



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

660kW 풍력터빈의 난류강도에 따른 운전특성

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력기계시스템 전공

양 인 섭

2019년 2월

660kW 풍력터빈의 난류강도에 따른 운전특성

指導教授 許 鐘 哲

梁 仁 攝

이 論文을 風力工學部 碩士學位 論文으로 提出함

2018年 12月

梁仁攝의 風力工學部 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

김명석



委 員

김경남



委 員

이종원



濟州大學校 大學院

2018年 12月



Operating Characteristics by Turbulence Intensity of 660kW Wind Turbines

Inseop Yang
(Supervised by professor Jongchul Huh)

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

2018. 12.

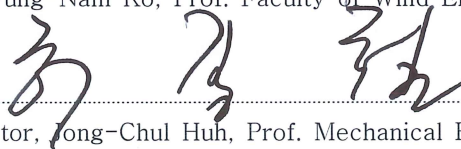
This thesis has been examined and approved.



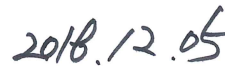
Thesis director, Bum-Suk, Kim, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering



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



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



Date

Faculty of Wind Energy Engineering

Graduate School

Jeju National University

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	1
I. 서 론	2
1. 연구개요	2
2. 연구 목적 및 범위	3
II. 분석대상 및 방법	5
1. 분석대상 풍력터빈	5
2. 분석방법	13
2.1 유효방위각 산정	13
2.2 나셀 풍속 보정	15
2.3 풍속 정규화	17
III. 풍력터빈 운전특성	19
1. 풍속별 운전특성	19
1.1 풍속별 출력 변화	19
1.2 풍속별 회전수 및 피치 변화	20
1.3 풍속별 주요 부품의 온도 변화	22
2. 주요 부품 교체 후 운전특성 변화	25
IV. 난류강도에 따른 영향	32
1. 난류의 분류	33
2. 난류강도에 따른 출력 변화	34
3. 난류강도에 따른 회전수 및 피치 변화	38
V. 결론	42
참고문헌	44

LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Fixed rotor speed type wind turbine(Vestas V47)
- Fig. 2 Location of the wind turbines(WTG3) and configuration of Hangwon wind farm
- Fig. 3 Inside nacelle of Vestas V47 [29]
- Fig. 4 The SCADA program for data collection and monitoring of WTG 3
- Fig. 5 Sensor layout and boom orientation of Meteorology mast tower in Hangwon wind farm
- Fig. 6 Calculation of disturbed sectors and measurement sector of the meteorological tower
- Fig. 7 Nacelle wind speed versus met. mast measurement(a: before NTF, b: after NTF)
- Fig. 8 Windrose (a: before NTF, b: after NTF)
- Fig. 9 Power curve, power versus wind speed
- Fig. 10 Wind Speed Versus Rotor RPM
- Fig. 11 Generator RPM versus wind speed
- Fig. 12 Pitch angle versus wind speed
- Fig. 13 Gear oil temperature versus wind speed
- Fig. 14 HSS bearing temperature versus wind speed
- Fig. 15 Nacelle design drawing of Vestas V47 version [29]
- Fig. 16 Comparison of power curve between maintenance before, after
- Fig. 17 Comparison of power coefficient between maintenance before, after
- Fig. 18 Comparison of rotor rpm between maintenance before, after
- Fig. 19 Comparison of pitch angle between maintenance before, after
- Fig. 20 Comparison of GearOil Temperature between HTI and LTI
- Fig. 21 Comparison of HSS Bearing Temperature between HTI and LTI
- Fig. 22 Turbulence intensity versus wind speed
- Fig. 23 Turbulence separation by the normal turbulence model of wind turbines class C
- Fig. 24 Comparison of power curve between HTI and LTI
- Fig. 25 Comparison of power coefficient between HTI and LTI
- Fig. 26 Comparison of rotor RPM between HTI and LTI

