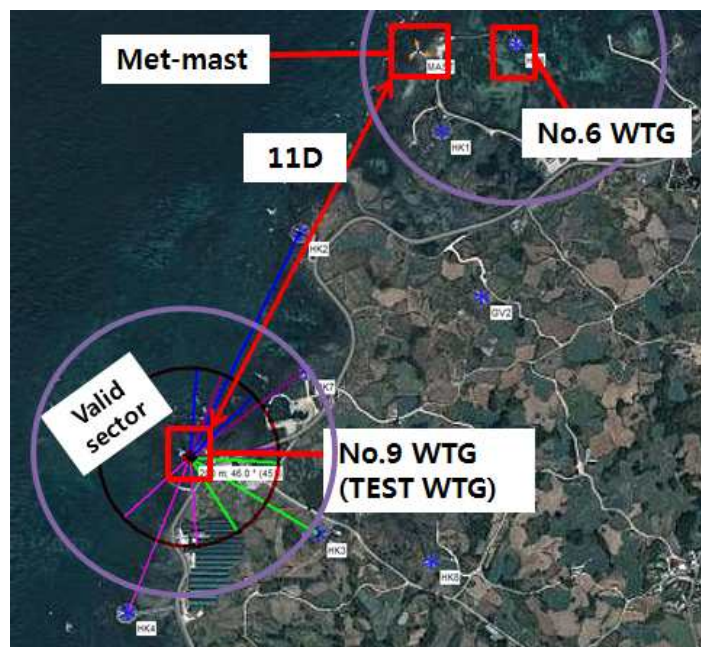


Fig. 16 Local terrains of No.6 WTG and No.9 WTG

1) 지형 등급(Terrain class)

나셀 변환함수의 도출과 적용이 다른 풍력단지에서 이루어졌다면 각 국소지형의 등급이 일치해야 하며 같은 풍력단지에서 이루어졌다면 ±1 의 차이를 허용한다. 만약 이 조건을 만족하지 못한다면 나셀 변환함수의 도출이 평평한 지형에서 이루어져야 한다.

또한 나셀 변환함수를 도출하는 국소지형의 측정 방위구간을 10도 간격 구간으로 나누었을 때 오르막 또는 내리막의 경사신호(sign of slope)가 혼재해 있으면 안 된다. 경사신호가 다른 구간이 있을 경우 측정 방위구간에서 제외한다. 나셀 변환함수를 도출한 측정 방위구간의 경사신호는 나셀 변환함수를 적용하는 국소지형의 측정 방위구간의 경사신호와 동일해야 한다.

(1) 거칠기 지수(RIX index)^[18]

거칠기 지수(ruggedness index, RIX index)를 구하기 위해서 우선 측정 방위구간을 10° 간격 구간으로 나눈 후 풍력터빈 위치에서 허브 높이의 20배 거리에 상응하는 외곽선까지의 길이를 30m 간격으로 나누고 각 간격의 고도차(z) 절댓값을 아래와 같이 구한다.

$$\Delta z_i = \frac{elevation_i - elevation_{i-1}}{30} \left| \right.$$

Δz_i 가 $0.04 \times (rotordiameter + Hub\ height)$ 보다 클 경우 $RIX_{0.04}$ 로 표현한다. 10° 간격 구간에서 $RIX_{0.04}$, $RIX_{0.06}$, $RIX_{0.08}$ 이 차지하는 백분율을 구한다. $RIX_{0.06}$ 은 $RIX_{0.04}$ 의 수를 포함하고 $RIX_{0.08}$ 는 $RIX_{0.06}$ 와 $RIX_{0.04}$ 의 수를 포함한다.

측정 방위구간의 거칠기 지표는 10° 간격 구간에서 계산된 $RIX_{0.04}$, $RIX_{0.06}$, $RIX_{0.08}$ 백분율의 평균이다. 표에 기준에 따라 측정 방위구간의 풍력 터빈 국소지형의 거칠기 지수 등급이 결정된다.

Table 10 RIX terrain classification

RIX [%]	RIX terrain class
Compliant to IEC 61400-12-1:2005 Annex B (use L=2.5D)	0
$RIX_{0.04} < 16$ AND $RIX_{0.06} < 8$ AND $RIX_{0.08} < 4$ but not class 0	1
$RIX_{0.04} < 32$ AND $RIX_{0.06} < 16$ AND $RIX_{0.08} < 8$ but not class 1	2
$RIX_{0.04} < 48$ AND $RIX_{0.06} < 32$ AND $RIX_{0.08} < 16$ but not class 2	3
$RIX_{0.04} \geq 48$ OR $RIX_{0.06} \geq 32$ OR $RIX_{0.08} \geq 16$	4

(2) 평균 경사(Average slope)

풍력터빈 위치에서 허브 높이의 5배 길이를 반지름으로 원형의 범위를 분석한다. 측정 방위구간내 10° 간격 구간의 경사값을 평균한다. 나셀 변환함수는 오르막 경사 또는 내리막 경사에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 경사의 오르막 신호 또는 내리막 신호가 혼재 되어있을 경우는 측정 방위구간을 줄이는 것이 좋다. Table 11 와 같은 기준에 따라 측정 방위구간의 평균경사 등급이 결정된다.

Table 11 Slope terrain classification

Absolute slope [%]	Slope terrain class
Compliant to IEC 61400-12-1:2005 Annex B (use L=2.5D)	1
$0^\circ \leq \text{slope} < 10^\circ$, but not class 1	2
$10^\circ \leq \text{slope} < 15^\circ$	3
$15^\circ \leq \text{slope} < 20^\circ$	4
$20^\circ \leq \text{slope}$	5

(3) 최종 지형 등급(Final terrain class)

최종 지형 등급은 거칠기 지수(RIX index) 등급과 평균 경사(Average slope) 등급의 합으로 결정된다. 단, 최대 최종 지형 등급은 5이고 그 이상의 등급이 나올 경우 5등급으로 한다.

No.6 WTG 의 국소 지형인 경우 met-mast와 터빈 간의 거리(L)이 2.5D이고 IEC 61400-12-1 Annex B에 따라 측정 방위구간이 site calibration이 필요 없는 지형이므로 최소 거칠기 지수값 0등급과 최소 평균 경사 1등급을 가지므로 최종 지형등급은 1등급이다.

No.9 WTG 의 국소 지형인 경우 met-mast와 터빈 간의 거리를 2.5D로 가정하고 정한 범위에서 IEC 61400-12-1 Annex B에 따라 site calibration이 필요 없는 지형이므로 최소 거칠기 지수값 0등급과 최소 평균 경사 1등급을 가지므로 최종 지형등급은 1등급이다.

따라서 나셀 변환함수를 No.9 WTG에서 측정한 나셀 풍속의 보정에 사용하기 위한 지형적 조건을 만족함을 알 수 있다. 또한 No.9 WTG 평가 풍력터빈과 인근 터빈과의 거리가 기준 2D 이상이므로 조건을 만족하고 있다.

2) 나셀 출력곡선 측정 방위구간

(1) 이론적 측정 방위구간 계산

IEC 61400-12-1 Annex B에 따라 No.9 WTG의 이론적인 측정 방위구간을 Table 12 와 같이 계산하였다. Fig. 17 에서는 배제 방위구간과 이를 제외한 측정 방위구간을 나타내었다.

Table 12 Excluded sectors from No.9 WTG

Neighboring WTG	Rotor diameter	Distance from No.9 WTG	Direction from No.9 WTG	Excluded sector
No.2 WTG	72m	557m	25°	4° ~ 46°
No.3 WTG	72m	334m	120°	93° ~ 147°
No.4 WTG	72m	372m	201°	175° ~ 227°
No.7 WTG	90m	324m	52°	21° ~ 83°
No.8 WTG	90m	586m	112°	89° ~ 135°
No.11 WTG	52m	744m	60°	43° ~ 77°

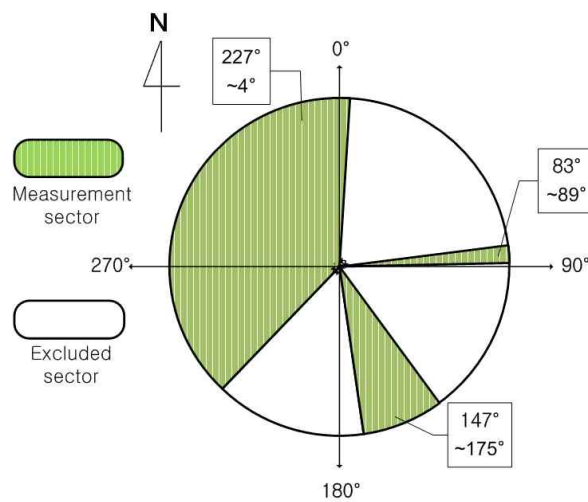


Fig. 17 Measurement sector for No.9 WTG

(2) Self-consistency check을 이용한 유동왜곡 검사

이론적 측정 방위구간을 계산하였지만 실제로는 측정방위구간 내에서 유동왜곡으로 인해 나셀 변환함수가 유효하지 않을 수 있다. 반대로 배제 방위구간에서 유동왜곡이 없이 나셀 변환함수가 유효할 수 있다. 이를 확인하기 위해 측정된 데이터를 이용하여 self-consistency check 실시한다.

Fig. 18 은 No.9 WTG의 self-consistency check 결과를 보여준다. 직사각형으로 구분된 부분은 이론적으로 계산한 배제 방위구간 범위이다.

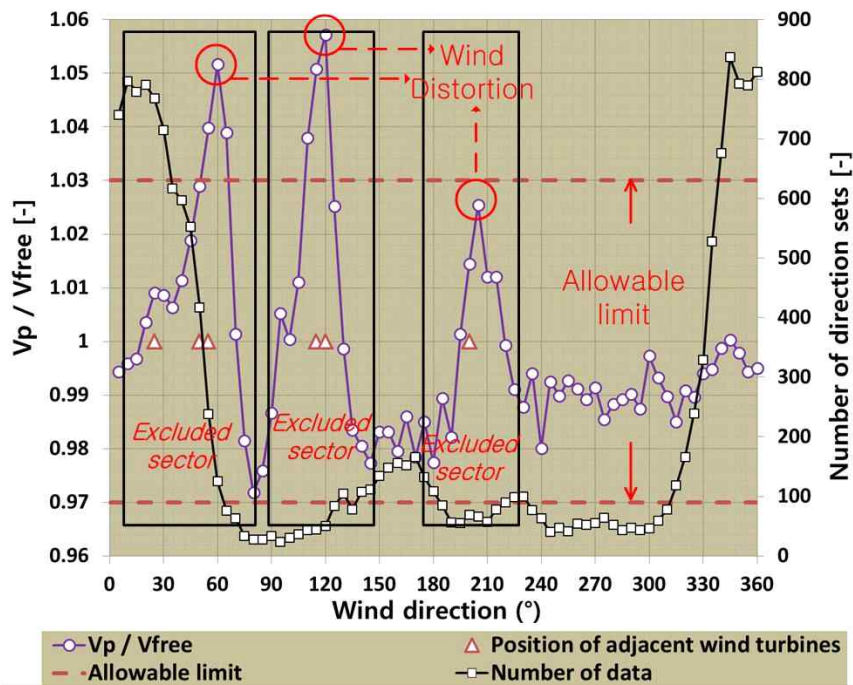


Fig. 18 Self-consistency check for No.9 WTG

는 Fig. 19 와 같이 나셀 출력곡선에서 출력 값을 역으로 적용하여 계산해 낸 풍속이다. V_{rec} 는 나셀 변환함수로 보정한 나셀 풍속이다.

유동왜곡이 없다면 이상적으로는 V_p 와 V_{free} 가 일치해야 한다.

No.9 WTG로부터 인근 터빈이 위치한 풍향인 50°, 120°, 200°에서 V_p 와 V_{free} 의 비율이 매우 높다. 배제 방위구간을 제외한 측정 방위구간에서는 V_p 와 V_{free} 의 비율이 기준 0.97~1.03 이내에 있기 때문에 유동왜곡이 없는 것으로 판단한다.