- Fig. 27 Comparison of pitch angle between HTI and LTI
- Fig. 28 Comparison of power density between HTI and LTI
- Fig. 29 Classification of components over 660 kW in 1 second data
- Fig. 30 Simulation of power density variation by rated wind speed control
- Fig. 31 Annual energy production using power curve of HTI and LTI

LIST OF TABLES

- Table 1 Specification of the wind turbines
- Table 2 The specification of met. mast
- Table 3 Disturbed sector of met. mast
- Table 4 Data table before maintenance
- Table 5 Data table after maintenance
- Table 6 Power performance and power coefficient between HTI and LTI
- Table 7 Annual energy production between HTI and LTI

Abstract

As a wind turbine operators, the operating characteristics and power variability of wind turbines are major concern. Wind turbines are operate by extreme winds and their operating characteristics are varied by turbulence. Understanding the Operating characteristics of wind turbines can help ensure stable operation of wind turbines and provide information to improve wind turbine systems. The wind turbine is a 660kW wind turbine (Vestas V47) installed in Hangwon of Jeju Island and operated by jeju National University. This wind turbine hub height is 45m, the rotor diameter is 47m, and the Fixed speed variable pitch type(FS-VP). The operation data collected from SCADA system of the target wind turbine during the first half of 2017 (January to June) and determined the disturbed sector according to Annex A of IEC 61400 12-1.

The wind speed of the nacelle anemometer is disturbed by the influence of the rotor. Therefore, according to IEC 61400-12-2, NTF(Nacelle Transfer Function) is applied to obtain more accurate wind speed. Using the NTF data, analyze the power, rotation, blade pitch and temperature of the main parts by wind speed and observed to change of operation characteristics after main parts were replaced.

In order to confirm the change of operating characteristics due to the turbulence, Based on turbulence intensity C-Class of the wind turbine class parameter of IEC 61400-1 (ed. 3), higher than Class C is defined as HTI(High turbulenc intensity) and under than Class C is defined as LTI(Low turbulence intensity). The turbulence Class data were analyzed to power and power coefficient, rotor speed, pitch angle by defined HTI, LTI.

I. 서 론

1. 연구개요

풍력터빈을 가동하는 운영자의 입장에서 풍력터빈의 운전특성과 출력의 변화는 주요한 관심사이다. 풍력터빈은 난류(turbulence)로 인한 극심한 풍속변화를 포함하는 불규칙한 바람에 의해 운전되며 높은 난류강도(turbulence Intensity)를 갖는 풍속에서는 출력 변동을 유발할 뿐만 아니라 그에 따른 운전특성이 달라진다[1]. 이러한 풍력터빈의 바람에 따른 운전특성을 이해한다면 풍력터빈 운영자에게 풍력터빈을 안정적으로 운영할 수 있도록 도와주며, 풍력터빈 개발자에게는 시스템을 향상시키기 위한 정보를 제공할 수 있다. 또한, 유지보수 관점에서는 시스템 모니터링을 통해 돌발적 고장에 미리 대비할 수 있고, 고장 발생시 고장 원인 분석에 도움이 될 수 있다.

풍력터빈의 운전특성을 파악하기 위해서는 가동중인 상업용 풍력터빈에서 수집된 일정 기간 운전 정보를 사용하여 그 특성을 분석하게 된다. 이러한 운전 정보는 풍력터빈에 설치되어있는 SCADA (supervisory control and data acquisition) 시스템을 통해 확보할 수 있다. 일반적으로 SCADA 시스템은 풍력터빈 감시를 위한 모니터링과 운전 정보를 수집하기 위한 기능을 수행한다. 수집된 실측 데이터를 이용하여 풍력터빈의 출력특성을 분석[2,3] 하거나 풍력터빈 후류의 유동특성에 관한 연구[4]들이 수행되었다. 또한 풍력터빈 타워에 가속도 센서를 추가로 설치하여 SCADA 데이터와 함께 풍력터빈의 동적 특성을 분석한 사례도 있다[5]. 최근에는 SCADA 데이터를 기반으로 풍력터빈의 고장 예측을 위한 다양한 연구[6~10]가 이루어지고 있어 그 활용도가 넓어지고 있다.

이들 연구에서 주요한 관심사는 운전 중 출력변화에 있는데 이는 에너지 생산량과 직접적인 관련이 있기 때문이다. 이 출력변화를 확인할 수 있는 풍력터빈의 출력곡선(power curve)은 풍력터빈 운전특성을 파악하는 주요 분석 대상이고, 이러한 출력곡선에 많은 영향을 미치는 요소에는 바람의 변동성분인 난류이다[11]. 난류는 풍력터빈 출력에도 영향을 미치면서 시스템에 기계적 하중을 증가시켜

풍력터빈의 기대수명에도 영향을 미치는 요소 중 하나이다[12]. 공학적으로 난류의 특성은 난류강도로 표현하고 있으며 이에 대한 연구[13]와 풍력터빈의 출력에 미치는 영향에 대한 다수의 연구[14~17]들이 수행되었다. 이들 연구들은 특히 난류강도에 따른 출력변화를 다루었는데, 난류강도가 높은 경우 저풍속 구간에서는 출력이 상승하며, 고풍속 구간에서는 출력이 감소하는 공통적인 특성을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이에 대해 풍력터빈 로터(rotor) 회전수와 블레이드 피치각(pitch angle) 변화, 출력계수(power coefficient) 변화를 통해 조금 더 상세한 검토를 수행하였다.

풍력터빈의 종류는 회전축 방향, 증속기 유무 등 다양한 방식으로 분류되는데 운전속도에 의한 방식으로 분류하면 정속형(fixed rotor speed type) 풍력터빈과 가변속형(variable rotor speed type) 풍력터빈으로 구분될 수 있다[18]. 정속형 풍력터빈은 풍속에 상관없이 로터가 일정한 속도로 회전하는 풍력터빈으로 유도발전기(induction generator)를 장착하고 계통에 직접 연결되는데 구조가 간단하고 신뢰성이 높으며 시스템 가격이 낮다는 장점을 가지고 있다. 그러나 유도발전기는 속도변동 1~2% 이내의 좁은 슬립 범위내에서 작동하기 때문에 속도의 변화가 적어 정격 풍속 이하에서는 풍속변화에 대응하여 가능한 최대 효율을 발생하지 못한다[19]. 이러한 단점을 보완하기 위해 풍속에 비례하여 로터 회전속도를 증가시키는 가변속 풍력터빈이 개발되었으며 최근의 풍력터빈들은 대부분 가변속 방식을 채택하고 있다[20]. 가변속형 풍력터빈은 넓은 범위의 풍속에서 최대의 공력 효율을 얻을 수 있도록 설계된 풍력터빈으로 동일한 풍향 조건에서 정속형보다 높은 출력과 우수한 전력품질을 얻을수 있는 장점이 있는 반면, 정속형보다 전기 시스템이 복잡하여 제어가 어렵고 관련된 전기부품이 많이 소요되어 시스템 가격이 상승되는 단점이 있다[21].

2. 연구목적 및 범위

풍력터빈 또는 풍력발전단지 운영시 해당 설비에 대한 특성을 파악해야 운전 중 이상현상이 발생하는 경우나 유지보수 계획을 수립할 때 도움이 된다. 하지만 풍력터빈의 상태파악 및 유지보수 계획을 수집할 때, 단일 풍력터빈의 경우에는 제조사에서 제공하는 특성과 차이를 보일 것이며, 풍력발전단지내 터빈들의 경우

에는 각각의 터빈마다 주변 환경에 따라 운전특성의 차이가 있기 때문에 개별적으로 터빈의 운전특성을 파악하여야 한다.