Albers et. al.[19]의 논문에서 후류 범위 안에서 V_{rec} 와 V_{rec} 의 차이 발생원인을 다음과 같이 설명한다. 인근에 풍력터빈이 위치할 경우 후류 효과를 발생시키고 풍속을 저감시킨다. 후류의 효과는 회전면적의 중심에서 가장 크게 나타나기 때문에 후단에 위치한 풍력터빈 회전면적의 중심에 있는 나셀 풍속계에서 측정된 바람은 큰 영향을 받게 된다. 반면 V_p 는 회전 경계를 포함한 로터 회전면적 전체로 들어오는 풍속을 대변하기 때문에 나셀에서 측정된 풍속보다 풍속 저감이 작다.

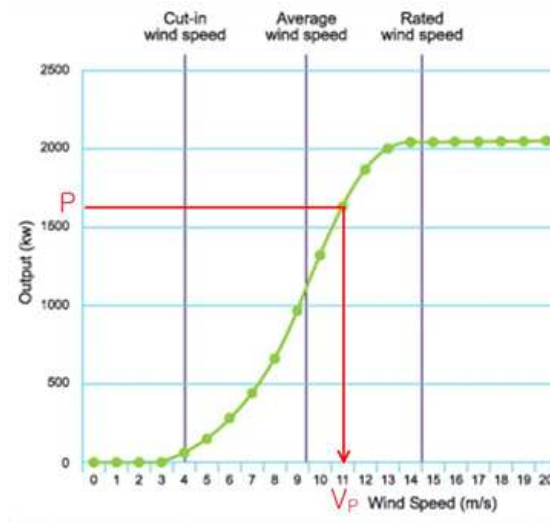


Fig. 19 Calculation of V_p from power output

(3) 최종 측정 방위구간

Self-consistency check 결과에 따라서 IEC 61400-12-1 Annex A에 의해 계산한 이론적 측정 방위구간은 유동왜곡이 없음을 확인하였다. 하지만 측정 방위구간에서 지형의 오르막 또는 내리막 경사신호가 혼재할 경우 나셀 변환함수의 불확도가 증가하기 때문에 측정 방위구간 중 해상 구간인 $227^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 를 제외한 구간은 배제하였다.

또한 나셀 풍향은 yaw 각도의 불확도 나셀 풍향계의 불확도가 내재하기 때문에 절대풍향의 1σ (표준편차) 값을 10° 로 설정하고 측정 방위구간의 상하 양단에서 감소시켰다. 따라서 최종 측정 방위구간을 $238^{\circ} \sim 353^{\circ}$ 으로 확정하여 최종 방위구간에서 유입되는 풍속만을 나셀 출력곡선의 자료로 사용하였다.

3) 나셀 출력곡선

(1) 출력 분포도(power scatter plots)[20]

Fig. 21 은 측정 방위구간에서 측정된 풍속에 대응하는 출력의 분포도(scatter plots)을 보여준다. 풍속은 표준공기밀도로 표준화하였으며 풍속의 증가에 따라 출력의 최소값, 최대값, 표준편차, 평균값의 변화를 알 수 있다. Table 13 은 출력곡선 도출을 위한 Database의 최소 요구조건과 충족 여부를 나타내었다.

출력의 분포도를 통해서 심각한 시그널 노이즈(signal noise) 및 설치 장비로 인한 영향이 없음을 확인할 수 있었다. 데이터 필터링 과정도 문제없이 수행되었음을 알 수 있다.

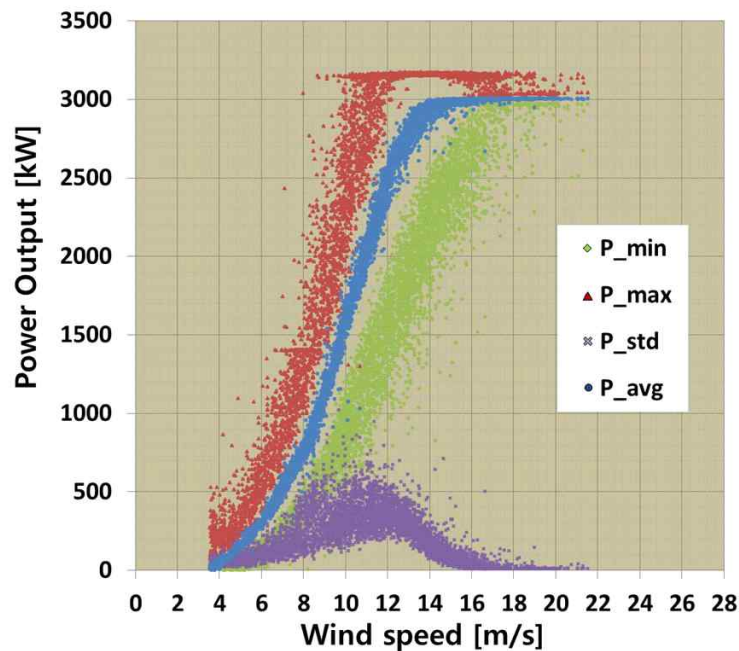


Fig. 20 Power scatter plots of No.9 WTG

Table 13 Database for NPC

Item	Requirements	Database
Wind speed range of database	Cut-in to 1.5 times the wind speed at 85% of the rated power of the wind turbine(=3.5m/s~18m/s)	3.5m/s ~ 21.0m/s
The times of sampled data in each bin	More than 30 minutes	More than 40 minutes
The times of whole sampled database	More than 180 hours	905 hours

(2) 나셀 출력곡선

Fig. 22은 출력분포도에 나타난 풍속과 출력자료를 이용하여 도출한 나셀 출력 곡선(NPC_No.9)과 출력계수(_No.9)를 나타낸다. 바람이 가진 에너지 중 터빈이 출력한 에너지를 나타내는 출력 계수(power coefficient, C_p)는 식(10)과 같이 계산한다. 제조사에서 제공하는 제시 출력곡선(Manufacturer PC)과 출력계수(C_p Manufacturer)가 비교를 위해 표시되었다.

$$C_p = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (10)$$

여기서,

$C_{p,i}$: i번째 bin의 출력계수(power coefficient)

V_i : i번째 bin의 표준화된 평균 풍속[m/s]

P_i : i번째 bin의 표준화된 평균 출력[kW]

A : 로터의 회전 면적[m²]

ρ_0 : 표준공기밀도[kg/m³]

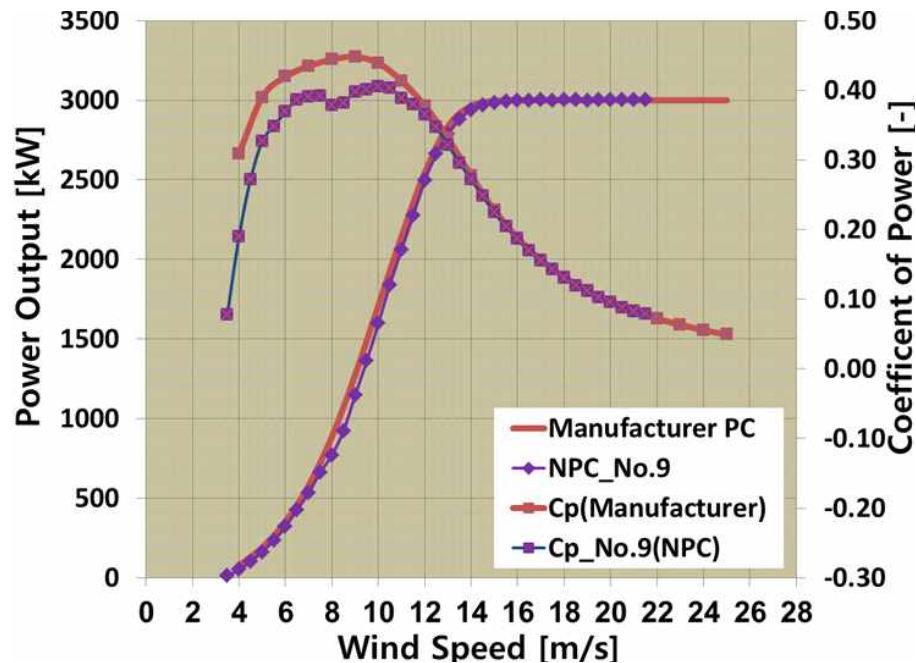


Fig. 21 NPC of No.9 WTG and power curve of the manufacturer

Table 14는 풍속 빈별 평균 풍속, 출력, 데이터 수, A형 표준불확도, B형 표준 불확도, 합성표준불확도를 정량적으로 나타내었다.

Table 14 Combined uncertainties (No.9 WTG)

Bin no. i	Power curve			Category A uncertainty s_i [kW]	Category B uncertainty u_i [kW]	Combined uncertainty $u_{c,i}$ [kW]
	Wind speed V_i [m/s]	Electric power P_i [kW]	No. of data set			
7	3.68	15.2	69	1.32	18.57	18.61
8	4.09	50.5	143	1.76	36.69	36.73
9	4.58	101.9	125	1.59	44.02	44.05
10	5.04	162.9	135	2.33	55.77	55.82
11	5.58	235.7	113	2.68	59.02	59.08
12	6.06	320.8	135	3.41	77.96	78.03
13	6.57	428.1	135	3.98	96.50	96.59
14	7.05	534.2	153	4.27	105.99	106.08
15	7.57	662.4	203	3.60	122.54	122.59
16	8.06	771.3	183	4.92	114.99	115.10
17	8.53	923.5	183	6.58	171.45	171.58
18	9.05	1145.7	199	6.94	232.78	232.89
19	9.56	1362.9	207	7.50	240.42	240.54
20	10.04	1597.6	269	6.48	284.77	284.84
21	10.54	1841.0	225	7.48	295.10	295.20
22	11.08	2061.7	247	7.08	263.27	263.37
23	11.54	2276.0	237	7.45	302.55	302.64
24	12.06	2495.1	276	6.24	290.64	290.71
25	12.54	2663.2	228	5.12	252.26	252.31
26	13.05	2786.7	313	4.22	192.56	192.61
27	13.57	2879.3	277	3.36	159.82	159.85
28	14.05	2936.5	275	2.55	132.07	132.09
29	14.53	2966.5	225	2.22	109.43	109.45
30	15.04	2982.0	227	2.00	102.22	102.24
31	15.54	2992.1	188	1.05	100.95	100.96
32	16.04	2996.3	140	0.76	100.06	100.07
33	16.55	2995.4	98	3.42	99.81	99.87
34	17.05	3000.2	71	0.40	100.31	100.31
35	17.53	2998.4	45	1.25	99.95	99.96
36	18.08	3000.4	19	0.51	100.01	100.02
37	18.62	3001.2	30	0.12	99.99	99.99
38	19.03	2998.6	22	2.54	100.08	100.11
39	19.55	3001.4	10	0.06	100.13	100.13
40	20.02	3001.4	14	0.06	99.99	99.99
41	20.60	3001.1	4	0.27	99.98	99.98
42	21.10	3000.9	4	0.55	99.98	99.98

(3) No.9 WTG 나셀 출력곡선 불확도

Fig. 23 은 No.9 WTG 평가 대상 풍력터빈의 표준합성불확도를 풍속별로 나타내었고 Fig. 24 은 표준합성불확도를 삽입한 나셀 출력곡선이다. 불확도 구성요소와 계산 과정은 4장에서 자세히 설명하였다.