이미 설치된 상업용 풍력터빈 혹은 풍력발전단지에서 풍력터빈의 운전특성을 확인하기에는 제약이 따른다. 풍력발전단지 설치 전 풍황자원측정에 사용했던 기상탑이 없을 수도 있으며, 구형 풍력터빈의 경우 상태감시시스템(condition monitoring system, CMS)장비나 하중측정장비 등 추가적인 데이터 수집 장비가 설치되지 않는다. 이러한 경우 장비들을 추가로 설치하면 더 상세한 터빈의 데이터를 얻을 수 있지만, SCADA 데이터만을 이용하여 풍력터빈을 분석하는 것도 필요하다.

본 연구에서는 제주대학교에서 운영하는 660kW용량의 정속형 풍력터빈을 대상으로 한다. 분석대상 풍력터빈은 설치 후 약 20년이된 Vestas사의 구형 모델으로 추가적인 데이터 수집 장비가 설치되지 않았으며 추후 상태감시시스템을 추가로 장착할 예정이지만 현재까진 해당 터빈의 SCADA 데이터를 분석하여 풍력터빈의 상태파악 및 유지보수 계획을 수립하는데 사용하고 있다.

분석대상 풍력터빈을 파악하기 위하여 SCADA 시스템을 통하여 6개월간(2017년 1월 ~ 6월)의 운전 데이터를 수집하였다. SCADA 시스템에서 수집된 풍속 데이터의 경우 로터로 인한 영향을 받기 때문에 인근 기상탑에서 수집한 풍속 데이터와 함께 IEC 61400-12-2에 정의된 나셀전달함수(NTF: nacelle transfer function)[22]를 이용하여 보정한 후 표준공기밀도 보정을 통한 풍속 정규화과정을 수행하였다. 이를 기반으로 풍력터빈의 운전특성을 파악하기 위해 풍속별 출력(power), 출력계수(power coefficient), 로터(rotor) 회전수, 피치각(pitch angle) 및 온도(temperature) 변화를 분석하였다. 또한, 주요 부품 교체 후 운전특성의 변화를 확인하였으며, 난류에 따른 운전특성을 파악하기 위하여 분석 데이터를 IEC 61400-1[23]에 정의된 정상난류모델(normal turbulence model)에 의한 풍속별 난류 강도로 구분하여 난류에 의한 운전특성 변화를 논의하였다.

II. 분석대상 및 방법

1. 분석대상 풍력터빈

분석대상 풍력터빈(WTG 3)은 제주도 북동부에 위치한 국내 첫 번째 풍력단지인 행원풍력단지에서 운전중인 덴마크 Vestas사의 V47 기종이다. 국내에 도입된 초기 모델로 660kW 용량의 정속형 풍력터빈이다. Fig. 1은 분석대상 풍력터빈의 실제 모습을 보여주고 있는 것으로 현재는 제주대학교가 교육 및 연구를 목적으로 운영하고 있다.



Fig. 1 Fixed rotor speed type wind turbine(Vestas V47)

Fig. 2는 분석대상 풍력터빈과 기상탑 주변을 보여주고 있다. 분석대상은 제주특별자치도 제주시 구좌읍 행원리에 있으며 제주도 중심을 기준으로 북동부에 위치한다. 해당 위치에는 국내 첫 번째 풍력단지인 행원풍력단지가 있으며 분석대상 풍력터빈 및 기상탑 모두 해당 풍력단지 내에 포함된다. 행원풍력단지는 약

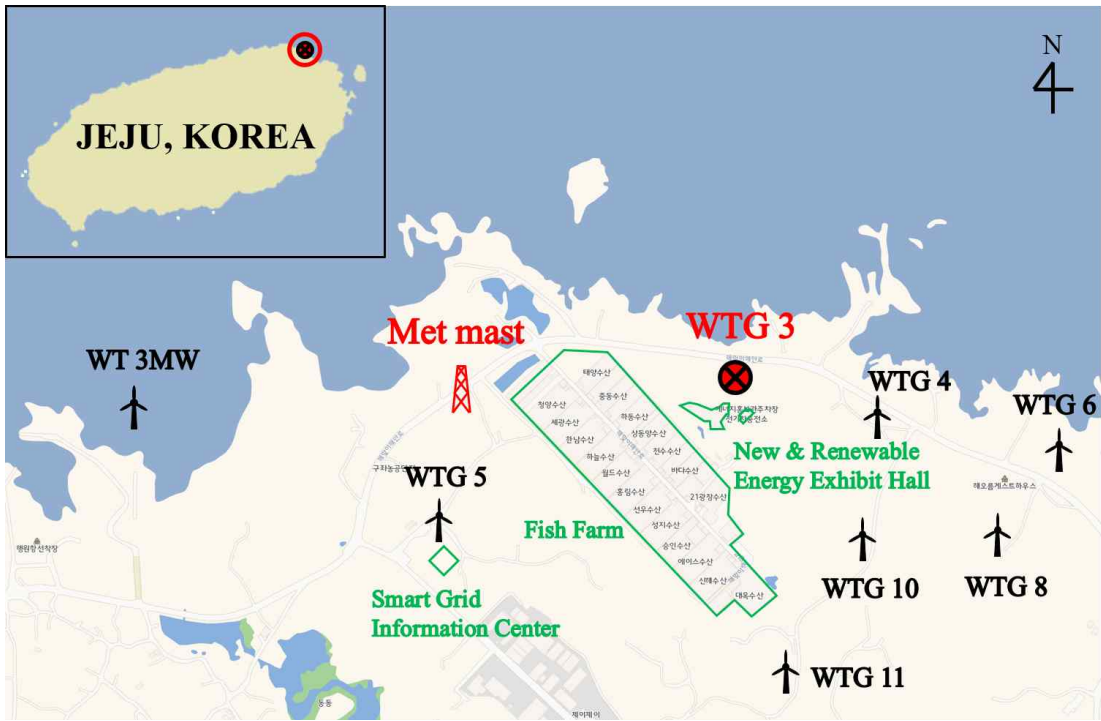


Fig. 2 Location of the wind turbines(WTG3) and configuration of Hangwon wind farm

20년 전(1999년)에 설치되었으며, 그 당시에는 상용화된 풍력터빈이 1MW 이하의 용량으로 개발되어서 660kW급, 750kW급 풍력터빈들로 구성되어 있었다.

분석대상 풍력터빈은 WTG 3(행원3호기)로 불리며 행원풍력단지에서 세 번째로 설치된 풍력터빈이다. 현재 행원풍력단지에는 12호기까지 설치되어있으며 WTG 1과 WTG 2는 노후화로 인해 철거되어 WTG 3가 가장 오래된 풍력발전기 중 하나이다. 제주에너지공사가 행원풍력단지를 운영함에 따라 풍력터빈의 데이터를 분석하기 위하여 WTG 1이 철거된 자리에 기상탑을 설치하였으며, WTG 4와 WTG 5는 리파워링(Repowering) 되었다. 리파워링이란 기존 풍력터빈을 철거하고 큰 용량의 풍력터빈으로 변경하는 것을 말하며 WTG 4는 유니슨(Unison / 대한민국) 2MW 풍력터빈으로, WTG 5는 한진(Hanjin / 대한민국) 1.5MW 풍력터빈으로 리파워링 되었다. 풍력터빈 외의 주변 주요 사항으로는 신재생 에너지 홍보관, 스마트 그리드 홍보관, 행원어촌계 양식장과 구좌농공단지가 있다.

분석대상 풍력터빈은 Vestas사의 V47 기종으로, 정격출력시 660kW를 생산한다. 풍력터빈의 로터직경은 47m이고 허브(hub) 높이는 지상에서 45m 높이에 설