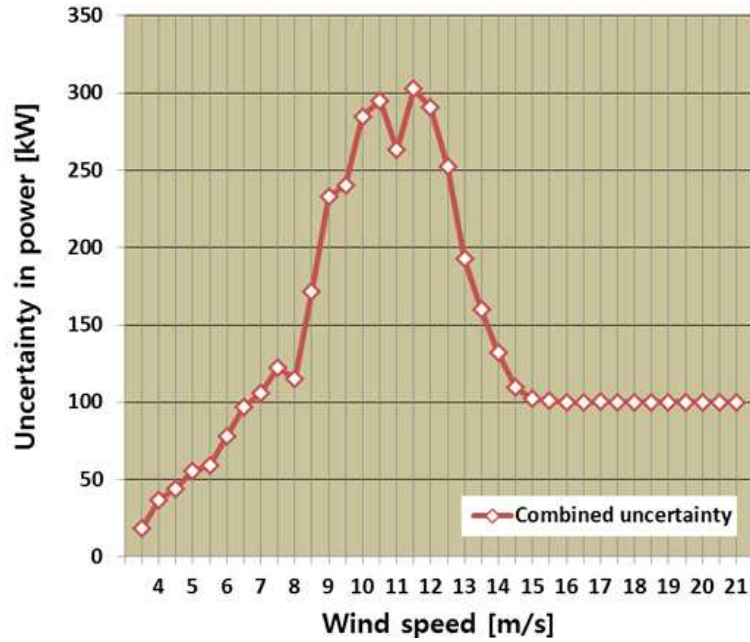


Fig. 22 Uncertainty in power

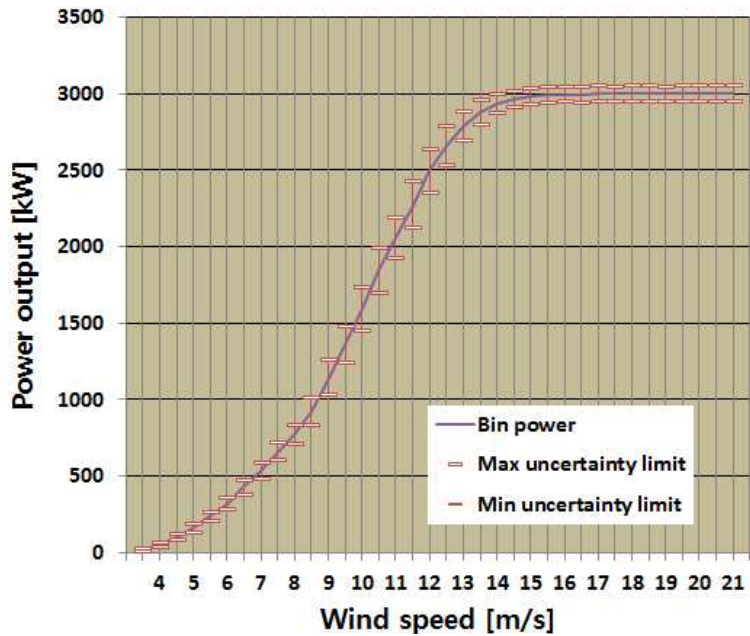


Fig. 23 Uncertainty range on power curve

(4) 제조사 출력곡선 비교

Table 15 는 제조사가 제시한 출력곡선 대비 나셀 출력곡선의 성능비를 보여 준다. 15m/s 정격풍속 이전 범위에서 나셀 출력곡선이 제조사 출력곡선에 약간 미치지 못하고 있다. 실제로 풍력터빈 성능저하가 있을 수도 있지만 두 출력곡선의 빈 별 출력 차이가 합성 표준불확도 범위안에 있으므로 출력곡선 측정시에 발생하는 난류강도에 의한 영향[21], 풍속계의 성능 등의 불확도 요소를 고려했을 때 제시곡선과 출력곡선은 전체 측정 풍속구간에서 잘 일치한다고 판단할 수 있다. 또한 저풍속 구간에서는 출력 자체가 낮기 때문에 시험 출력과 제시 출력간의 차이는 풍력 터빈 성능의 큰 문제는 아닌 것으로 판단할 수 있다.

Table 15 Power performance result of test

Wind Speed [m/s]	Power [kW]			Coefficient [-]		
	(a)	(b)	(b)/(a) ×100[%]	(a)	(b)	(b)/(a) ×100[%]
4	77	51	66	0.309	0.190	61
5	190	163	86	0.390	0.327	84
6	353	321	91	0.419	0.369	88
7	581	534	92	0.435	0.391	90
8	886	771	87	0.444	0.378	85
9	1273	1146	90	0.448	0.397	89
10	1710	1598	93	0.439	0.405	92
11	2145	2062	96	0.414	0.389	94
12	2544	2495	98	0.378	0.365	97
13	2837	2787	98	0.331	0.322	97
14	2965	2937	99	0.277	0.272	98
15	2995	2982	100	0.228	0.225	99
16	3000	2996	100	0.188	0.186	99
17	3000	3000	100	0.157	0.155	99
18	3000	3000	100	0.132	0.130	99
19	3000	2999	100	0.112	0.112	99
20	3000	3001	100	0.096	0.096	100

* (a) Manufacturer Power Curve

(b) V90_No.9 Nacelle Power Curve

* Reference air density : 1.225kg/m³

Swept area : 6,362m²

4) AEP 예측량을 이용한 나셀 출력곡선 검증

(1) 풍속의 레일리 확률분포(Rayleigh probability distribution) 가정

테스트 사이트에서 풍속의 레일리 분포를 가정하여 허브 높이에서의 연간 평균 풍속이 각 4~11m/s 일 때 연간에너지생산량(AEP)을 예측하였다. Table 16에서 AEP-measured 는 측정 자료를 통해 구해낸 No.9 WTG의 나셀 출력곡선을 적용하여 예측한 AEP이다. 측정된 나셀 출력곡선은 시동풍속부터 21 m/s까지 구해졌으며 21 m/s 이후부터 종단 풍속인 25m/s까지는 출력을 0으로 가정하여 계산하였다. AEP-extrapolated는 측정된 나셀 출력곡선의 마지막 풍속 Bin인 21 m/s에서의 출력이 종단풍속까지 일정하다고 가정하여 계산하였다. 허브 높이에서의 연간 평균 풍속이 높아질수록 AEP-measured와 AEP-extrapolated의 값의 차이가 증가하여 AEP-measured가 AEP-extrapolated의 95% 이하로 내려갔을 때 “incomplete” 표기를 하였다.

AEP-measured가 증가할수록 AEP 표준불확도는 증가하는 반면 AEP에서 표준불확도 수치가 차지하는 비율은 감소한다. 이유는 고풍속 영역(6m/s~13m/s)의 확률분포가 증가할 때 A형 표준불확도와 B형 표준불확도의 증가비율이 출력의 증가비율보다 작기 때문이다.

Table 16 Estimated annual energy production

Hub height annual average wind speed (Rayleigh) [m/s]	AEP - measured (measured power curve) [MWh]	Standard uncertainty in AEP [MWh]	Standard uncertainty in AEP [%]	AEP - extrapolated (extrapolated power curve) [MWh]	AEP-measured and AEP-extrapolated ratio
4	1459	353	24.2	1459	1.00
5	2995	587	19.6	2995	1.00
6	4966	812	16.4	4967	1.00
7	7109	987	13.9	7131	1.00
8	9155	1102	12.0	9260	0.99
9	10894	1163	10.7	11198	0.97
10	12211	1182	9.7	12840	0.95
11	13085	1170	8.9	14132	0.93(incomplete)

Estimated annual energy production

Turbine : type = WindTurbine + nacelle anemometr TF, location = IEC PT-12-2

Reference air density : 1.225 kg/m³

Cur-out wind speed : 25 m/s

(extrapolation by constant power from last bin)

연간에너지생산량(AEP)의 표준 불확도는 식(11)과 같이 계산하였다.

$$EP = \sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2 \quad (11)$$

여기서

s_i : i번째 빈의 A형 불확도

u_i : i번째 빈의 B형 불확도

f_i : i번째 빈의 풍속 평균 레일리 확률 분포
 $= ((F_{i+1} - F_i) + (F_i - F_{i-1}))/2$

F_i : i번째 빈의 풍속 레일리 누적 확률 분포

A형 불확도와 B형 불확도의 계산은 4장에서 자세하게 설명하였다.

Fig. 25은 연간 평균 풍속이 각각 4~11m/s 일 때 연간에너지 생산량과 표준 불확도의 범위를 보여준다.

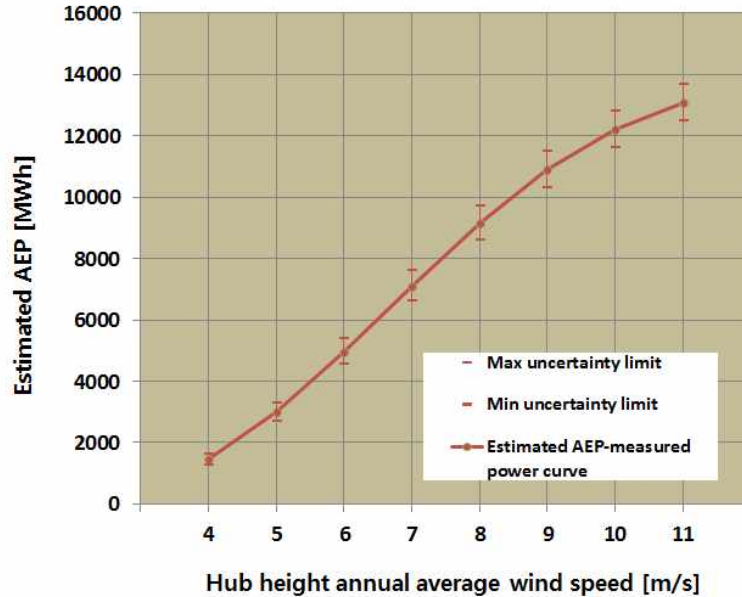


Fig. 24 Uncertainty in annual energy production

Table 17 은 출력성능평가 기간인 6개월을 포함한 허브 높이 met-mast에서 측정된 연간 평균 풍속을 이용하여 레일리 분포 가정하에서 연간에너지생산량(AEP)과 No.9 WTG에서 같은 기간 생산된 실제 에너지 생산량을 비교하였다. 나셀 출력곡선으로 산출한 AEP와 실제 생산된 에너지의 비율은 98.6%로 상당한 일치를 보이고 있다. Fig. 26에서 실제 연간에너지생산량(AEP)의 위치가 예측 연간에너지생산량(AEP)의 경향에 맞게 나타남으로서 도출한 나셀 출력곡선이 실제 풍력터빈의 성능을 잘 대변하고 있다고 판단할 수 있다.

Table 17 Rayleigh distribution AEP against actual AEP

	Rayleigh distribution	Actual data	Ratio [%]
Hub height annual Ave. WS [m/s]	7.47	7.47	100
AEP [MWh]	8104	8212	98.6
Average air density [kg/m ³]	1.225	1.227	99.8

* Actual data measured period : 2009.2.16. ~2010.2.17

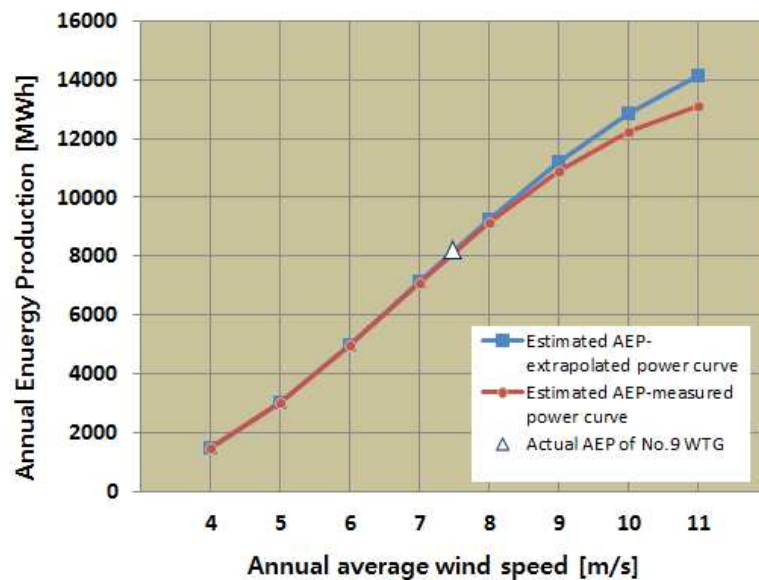


Fig. 25 Estimated AEP and actual AEP

단, 실제 측정된 met-mast 풍속과 No.9 WTG의 출력은 인근 풍력발전기로부터 후류의 영향을 받았지만 이를 고려하지 않고 단순 비교하였다. 또 실제 출력은 표준공기밀도가 아닌 사이트의 공기밀도하에서 계산되어진 것이다. 하지만 Fig. 27 과 같이 상용 소프트웨어 Windographer로 그려낸 met-mast와 No.9 WTG의 주풍향은 북북서, 북, 북북동, 방향으로 주풍향에서는 인근 풍력터빈이 위치하지 않아 후류의 영향이 미비하다고 판단할 수 있고 사이트의 공기밀도는 표준공기밀도와 무시할 수 있을 정도의 차이로 측정되었다. 따라서 위 비교의 방법이 경향성을 판단하는 자료로 사용이 가능하다고 판단된다.

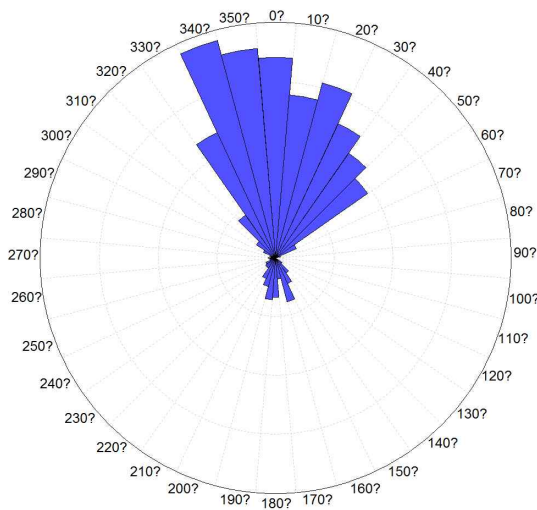


Fig. 26 Wind energy per met-mast measured direction

(2) 풍속의 와이블 확률분포(Weibull probability distribution) 가정

풍속의 와이블 확률 분포를 가정하여 연간 에너지 생산량을 예측하였다. 와이블 누적 확률 분포(Weibull cumulative probability distribution)는 식(12)와 같다.[22]

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (12)$$

여기서,

$F(V)$: 풍속의 와이블 누적확률분포함수

V : 풍속 (0.5m/s 간격)

k : 형상계수(shape factor)

c : 척도계수(scale factor)

실측한 풍속분포로부터 형상계수(shape parameter)와 척도계수(scale parameter)을 Maximum likelihood algorithm 으로 식(13)과 같이 구하였다.[23]

$$k = \frac{\left(\sum_{j=1}^N V_j^k \ln(V_j) - \sum_{j=1}^N \ln(V_j) \right)^{-1}}{\left(\sum_{j=1}^N V_j^k - N \right)} \quad (13)$$

여기서,

V_j : j번째 데이터의 풍속

N : 데이터의 총 수

형상계수 k 값이 구해지면 척도계수 c 값은 식(14)와 같이 구한다.

$$c = \left(\frac{\sum_{j=1}^N V_j^k}{N} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (14)$$

Fig. 28 은 실측한 기간 동안의 풍속 분포를 막대 그래프로 나타내었고 구한 형상계수와 척도계수를 근거로 한 풍속의 와이블 확률 분포를 꺾은선형으로 나타내었다.

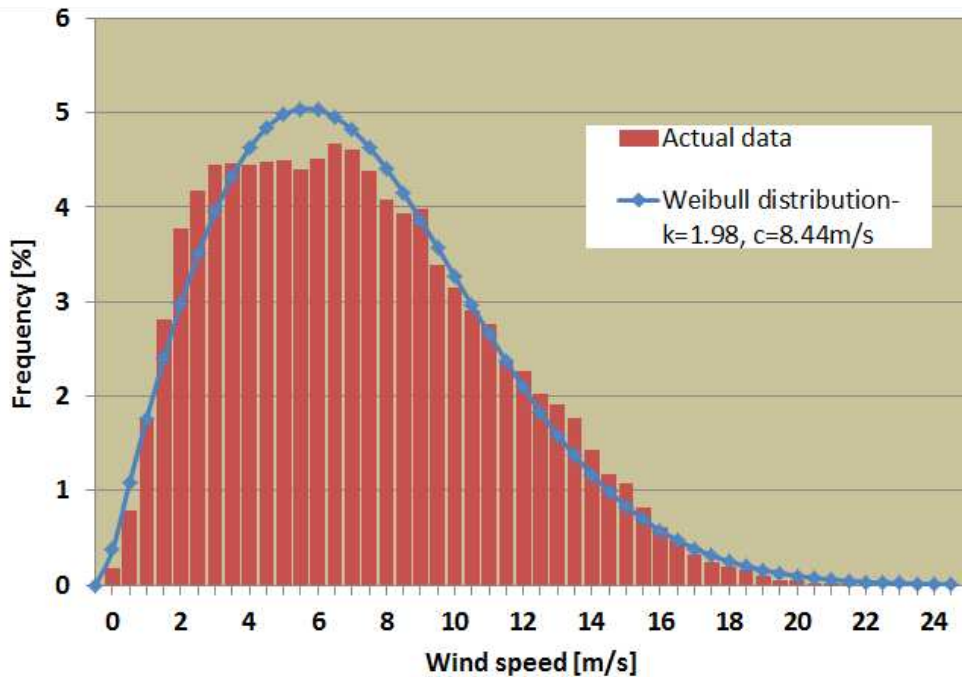


Fig. 27 Weibull distribution and actual wind distribution

Table 18과 같이 테스트 사이트에서 풍속 확률 분포를 와이블 분포로 가정하였을 때 No.9 WTG의 연간 에너지 생산량은 8,124MWh 로 No.9 WTG의 실제 발전량에 98.8% 수준이다. 레일리 분포를 가정했을 때보다 0.2% 더 근사한 수치를 보였다.

Table 18 Weibull distribution AEP against actual AEP

	Weibull distribution k=1.98, c=8.44	Actual value	Ratio [%]
Annual hub height Ave. WS [m/s]	7.47	7.47	100
AEP [MWh]	8,124	8,212	98.9
Average air density [kg/m ³]	1.225	1.227	99.8

Actual data measured period : 2009.2.6 ~ 2010.2.5

IV. 불확도

1. 불확도 이론적 배경[24][25]

1) 불확도 (Uncertainty)

측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정된 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터이다. 즉 참값이 존재하는 범위를 나타낸 추정값이다.

2) 불확도의 A형 평가 (Type A uncertainty)

일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법이다. 정규확률분포를 가정한다. 시험표준편차 (experimental standard deviation)는 같은 측정량에 대한 일련의 n 회 측정에서, 결과의 분산의 특성을 나타내는 양 $s(q_k)$ 이며 다음과 같이 주어진다.

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (15)$$

q_k 는 k 번째 측정의 결과이며, \bar{q} 는 n 회 측정한 결과의 산술평균이다.

3) 불확도의 B형 평가 (Type B uncertainty)

일련의 관측값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 불확도를 구하는 방법이다.

(1) 대칭직사각형 확률분포

입력량 X_i 에 대해 상한(a_+)과 하한(a_-)만 추정 가능한 경우

X_i 값이 a_+ 와 a_- 구간에 있을 확률이 1이고 밖에 있을 확률이 0인 경우

상한과 하한사이에서의 확률은 동일

X_i 의 기대값 x_i 는 $x_i = (a_+ + a_-)/2$

관련된 분산은 $u^2(x_i) = (a_+ - a_-)^2/12$

표준불확도는 $u(x_i) = a/\sqrt{3}$, $a = (a_+ - a_-)/2$

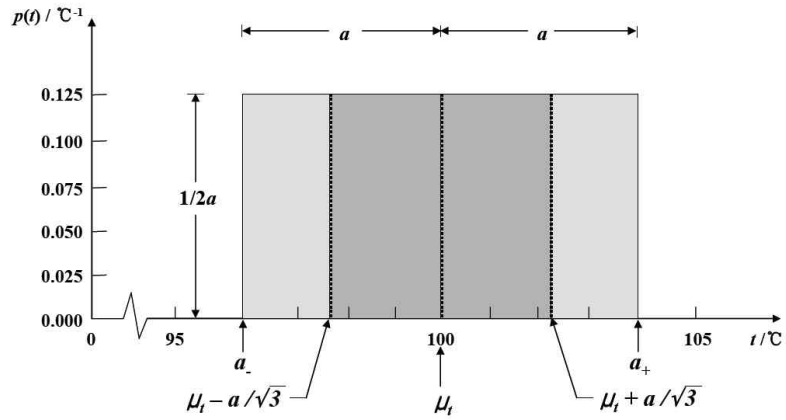


Fig. 28 Rectangular distribution

(2) 대칭삼각형 확률분포

입력량 X_i 에 대해 상한(a_+)과 하한(a_-)만 추정 가능한 경우

구간내의 X_i 값이 한계값 근처보다 중앙값 근처에서 확률이 높은 경우

X_i 의 기대값 x_i 는 $x_i = (a_+ + a_-)/2$

관련된 분산은 $u^2(x_i) = a^2/6$, $a = (a_+ - a_-)/2$

표준불확도는 $u(x_i) = a/\sqrt{6}$

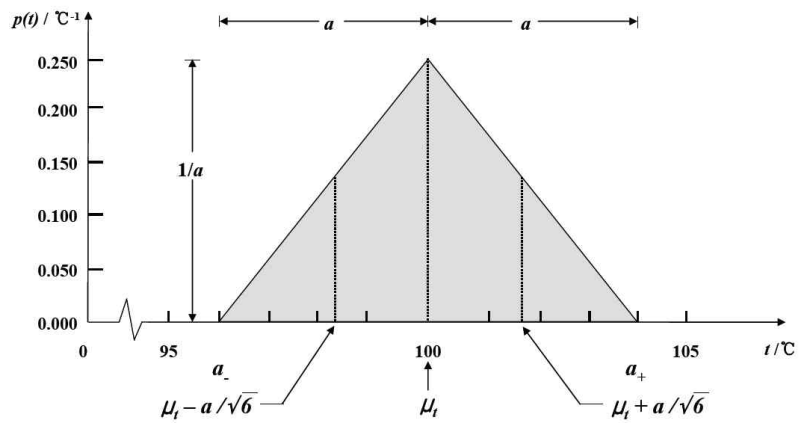


Fig. 29 Triangular distribution

4) 합성표준불확도 (Combined standard uncertainty)

측정량의 추정값 는 입력량의 추정값 x_1, x_2, \dots, x_n 들의 함수로 표현되기 때문에, y 의 표준불확도는 x_i 의 표준불확도를 적절한 방법으로 합성하여 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 측정량의 추정값 y 의 표준불확도를 합성표준불확도라고 부르고 $u_c(y)$ 로 표현한다. 따라서 합성표준 불확도 $u_c(y)$ 는 측정량의 추정값인 y 에 대한 추정 표준편차이다.