치되어 있다. 유도발전기를 사용하는 정속형 회전 형식으로 출력이 발생하지 않는 낮은 풍속에서도 28rpm 미만으로 로터가 회전하며 출력 시에는 시동풍속에서 종단풍속까지 28.5rpm에서 최대 31.3rpm으로 회전한다. 분석대상 풍력터빈의 기어박스는 Hansen사(벨기에), 발전기는 Weier사(독일)의 제품을 사용하고 있다. 기어박스의 기어비는 63.2896이며 유성(Planet)기어와 평행축(Parallel axes)으로 구성되어 있다. 발전기는 국내 기준으로 60Hz를 사용하며, 정격출력은 660kW로 정격출력기준 1811rpm으로 회전한다. Vestas사의 주요 요소인 제어는 VMP(Vestas Multi Processor / OptiSlip[®]과 OptiTip[®])를 사용한다. 타 정속형 풍력터빈과는 다르게 추가적으로 10%의 슬립구간을 갖으며, 출력의 변동성과 전기 부품의 부하를 줄여준다. Table 1에 이와 관련한 대상 풍력터빈의 사양을 보여주고 있다.

Table 1 Specification of the wind turbines

Specification	Value
Rotor Diameter [m]	47
Area swept [m ²]	1,735
Rotor revolution speed [rpm]	28.5
Hub height [m]	45
Cut-in wind speed [m/s]	4
Rated wind speed [m/s]	15
Cut-out wind speed [m/s]	25
Rated power [kW]	660
Generator RPM [rpm]	1,818 - 1,980
Power control	active blade pitch control
IEC Class	I A
Gearbox (Manufacturer)	Planet / Parallel axles (Hansen)
Generator (Manufacturer)	Asynchronous with Optislip [®] (weier)
Air brake	Feathered

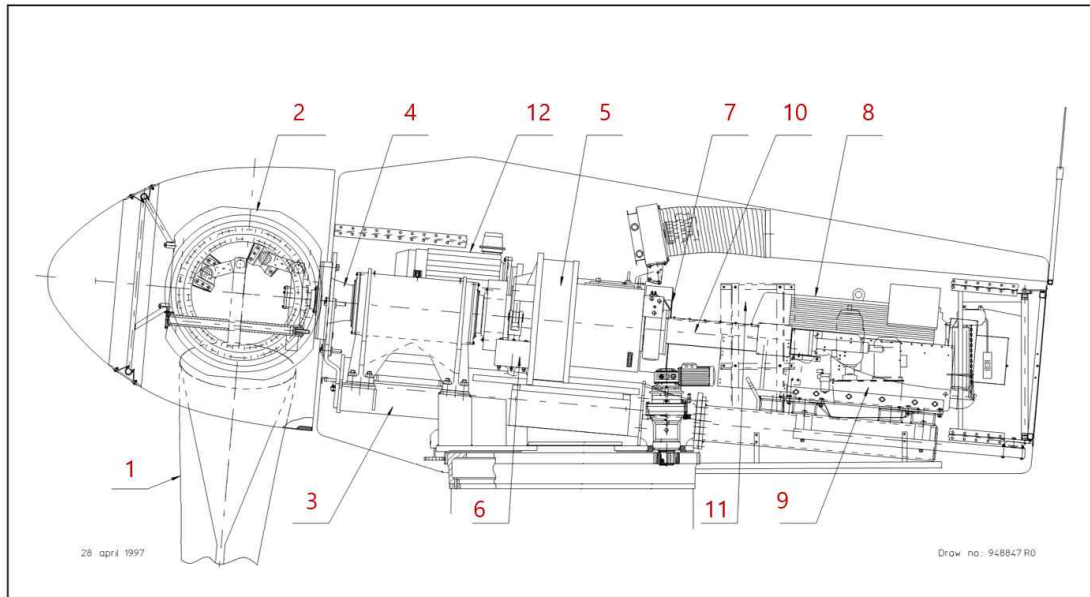


Fig. 3 Inside nacelle of Vestas V47 [29]

Fig. 3은 V47 기종의 구성도로 풍력터빈 너셀 안의 구조에 대해 확인할 수 있다. 타 풍력터빈의 너셀 내부와 차이가 있을 수 있지만, 기어박스형 풍력터빈(Gearbox type wind turbines)의 구조는 비슷하기 때문에 해당 구조를 이해하면 타 풍력터빈의 구조도 쉽게 이해할 수 있다.

1번은 블레이드(Blade)로 바람의 힘을 받는 부품이다. 블레이드는 바람의 힘을 효율적으로 받기 위한 에어포일(airfoil) 형상으로 구성되어 있으며 블레이드 허브에 연결되어 있다. 최근 블레이드에 마모가 발생하면 출력이 감소한다는 연구 [24]가 진행되고 있을 정도로 풍력터빈에서 가장 주요한 부품이다. 2번은 블레이드 허브(Blade Hub)로 3개의 블레이드가 연결되는 부분이다.

3번은 메인 프레임(Base frame)으로 풍력터빈에 기어박스 및 메인 축 등이 고정되도록 하는 너셀의 기초부이다. 4번은 메인 축(Main shaft)으로 블레이드에서 받은 바람의 힘으로 로터(Rotor)가 회전하며 토크를 발생시키는데, 이를 기어박스까지 연결해준다. 5번은 기어박스(Gearbox)로 위에 설명하였듯이 WTG 3에서는 Hansen 사의 기어박스를 사용하고 있으며 유성기어와 헬리컬 기어(Helical gear)로 구성되어 있다. 풍력터빈의 블레이드가 바람의 힘을 받아 로터가 회전할 때 낮은 회전속(28.5 rpm)을 갖는데 이를 기어비를 통하여 발전기의 주사율인

60Hz로 변환하기 위해 고속으로(약 1800 rpm) 변환시켜주기 위한 장치이다. 6번은 토크 암(Torque arm / Gear tie rod)으로 기어박스과 메인 프레임을 연결해주며 기어박스가 진동하며 발생하는 하중을 줄여주는 역할을 한다. 7번은 디스크 브레이크(Disc brake)로 풍력터빈에서 사용하는 기계적 브레이크이다. 풍력터빈 운전 중 비상상황이 발생했을 경우 회전을 물리적으로 멈춰줄 수 있는 부품이다. 8번은 발전기(Generator)로 위에 설명하였듯이 WTG 3에서는 Weier사의 발전기를 사용하고 있다. 풍력터빈에서 회전의 힘을 이용하여 전기를 생산하는 부품으로 1800 rpm 이상의 고속회전을 통하여 전기를 생산한다.

9번은 유압 장치(Hydraulic unit)로 피치제어시 유압을 제어한다. V47 기종은 3개의 블레이드가 하나의 캐리어에 연결되어 있어 동시에 피치제어를 한다. 캐리어를 움직여 블레이드의 피치각을 조절하기 위해서는 유압을 사용해서 10번 구동 축(Cardan shaft)에 있는 실린더를 움직여야한다. 유압 실린더의 변화를 통해 캐리어의 위치가 움직이면 3개의 블레이드가 동시에 피치각이 변화하게 된다.

11번은 너셀의 탑 컨트롤러(VMP top control unit)로 풍력터빈의 운전을 제어하는 제어기판으로 구성되어 있다. 12번은 200kW의 소형 발전기를 설치할 수 있는 공간이다. V47 기종은 660kW의 터빈에 200kW의 발전기를 추가할 수 있는데, 이 소형 발전기는 7m/s 이하에서 사용할 수 있으며, 음향 레벨을 낮춰줄 수 있다. WTG 3에는 소형 발전기가 설치되지 않아 660kW 발전기만을 사용하고 있다.

풍력터빈에 대한 운전 정보의 수집은 앞서 언급하였듯이 일반적으로 제조사에서 제공하는 SCADA 시스템을 이용하면 된다. 그러나 행원풍력단지내에 설치된 초기 모델들(WTG3 포함)은 구형 전화 모뎀방식의 모니터링 방식을 사용하여 제어박스를 통하지 않으면 자료에 대한 실시간 감시가 불가능하다.[25] 따라서, 제주대학교에서 행원3호기를 위해 개발한 풍력터빈 운전정보의 실시간 수집과 온라인 모니터링이 가능한 컴퓨터 프로그램을 사용하였다. Fig. 4는 풍력터빈 모니터링 시스템의 메인 화면으로 원격 모니터링과 원격제어가 가능하며 풍력터빈에서 측정된 각종 정보를 1초와 10분 간격으로 저장할 수 있다.