5) 확장불확도 (Expanded uncertainty)

측정결과의 불확도를 표현하는데 보편적으로 합성표준불확도 $u_c(y)$ 를 사용할 수 있지만 상업이나 산업 분야의 특정한 경우, 또는 규제에 적용할 경우, 보건과 안전에 관련될 경우에는 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간을 정의해 줄 수 있는 불확도의 척도가 종종 필요하다. 확장불확도 는 합성표준불확도 $u_c(y)$ 에 Table 19 와 같이 포함인자(Coverage factor) k 를 곱하여 결정된다. Fig. 31 과 같이 포함 인자에 따라 불확도의 확률분포의 넓이가 달라지며 신뢰의 수준(Level of confidence)이 달라진다. 따라서 본 테스트에서 제시한 합성표준불확도는 신뢰도가 68.27% 수준이며 95.45% 신뢰도를 갖기 위해서는 불확도 수치를 2배, 99.73% 신뢰도를 얻기 위해서는 3배 높여주어야 한다.

$$U = k u_c(y) \quad (16)$$

Table 19 Expanded uncertainty

Level of confidence[%]	Coverage factor
68.27	1
90	1.645
95	1.960
95.45	2
99	2.576
99.73	3

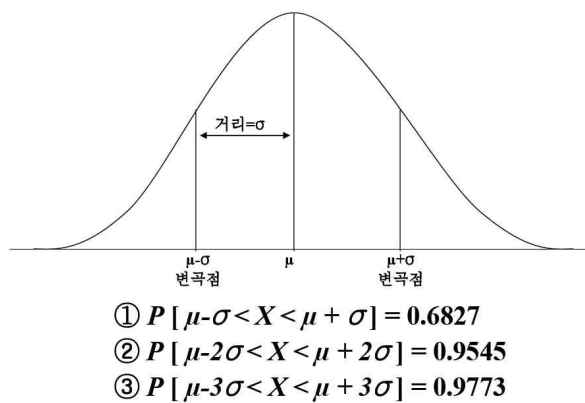


Fig. 30 Normal distribution probability density

2. 나셀 출력곡선 불확도 구성요소[26]

IEC 61400-12-2에 근거한 나셀 출력곡선의 불확도 요소에 대한 설명과 본 평가에 적용한 값에 대하여 설명하였다.

1) 나셀 변환함수(NTF)

나셀 변환함수의 의한 불확도는 나셀 출력곡선의 나셀 풍속 측정불확도 중 하나의 요소이다. Table 20 는 나셀 변환함수의 불확도 구성요소이며 Table 21 은 계산결과이다.

Table 20 Estimates for uncertainty components from NTF measurement

	Source	Uncertainty component		contribution factor without site calibration	
		symbol	Estimate of magnitude	symbol	Estimate of magnitude
Free stream wind speed Category B Instrument	Anemometer calibration	$s_{,i}$	0.1m/s	f_{S1}	1
	* Standard : IEC 61400-12-1:2005				
	operational characteristics	$u_{FS2,i}$	class 1.9A k = 1.9	I_{FS2}	1
		* Standard : IEC 61400-12-1:2005 Cup anemometer : Risoe P2546A Assuming rectangular uncertainty distribution $U_{FS2,i} = (0.05m/s + 0.005 U_i) \times k / 3$			
	Mounting effects	$u_{FS3,i}$	1.0%	I_{FS3}	1
		* Mast design according to IEC 61400-12-1 = minimal distortion			
Flow distortion due to terrain	$u_{FS4,i}$	2.0%	I_{FS4}	1	
	* no site calibration undertaken * $L \leq 3D$				
Data acquisition system	$u_{FS5,i}$	0.03m/s	I_{FS5}	1	
	* 0.1% uncertainty of the full range of 30m/s of the measurement channel				
Nacelle wind speed Category B Instrument	Anemometer calibration uncertainty due to wind speed	$u_{N1,i}$	0.15m/s	I_{N1}	1
		* Standard : IEC 61400-12-2:2013 Annex D			
	Anemometer calibration uncertainty due to wind direction	$u_{N2,i}$	1.0%	I_{N2}	1
		* Nacelle wind sensor : FT702 sonic anemometer			
Operational characteristics	$u_{N3,i}$	class 4A k = 4	I_{N3}	1	
	* The nacelle sensor is not classified as per IEC 61400-12-1 and conservative estimate was used.				
Mounting effects	$u_{N4,i}$	2.0%	I_{N4}	1	

	Source	Uncertainty component		contribution factor without site calibration	
		symbol	Estimate of magnitude	symbol	Estimate of magnitude
	Data acquisition system	* Preferred method nacelle instrument mounting : IEC 61400-12-2 Annex A			
		i	0.03m/s	dN	1
		* 0.1% uncertainty of the full range of 30m/s of the measurement channel			
Method Category B	Seasonal variation	$u_{M2,i}$	2.0%	I_{M2}	1
		* A NTF measured at different times of the year using same equipment will give different results.			
Statistical Category A	Statistical uncertainty in captured dataset	$s_{NTF,i}$	TF,i	n.a.	n.a.
		* $\sigma_{NTF,i}$ is the standard deviation of the nacelle wind speed corrected by NTF N_i is the number of 10min data sets in bin i .			

Met-mast에서 측정된 풍속의 불확도는 아래 식과 같다.

$$u_{FS,i} = \sqrt{I_{FS1}^2 u_{FS1,i}^2 + I_{FS2}^2 u_{FS2,i}^2 + I_{FS3}^2 u_{FS3,i}^2 + I_{FS4}^2 u_{FS4,i}^2 + I_{dFS}^2 u_{dFS,i}^2}$$

$$u_{FS,i} = \sqrt{(1)^2(0.1)^2 + (1)^2(0.054m/s + 0.0054 \times V_i[m/s])^2 + (1)^2(0.01 \times V_i[m/s])^2 + (1)^2(0.02 \times V_i[m/s])^2 + (1)^2(0.03m/s)^2}$$

Met-mast와 2.5D 떨어진 No.6 WTG 에서 측정된 나셀풍속의 불확도는 아래 식과 같다.

$$u_{N,i} = \sqrt{I_{N1}^2 u_{N1,i}^2 + I_{N2}^2 u_{N2,i}^2 + I_{N3}^2 u_{N3,i}^2 + I_{N4}^2 u_{N4,i}^2 + I_{dN}^2 u_{dN,i}^2}$$

$$u_{N,i} = \sqrt{(1)^2(0.15)^2 + (1)^2(0.01 \times V_i[m/s])^2 + (1)^2(0.1155m/s + 0.01155 \times V_i[m/s])^2 + (1)^2(0.02 \times V_i[m/s])^2 + (1)^2(0.03m/s)^2}$$

계절적 변동에 따른 불확도는 아래와 같다.

$$u_{M,NTF,i} = \sqrt{I_{M2}^2 u_{M2,i}^2}$$

$$u_{M,NTF,i} = \sqrt{(1)^2(0.02 \times V_i[m/s])^2}$$

측정된 나셀 풍속의 A형 불확도까지 포함하여 합성한 불확도는 아래와 같고 아래 결과는 나셀 출력곡선의 풍속 불확도의 한 요소로 삽입된다.

$$u_{V6,i} = \sqrt{u_{FS,i}^2 + u_{N,i}^2 + u_{M,NTF,i}^2 + u_{NTF,i}^2}$$

Table 21 Uncertainties from NTF (No.6 WTG)

Bin no. i	Wind speed V_i [m/s]	Category B			Category A	
		s_i	$u_{N,i}$	$u_{M,NTF,i}$	$s_{NTF,i}$	$u_{16,i}$
7	3.70	0.1524	0.2351	0.0740	0.0171	0.2903
8	4.11	0.1586	0.2417	0.0822	0.0127	0.3008
9	4.60	0.1663	0.2498	0.0919	0.0149	0.3142
10	5.07	0.1742	0.2579	0.1013	0.0161	0.3277
11	5.53	0.1823	0.2662	0.1106	0.0196	0.3417
12	6.09	0.1924	0.2766	0.1219	0.0150	0.3586
13	6.57	0.2011	0.2856	0.1313	0.0117	0.3734
14	7.06	0.2105	0.2952	0.1412	0.0133	0.3893
15	7.56	0.2202	0.3052	0.1513	0.0129	0.4058
16	8.05	0.2297	0.3150	0.1609	0.0142	0.4220
17	8.53	0.2393	0.3249	0.1705	0.0147	0.4383
18	9.04	0.2496	0.3355	0.1807	0.0128	0.4557
19	9.55	0.2600	0.3463	0.1910	0.0120	0.4735
20	10.04	0.2702	0.3569	0.2008	0.0129	0.4907
21	10.54	0.2806	0.3677	0.2108	0.0149	0.5085
22	11.06	0.2915	0.3790	0.2211	0.0155	0.5270
23	11.54	0.3017	0.3898	0.2309	0.0159	0.5445
24	12.05	0.3125	0.4011	0.2410	0.0159	0.5629
25	12.55	0.3232	0.4122	0.2510	0.0150	0.5810
26	13.06	0.3342	0.4238	0.2612	0.0171	0.5999
27	13.56	0.3450	0.4352	0.2712	0.0168	0.6182
28	14.05	0.3556	0.4464	0.2810	0.0188	0.6364
29	14.55	0.3664	0.4578	0.2909	0.0209	0.6549
30	15.05	0.3774	0.4694	0.3009	0.0243	0.6737
31	15.54	0.3882	0.4809	0.3109	0.0219	0.6921
32	16.06	0.3996	0.4929	0.3212	0.0284	0.7117
33	16.54	0.4102	0.5042	0.3308	0.0285	0.7299
34	17.01	0.4205	0.5151	0.3402	0.0333	0.7476
35	17.52	0.4318	0.5272	0.3504	0.0335	0.7670
36	18.01	0.4426	0.5387	0.3601	0.0630	0.7872
37	18.53	0.4542	0.5511	0.3706	0.0695	0.8075
38	18.98	0.4643	0.5618	0.3796	0.0641	0.8242
39	19.55	0.4770	0.5754	0.3910	0.0702	0.8464
40	20.02	0.4875	0.5866	0.4005	0.1170	0.8694
41	20.64	0.5014	0.6015	0.4129	0.1602	0.8996
42	21.25	0.5149	0.6159	0.4250	0.1871	0.9274

2) 나셀 출력곡선(NPC)

나셀 출력곡선 불확도 구성요소 중 B형 불확도는 출력 측정(Power output), NTF로 보정된 나셀 풍속(Nacelle wind speed), 공기밀도(Air density), Method가 있고 A형 불확도는 통계적 출력 표준편차(Statistical)가 있다. Table 22은 나셀 출력곡선의 불확도 구성요소에 대한 설명과 계산 적용값을 보여준다.

Table 22 Estimates for uncertainty components from NPC measurement

	Source	Uncertainty component		contribution factor without site calibration	
		symbol	Estimate of magnitude	symbol	Estimate of magnitude
Power output $i = 1$ Category B Instrument	Current transformers	$_{,i}$	0.35%	I_{P1}	1
		* Standard : IEC 61869-2[27] * Class 0.2 at 20% load * Assuming rectangular uncertainty distribution			
	Voltage transformers	$u_{P2,i}$	0.2%	I_{P2}	1
		* Standard : IEC 61869-3[28] * Class 0.2 * Assuming rectangular uncertainty distribution			
	Power transducer or power measurement device	$u_{P3,i}$	0.5%	I_{P3}	1
* Standard : IEC 60688[29] * Class 0.5 : uncertainty limit is 1/200 of 200% nominal power = 30kW * Assuming rectangular uncertainty distribution					
Data acquisition system	$u_{dP,i}$	0.1%	I_{dP}	1	
		* 0.1% uncertainty of the full range measurement range of 6500kW			
Nacelle wind speed $c_{V,i} = \frac{P_i - P_{i-1}}{V_{i-1}}$ Category B Instrument	Anemometer calibration due to WS	$u_{V1,i}$	0.15m/s	I_{V1}	1
		* Standard : IEC 61400-12-2:2013 Annex D			
	Anemometer calibration due to WD	$u_{V2,i}$	1.0%	I_{V2}	1
		* Nacelle wind sensor : FT702 sonic anemometer			
	Operational characteristics	$u_{V3,i}$	class 4A k = 4	I_{V3}	0.7
* The nacelle sensor is not classified as per IEC 61400-12-1 and conservative estimate was used.					
Mounting effects	$u_{V4,i}$	2.0%	I_{N4}	0.7	
	* Preferred method nacelle instrument mounting : IEC 61400-12-2 Annex A				
Flow distortion due to terrain	$u_{V5,i}$	1.0%	I_{V5}	1	
	* NTF terrain class : 1, NPC terrain class : 1				
NTF	$u_{V6,i}$	Table 47	I_{V6}	n.a.	
	* $u_{V6,i} = u_{FS,i}^2 + u_{N,i}^2 + u_{M,NTF,i}^2 + s_{NTF,i}^2$				
Data acquisition system	$u_{dV,i}$	0.03m/s	I_{dV}	1	
		* 0.1% uncertainty of the full range of 30m/s of the measurement channel			

	Source	Uncertainty component		contribution factor without site calibration	
		symbol	Estimate of magnitude	symbol	Estimate of magnitude
Air density $i =$ 88.15 $c_{B,i} =$ $\left \frac{P_i}{1013} \right $ Category B Instrument	Temperature sensor	$u_{T,i}$	0.5°C	I_{T1}	1
		* Standard : ISO 2533 * Standard uncertainty of the temperature sensor is assumed to be 0.5°C			
	Radiation shielding	$u_{T2,i}$	2.0°C	I_{T2}	1
		* Standard uncertainty of the radiation shielding is assumed to be 2.0°C			
	Mounting effects	$u_{T3,i}$	0.33°C	I_{T3}	1
		* Assumed to be 0.33°C when sensor is mounted within 10meter from hub height			
	Data acquisition	$u_{dT,i}$	0.04°C	I_{dT}	1
		* 0.1% uncertainty of the full measurement range of 40°C			
	Pressure sensor	$u_{B1,i}$	3.0hpa	I_{T1}	1
		* Standard : ISO 2533 * Standard uncertainty of the temperature sensor is assumed to be 3.0hpa			
Mounting effects	$u_{B2,i}$	1.89hpa	I_{T2}	1	
	* 20% correction of height difference 79m between the sensor and hub, which is 1.89hpa				
Data acquisition	$u_{dB,i}$	0.1hpa	I_{V3}	1	
	* 0.1% uncertainty of the full measurement range of 100hpa				
Method $c_{M,i} = 1$ Category B	Air density correction	$u_{MB,i}$	0.5%	$I_{M3,i}$	1
		* The air density correction captured the influence of incorrect assumption that C_p is constant over the wind speed range.			
	Dynamic power measurement	$u_{M4,i}$	1%	$I_{M4,i}$	1
		* This uncertainty captured the additional uncertainty in dynamic power			
	Seasonal variation on NPC	$u_{M5,i}$	2%	$I_{M5,i}$	1
* A power curve measured at different times of the year using same equipment will give different result.					
Variation to rotor inflow	$u_{M6,i}$	2%	$I_{M6,i}$	1	
	* This uncertainty captured variation wind distribution on rotor.				
Turbulence effect on averaging and binning	$u_{M7,i}$	1%	$I_{M7,i}$	1	
	* The method of binning includes an inaccurate estimate of average power in the bin due to turbulence.				
Statistical Category A	Variance in electrical power	$s_{P,i}$	$\sigma_{P,i}$ i	n.a	n.a
* $\sigma_{P,i}$ is the standard deviation of power value in bin i. N_i is the number of 10min data sets in bin i.					

B형 불확도 구성요소의 계산은 아래와 같다.

$$u_{P1,i} = \frac{0.0035 \times P_i [kW]}{3} \times \frac{1}{3} \times 3 = 0.002 \times P_i [kW]$$

$$u_{P2,i} = \frac{0.002 \times P_i [kW]}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{3} \times 3 = 0.0012 \times P_i [kW]$$

$$u_{P3,i} = \frac{30kW}{\sqrt{3}} = 17.3kW$$

$$u_{dP,i} = 0.001 \times 6500kW = 6.5kW$$

$$u_{P,i} = \sqrt{I_{P1}^2 u_{P1,i}^2 + I_{P2}^2 u_{P2,i}^2 + I_{P3}^2 u_{P3,i}^2 + I_{dP}^2 u_{dP,i}^2}$$

$$u_{P,i} = \sqrt{(1)^2 (0.002 \times P_i [kW])^2 + (1)^2 (0.0012 \times P_i [kW])^2 + (1)^2 (17.3kW)^2 + (1)^2 (6.5kW)^2}$$

$$u_{V,i} = \sqrt{I_{V1}^2 u_{V1,i}^2 + I_{V2}^2 u_{V2,i}^2 + I_{V3}^2 u_{V3,i}^2 + I_{V4}^2 u_{V4,i}^2 + I_{V5}^2 u_{V5,i}^2 + u_{V6,i}^2 + I_{dV}^2 u_{dV,i}^2}$$

$$u_{V,i} = \sqrt{(1)^2 (0.15)^2 + (1)^2 (0.01 \times V_i [m/s])^2 + (0.7)^2 (0.1155m/s + 0.01155 \times V_i [m/s])^2 + (1)^2 (0.01 \times V_i [m/s])^2 + (0.7)^2 (0.02 \times V_i [m/s])^2 + U_{V6,i} + (1)^2 (0.03m/s)^2}$$

$$u_{T,i} = \sqrt{I_{T1}^2 u_{T1,i}^2 + I_{T2}^2 u_{T2,i}^2 + I_{T3}^2 u_{T3,i}^2 + I_{dT}^2 u_{dT,i}^2}$$

$$u_{T,i} = \sqrt{(1)^2 (0.5K)^2 + (1)^2 (2.0K)^2 + (1)^2 (0.33K)^2 + (1)^2 (0.001 \times 40K)^2}$$

$$u_{B,i} = \sqrt{I_{B1}^2 u_{B1,i}^2 + I_{B2}^2 u_{B2,i}^2 + I_{dB}^2 u_{dB,i}^2}$$

$$u_{B,i} = \sqrt{(1)^2 (3.0hpa)^2 + (1)^2 (1.89k)^2 + (1)^2 (0.001 \times 100hpa)^2}$$

$$u_{M,i} = \sqrt{I_{M3}^2 u_{M3,i}^2 + I_{M4}^2 u_{M4,i}^2 + I_{M5}^2 u_{M5,i}^2 + I_{M6}^2 u_{M6,i}^2 + I_{M7}^2 u_{M7,i}^2 + I_{dM}^2 u_{dM,i}^2}$$

$$u_{M,i} = \sqrt{(1)^2 (0.005 \times P_i [kW])^2 + (1)^2 (0.01 \times P_i [kW])^2 + (1)^2 (0.02 \times P_i [kW])^2 + (1)^2 (0.02 \times P_i [kW])^2 + (1)^2 (0.01 \times P_i [kW])^2}$$

감도계수(sensitivity coefficient, c_i)는 입력량 변화에 대한 측정량 추정값의 변화를 나타낸다. 감도계수를 적용하여 풍속, 공기밀도의 불확도를 출력량의 불확도로 환산할 수 있다. Table 23 은 불확도 구성요소별 감도계수를 나타내었다.

감도계수를 적용하여 계산한 B형 불확도는 아래와 같다. Table 24 는 감도계수를 적용한 B형 불확도이다.

$$= u_{,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{M,i}^2 u_{M,i}^2$$

표준화된 출력의 표준편차와 A형 불확도($s_{P,i}$)의 계산은 아래와 같다.

$$\sigma_{P,i} = \frac{1}{i-1} \sum_{j=1}^N (P_i - P_{n,i,j})$$

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{N_i}$$

여기서,

$\sigma_{P,i}$ 는 i번째 bin에서 표준화된 출력의 표준편차

N_i 는 i번째 bin의 10분 평균 데이터 수

P_i 는 i번째 bin의 표준화된 출력의 평균

$P_{n,i,j}$ 는 i번째 bin의 표준화된 출력 j

$s_{P,i}$ 는 i번째 bin에서 A형 불확도

합성 불확도($u_{C,i}$)는 A형 불확도($s_{P,i}$)와 B의 불확도($u_{P,i}$)의 합성으로 아래와 같이 계산된다.

$$u_{C,i} = \sqrt{s_i^2 + u_i^2} = \sqrt{s_{P,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{M,i}^2 u_{M,i}^2}$$

Table 23 Sensitivity Factor (No.9 WTG)

Bin no. i	Power curve		Sensitivity factor		
	Wind speed [m/s]	Electric power P_i [kW]	c_i [kW/ms]	$c_{T,i}$ [kW/K]	$c_{B,i}$ [kW/hpa]
7	3.68	15.2	4.121	0.053	3.547
8	4.09	50.5	86.594	0.175	3.547
9	4.58	101.9	104.763	0.354	3.547
10	5.04	162.9	132.654	0.565	3.547
11	5.58	235.7	135.267	0.818	3.547
12	6.06	320.8	175.096	1.113	3.547
13	6.57	428.1	210.564	1.486	3.547
14	7.05	534.2	222.600	1.854	3.547
15	7.57	662.4	247.971	2.299	3.547
16	8.06	771.3	221.923	2.677	3.547
17	8.53	923.5	324.781	3.205	3.547
18	9.05	1145.7	427.311	3.976	3.547
19	9.56	1362.9	423.829	4.730	3.547
20	10.04	1597.6	485.910	5.544	3.547
21	10.54	1841.0	484.805	6.389	3.547
22	11.08	2061.7	412.347	7.155	3.547
23	11.54	2276.0	460.952	7.899	3.547
24	12.06	2495.1	424.592	8.659	3.547
25	12.54	2663.2	349.271	9.242	3.547
26	13.05	2786.7	241.938	9.671	3.547
27	13.57	2879.3	177.996	9.992	3.547
28	14.05	2936.5	120.132	10.191	3.547
29	14.53	2966.5	61.836	10.295	3.547
30	15.04	2982.0	30.733	10.349	3.547
31	15.54	2992.1	19.873	10.384	3.547
32	16.04	2996.3	8.421	10.398	3.547
33	16.55	2995.4	1.723	10.395	3.547
34	17.05	3000.2	9.755	10.412	3.547
35	17.53	2998.4	3.749	10.406	3.547
36	18.08	3000.4	3.650	10.413	3.547
37	18.62	3001.2	1.334	10.415	3.547
38	19.03	2998.6	6.259	10.406	3.547
39	19.55	3001.4	5.489	10.416	3.547
40	20.02	3001.4	0.086	10.416	3.547
41	20.60	3001.1	0.475	10.415	3.547
42	21.10	3000.9	0.394	10.414	3.547

Table 24 Category B uncertainties (No.9 WTG)

Bin no. i	Electric power i [kW]	Wind speed $u_{V,i}$ [m/s]	Wind speed $c_{V,i} \times u_{V,i}$ [kW]	Air temperature $u_{T,i}$ [K]	Air temperature $c_{T,i} \times u_{T,i}$ [kW]	Air pressure $u_{B,i}$ [hpa]	Air pressure $c_{B,i} \times u_{B,i}$ [kW]	Method $u_{M,i}$ [kW]
7	18.500	0.354	1.459	2.088	0.110	3.547	0.053	0.553
8	18.500	0.365	31.640	2.088	0.366	3.547	0.177	1.675
9	18.502	0.380	39.798	2.088	0.738	3.547	0.357	3.300
10	18.504	0.395	52.333	2.088	1.181	3.547	0.571	5.231
11	18.508	0.410	55.497	2.088	1.708	3.547	0.825	7.531
12	18.515	0.428	74.992	2.088	2.325	3.547	1.123	10.222
13	18.527	0.445	93.661	2.088	3.102	3.547	1.499	13.615
14	18.542	0.462	102.881	2.088	3.871	3.547	1.870	16.971
15	18.564	0.481	119.164	2.088	4.800	3.547	2.319	21.025
16	18.587	0.499	110.638	2.088	5.589	3.547	2.701	24.469
17	18.624	0.516	167.736	2.088	6.692	3.547	3.234	29.281
18	18.691	0.536	228.989	2.088	8.303	3.547	4.012	36.309
19	18.770	0.556	235.508	2.088	9.877	3.547	4.772	43.178
20	18.870	0.575	279.306	2.088	11.578	3.547	5.594	50.600
21	18.990	0.595	288.281	2.088	13.342	3.547	6.447	58.298
22	19.112	0.615	253.794	2.088	14.941	3.547	7.219	65.275
23	19.243	0.635	292.639	2.088	16.494	3.547	7.970	72.053
24	19.390	0.655	278.310	2.088	18.081	3.547	8.737	78.980
25	19.511	0.676	235.985	2.088	19.300	3.547	9.325	84.295
26	19.604	0.697	168.564	2.088	20.195	3.547	9.758	88.203
27	19.676	0.718	127.722	2.088	20.866	3.547	10.082	91.130
28	19.722	0.738	88.632	2.088	21.281	3.547	10.283	92.941
29	19.746	0.758	46.900	2.088	21.498	3.547	10.388	93.888
30	19.759	0.780	23.960	2.088	21.610	3.547	10.442	94.380
31	19.767	0.800	15.907	2.088	21.683	3.547	10.477	94.696
32	19.771	0.822	6.924	2.088	21.713	3.547	10.492	94.829
33	19.770	0.843	1.453	2.088	21.707	3.547	10.489	94.802
34	19.774	0.863	8.421	2.088	21.742	3.547	10.506	94.955
35	19.772	0.885	3.318	2.088	21.729	3.547	10.499	94.898
36	19.774	0.908	3.314	2.088	21.744	3.547	10.506	94.962
37	19.775	0.931	1.241	2.088	21.749	3.547	10.509	94.984
38	19.773	0.949	5.942	2.088	21.730	3.547	10.500	94.902
39	19.775	0.974	5.345	2.088	21.751	3.547	10.510	94.993
40	19.775	0.998	0.086	2.088	21.751	3.547	10.510	94.992
41	19.775	1.030	0.489	2.088	21.749	3.547	10.509	94.983
42	19.774	1.060	0.418	2.088	21.747	3.547	10.508	94.977

3. IEC 61400-12-1에 의한 불확도와 비교

본 논문 2장에서는 나셀 변환함수를 검증하기 위해 met-mast와 2.5D 거리에 있는 No.6 WTG로부터 마스트 풍속 출력곡선과 나셀 출력곡선을 도출하였다. IEC 61400-12-1 과 IEC 61400-12-2에 의한 불확도 결과를 비교하기 위해 동일한 Database를 이용하여 도출된 No.6 WTG의 두 개의 출력곡선을 이용하였다. 풍속과 출력 데이터의 수와 분산 그리고 민감계수가 거의 일치하기 때문이다. 마스트 풍속 출력곡선의 불확도는 IEC 61400-12-1에 근거하여 도출하고 나셀 출력곡선의 불확도는 IEC 61400-12-2에 근거하여 도출하였다. 그림은 각 표준에 의해 도출된 불확도를 풍속빈별로 나타내었다.

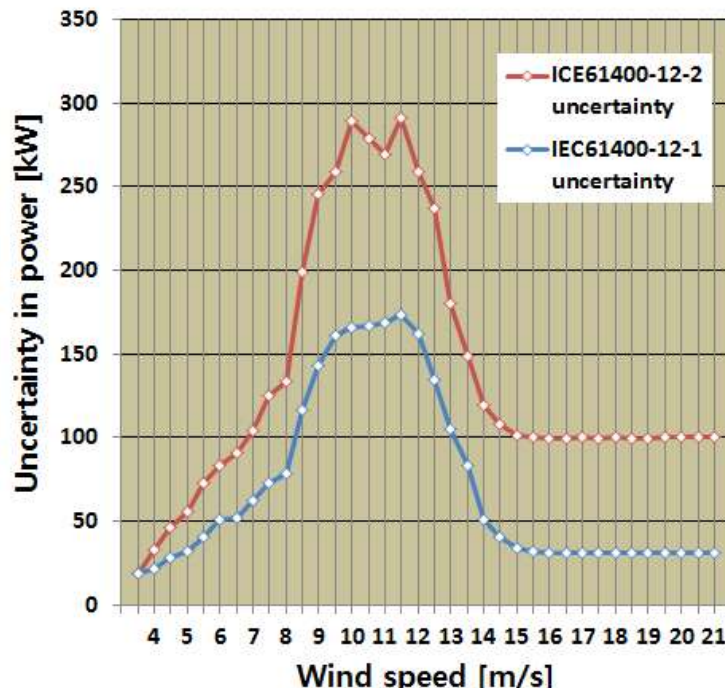


Fig. 31 Comparison of uncertainty between met-mast power curve and nacelle power curve

모든 풍속구간에서 IEC 61400-12-2에 의한 불확도가 IEC 61400-12-1에 근거한 불확도보다 크다는 것을 알 수 있다. 정량적인 수치와 비율은 Table 25에 나타내었다. 풍속이 높아질수록 두 출력곡선의 불확도 비율이 꾸준히 커지고 불확도가 가장 큰 구간에서는 1.6배 정격 풍속이 넘어서면서 최대 비율 3.2배를 유지하고 있다.

Table 25 Uncertainty difference (No.6 WTG)

Bin no. i	Wind speed V_i [m/s]	IEC61400-12-2 Standard combined uncertainty	IEC61400-12-1 Standard combined uncertainty	Ratio
7	3.5	18.8	18.7	1.01
8	4.0	32.9	21.9	1.50
9	4.5	46.6	28.4	1.64
10	5.0	55.6	32.2	1.72
11	5.5	73.1	40.7	1.80
12	6.0	83.1	50.7	1.64
13	6.5	91.0	52.0	1.75
14	7.0	104.5	62.1	1.68
15	7.5	125.0	73.0	1.71
16	8.0	133.6	79.0	1.69
17	8.5	199.6	117.0	1.71
18	9.0	245.3	143.0	1.71
19	9.5	259.4	160.8	1.61
20	10.0	289.5	166.3	1.74
21	10.5	278.7	167.1	1.67
22	11.0	269.4	168.7	1.60
23	11.5	291.5	174.0	1.68
24	12.0	258.9	162.0	1.60
25	12.5	237.6	134.2	1.77
26	13.0	179.9	105.4	1.71
27	13.5	149.3	83.3	1.79
28	14.0	119.6	50.9	2.35
29	14.5	107.7	41.1	2.62
30	15.0	101.0	34.2	2.95
31	15.5	100.4	32.0	3.14
32	16.0	99.9	31.3	3.19
33	16.5	99.9	31.3	3.19
34	17.0	100.0	31.4	3.19
35	17.5	100.0	31.2	3.20
36	18.0	100.0	31.2	3.20
37	18.5	100.0	31.2	3.20
38	19.0	99.9	31.2	3.20
39	19.5	100.0	31.2	3.20
40	20.0	100.0	31.2	3.20
41	20.5	100.0	31.2	3.20
42	21.0	100.0	31.2	3.20

IEC 61400-12-2에 의한 불확도 계산 방법론이 IEC 61400-12-1과 비교하여 달라진 점은 다음과 같다.

- ◆ 나셀변환함수(NTF)에 의한 불확도 추가
- ◆ 풍향 불확도에 의한 풍속계 캘리브레이션 불확도 추가
- ◆ Method (공기밀도 보정, 동적 출력변화, 계절적 변동, 유동 유입각, 난류) 불확도 추가
- ◆ 가중계수(contribution factor) 도입

Fig. 33 은 표준합성불확도를 불확도 구성요소별로 분리하여 나타내었다. 풍속의 측정 불확도(instrument uncertainty)에 따른 출력의 민감계수(sensitivity factor)가 12m/s까지 계속 증가하기 때문에 12m/s에서 가장 큰 표준합성불확도를 보인다. 이후 15m/s까지 민감계수가 감소하다가 정격풍속 이후에는 민감계수가 0이 되면서 측정 불확도 값은 거의 0에 가깝게 된다. 반면 Method 불확도 요소(공기밀도 보정, 난류, 계절 변화, 유입각)는 출력에 대응하여 증가하기 때문에 정격출력 구간에서 가장 큰 값을 가지고 일정하게 유지된다. 그 외 불확도 구성 요소는 상대적으로 작은 비율을 차지하는 것을 알 수 있다. 정격풍속 이후에 IEC 61400-12-1에 비해 불확도가 컸던 것은 Method 요소가 추가되었기 때문이라는 것을 알 수 있다.

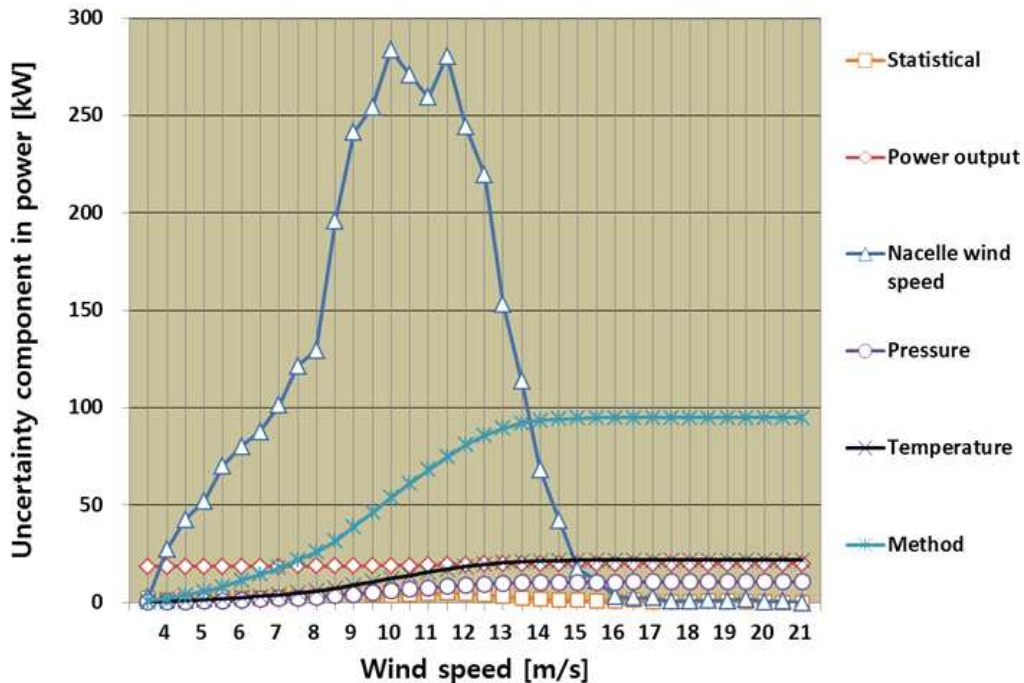


Fig. 32 Uncertainty components in power

Method 불확도 경우는 임의의 예측값을 넣기 때문에 그 폭을 줄이기 힘들다. 반면 Fig. 34 과 같이 나셀 풍속 불확도를 구성 항목에 따라 분리하여 분석해보면 나셀 변환함수(NTF)에 의한 불확도와 운영 특성(Operational characteristics)에 의한 불확도가 가장 큰 것을 알 수 있다. NTF는 나셀 풍속계와 마스트 풍속계 그리고 운영 특성은 나셀 풍속계의 성능을 높임으로써 불확도 수치를 줄일 수 있다. 특히 본 연구에서 사용된 나셀 풍속계는 IEC 표준으로 등급화되지 않은 풍속계이기 때문에 Class 4B 등급에 성능수치를 대입하였다. 만일 나셀 풍속계를 IEC 표준에 의한 고성능 풍속계를 사용한다면 나셀 출력곡선의 불확도를 상당 부분 줄일 수 있다.

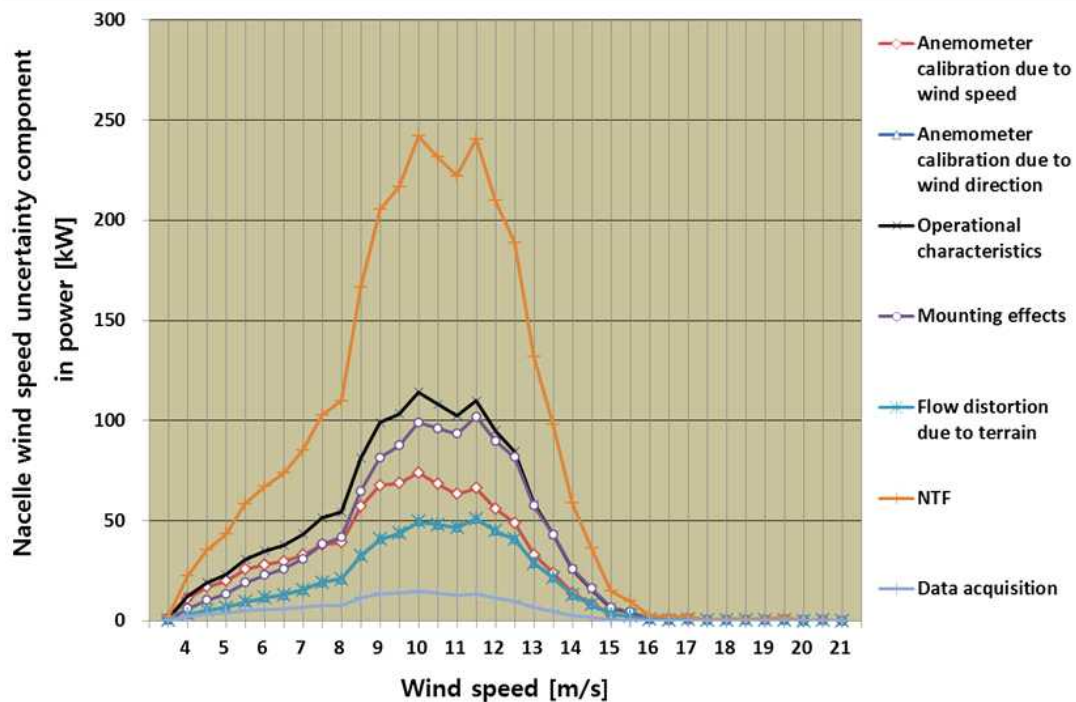


Fig. 33 Nacelle wind speed uncertainty components in power

V. 결 론

본 연구에서는 국제표준 IEC 61400-12-2를 근거로 하여 나셀 변환함수를 이용한 풍력터빈 출력성능평가를 실시하였다. 제주 한경풍력발전단지를 대상으로 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) No.6 WTG에 대하여 마스트 풍속을 근거로 산출한 출력곡선과 나셀 변환함수로 보정한 나셀 풍속을 근거로 산출한 나셀 출력곡선을 비교해본 결과 빈 별 출력차이와 예측 연간 에너지 생산량의 차이가 기준을 만족하여 나셀 변환함수가 유효함을 검증하였다.
- (2) No.9 WTG에 대하여 나셀 변환함수를 적용하여 나셀 풍속을 보정하였다. 보정 풍속과 출력을 근거로 출력곡선을 산출한 결과 모든 풍속 범위에 걸쳐 제조사에서 제시한 출력곡선과 높은 일치성을 보임으로써 풍력터빈이 기대 성능을 유지하고 있음을 밝혔다.
- (3) No.9 WTG의 실제 연간 에너지 발전량과 나셀 출력곡선을 이용하여 예측한 예측 연간 에너지 발전량을 비교하였다. 풍속의 레일리 확률 분포를 가정하였을 때 예측 발전량은 실제 발전량의 98.6%, 와이블 확률 분포를 가정하였을 때 98.8% 수준을 보임으로써 나셀 출력곡선의 유효성을 확인하였다.
- (4) 나셀 출력곡선의 불확도를 분석한 결과, 불확도 구성요소 중 나셀 풍속에 의한 불확도가 가장 큰 비율을 차지했으며 나셀 풍속의 불확도 구성요소 중 NTF의 의한 불확도가 가장 큰 비율을 차지하였다. 나셀 출력곡선의 불확도는 IEC61400-12-1에 근거하여 마스트 풍속으로 도출한 출력곡선에 비하여 정격풍속 이하 구간에서 약 1.6배 높은 불확도를 보였다.

참고문헌

- [1] 대한민국 지식경제부, “2.5GW 규모의 서남해안 해상풍력단지 개발을 위한 지식경제부 해상풍력 추진단 발족”, 보도자료, 2010.
- [2] 허종철, “풍력발전설비 평가용 실증단지 확장 개발”, 제주대학교 산학협력단 2012.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC), Wind Turbines – Part 22 : Conformity testing and certification, 1st ed, 2010.
- [4] <http://www.renewableenergyworld.com>
- [5] International Electrotechnical Commission (IEC), Wind Turbines – Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines, 1st ed, 2005.
- [6] Albers, A., Gerhard, G., “Wind Farm Performance Verification”, DEWI Magazin Nr.14, pp.7~8, 1999.
- [7] Smith, B., Link, H., “Applicability of Nacelle Anemometer Measurements for Use in Turbine Power Performance Tests”, AWEA’s Wind Power Conference, 2002.
- [8] Albers, A., Klug, H., “Power Performance Verification”, EWEC Conference, 1999.
- [9] International Electrotechnical Commission (IEC), Wind Turbines – Part 12-2 : Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines based on Nacelle Anemometry, 1st ed, 2013.
- [10] Kim, K.H., Hyun, S.G., “Power Performance Testing and Uncertainty Analysis for a 3MW Wind Turbine”, J.Korean Solar Energy Society, Vol.30 No.6, 2010.
- [11] ISO 2533 : Standard atmosphere, 1975.
- [12] “풍력 실증연구 사이트 선정 및 선정요건 분석에 관한 연구”, 제주대학교 청정에너지특화인력양성사업단, 2006
- [13] Alexandre Delwart, Mathias Hoelzer, “Validity Check of Numerical Site Calibration according to IEC 61400-12-1 ed.1 and Measnet PPMP v4”, European Wind Energy Conference and Exhibition, 2010.

- [14] “육상풍력실증연구단지 조성사업”, 한국에너지기술연구원, 2006.
- [15] Nam, Y.S., Yoo, N.S., Lee, J.W., “Site Calibration for the Wind Turbine Performance Evaluation”.
- [16] <http://phylab.yonsei.ac.kr>, 연세대학교 일반물리학 실험실 홈페이지.
- [17] Curvers, A., Van der Werff, P.A., “OWEZ WIND FARM EFFICIENCY”, ECN-E-08-092, P11~13, 2009.
- [18] Niels G Mortensen, Ole Rathmann, Andrew Tindal, Lars Landberg, “Field validation of the RIX performance indicator for flow in complex terrain”, Riso DTU.
- [19] Albers, A., Klug, H., “Power Performance Verification”, EWEC Conference, 1999.
- [20] 김준철, “풍력발전시스템 출력성능 평가 및 불확실성 평가에 관한 연구”, 제주대학교 석사학위논문, 2009.
- [21] Hyun, S.G., Kim, K.H., “A study on the Effect of Wind Turbulence Intensity on the Power Performance of Wind Turbine System”, J.Korean Solar Energy Society, Vol.32 No.4, 2012.
- [22] 고경남, 허종철, “풍력공학입문”, 문운당, 2006
- [23] Sathyajith Mathew, “Wind Energy Fundamentals Resource Analysis and Economics”, Springer, 2006.
- [24] “측정결과의 불확도 산정 및 표현을 위한 지침”, Korea Laboratory Accreditation Scheme, 2000
- [25] 안중찬, “데이터평가와 측정불확도”, 국가참조표준센터, 2008.
- [26] “풍력발전시스템 성능평가기술 기반구축”, 한국기계연구원 부설 재료연구소, 2010
- [27] IEC 61869-2, Instrument transformers - Part 2 : Additional requirements for current transformers.
- [28] IEC 61869-3, Instrument transformers - Part 3 : Additional requirement for inductive voltage transformers.
- [29] IEC 60688, Electrical measuring transducers for converting a.c. electrical quantities to analogue or digital signals, ed2, 2002

감사의 글

대학원 석사과정을 끝내고 공부의 성과를 모아 학위논문을 발표하게 되었습니다.

대학원과정 동안 많은 것이 새롭고 쉽지 않은 도전이었지만 하나하나 해결해나가면서 성숙해지고 발전해가는 제 자신을 찾을 수 있었고 그 것이 저의 석사과정의 가장 큰 수확이었습니다. 모든 것이 저 혼자 할 수 없는 일이었고 많은 분들의 도움이 있었기에 이 면을 빌려 감사의 마음을 표합니다.

대학원에서 가장 큰 행운은 허종철 교수님을 지도교수님으로 만난 것입니다. 풍력 분야에서의 많은 경험으로 저의 길을 안내해주셔서 너무나 감사합니다. 더불어 풍력대학원에서 지도해주신 많은 교수님들 논문을 꼼꼼히 첨삭해주시고 코멘트 해주신 고경남 교수님, 까다로웠던 지형공간 분야를 해결해주신 이병걸 교수님, 눈 내리는 방학에도 어김없이 공업수학 강의를 해주신 조경호 교수님, 어려운 제어 분야를 쉽게 설명해주신 임종환 교수님, 권위적인 모습없이 친근하게 대해주셨던 토목전공의 박상렬 교수님, 포트란 강의를 해주시고 김녕프로젝트를 진행하시며 고생하시는 양경부 선생님께 그리고 풍력대학원 행정실의 김익선 실장님과 이창림 선생님, 봄술, 수미 선생님께 감사를 드립니다.

짧은 방학기간에 정말 많은 것을 전수해주시고 가신 ECN의 G.schepers 박사님, Delft 공대의 Bussel 교수님께, 고민의 순간마다 용기와 격려를 해주신 사회교육과 염미경 교수님, 한석지 교수님께, 오랜기간동안 영어 선생님이 되어주신 Jenie hahn 교수님께, 진취적인 삶의 자세를 갖게 해주신 박영순 멘토님께 감사드립니다.

인턴십 기간 동안 지도해 준 독일 Lahmeyer의 Roland Ries와 Patric Kleinedam 그리고 동기 Luis와 Tobi에게 감사합니다. 세이셸 출장에서 동고동락한 유니슨 직원 분들, 갑작스러운 방문에도 호의적으로 맞아주신 강원풍력, 영덕풍력 직원분들께 감사합니다.

자랑스러운 유체역학 연구실의 졸업선배님들 문종이형, 경일이형, 준철이형, 승건이형, 현석이형 그리고 대학원 생활동안 가족보다 더 많은 시간을 함께 보냈던 연구실 멤버들 친형처럼 든든한 상현이형, 능동적으로 해결해나가는 치훈이형, 열심히 공부하는 롤모델인 수영이형, 어려운 일도 앞장서서 이끄는 미호형, 그리고 더 많은 것을 알려주지 못해 미안한 후배들 지훈이, 효정이 누나, 동범이형, 동현이, 범철이, 경대, 정훈이, 다희, 한나, 김호상 박사님 그리고 연구실에 활기를 주었던 학부생 태식, 믿음, 보연, 대기, 기훈, 희진, 인섭, 현수에게 감사합니다.

풍력대학원에 처음 입학하여 기반을 구축하며 고생을 많이 했던 정우형, 혁준이형을 비롯한 1기 선배님들, 아등바등 함께 머리를 싸매며 과제했던 기억들이 모두 추억이 된 풍력대학원 동기생들에게 감사합니다.

논문과정에서 중요한 데이터를 공유해주신 (주)남부발전과 한국에너지기술연구원에도 감사를 드립니다.

마지막으로 아들의 어떠한 선택도 믿고 지원해주신 우리 가족 아버지, 어머니, 동생 현수에게 감사의 마음을 바칩니다.