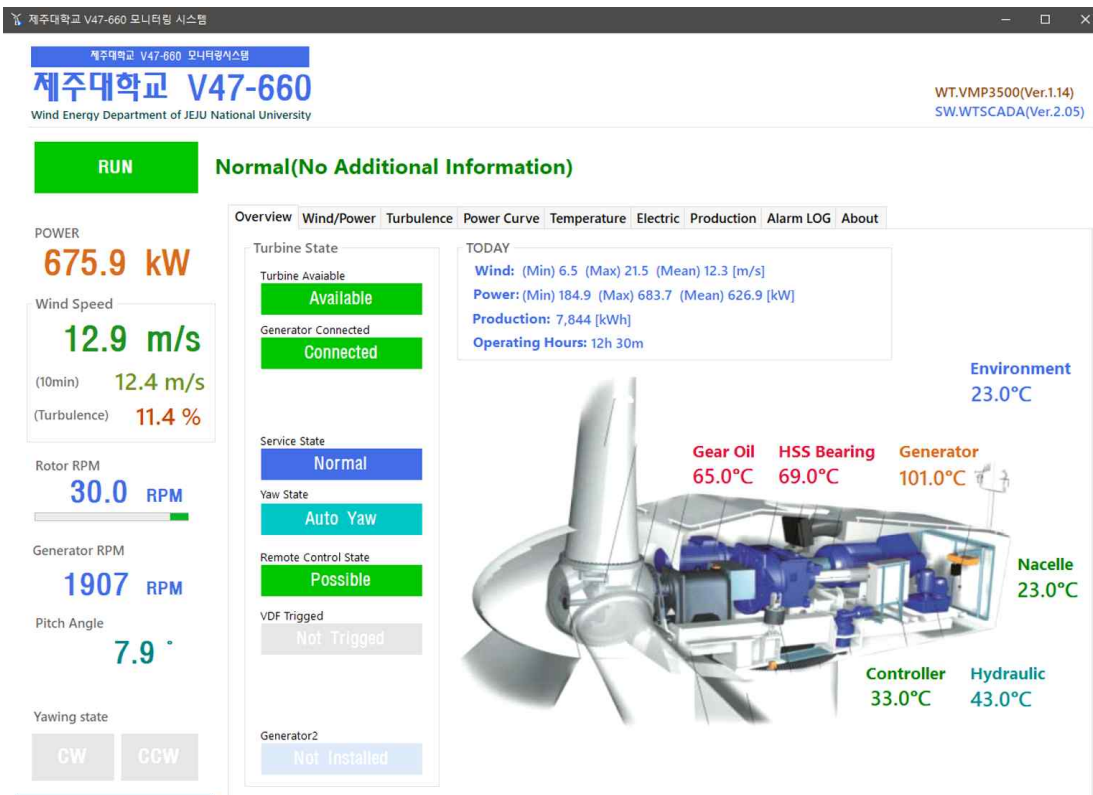


Fig. 4 The SCADA program for data collection and monitoring of WTG 3

하지만, 풍력발전기의 데이터를 분석하기 위해서 풍력터빈 자체의 SCADA 데이터만을 사용하기에는 신뢰성이 떨어진다. 이를 보완하기 위해서는 인근에 설치된 기상탑 데이터를 이용하여 보정하여야 한다. 행원풍력단지에는 제주에너지공사에서 설치 및 운영중인 행원기상탑이 설치되어 있어 해당 기상탑의 데이터를 이용하였다.

해당 기상탑은 자립식 트리스 구조이며 높이 80m, 극한풍속 66.6 m/s, 풍속계 6개, 풍향계 4개, 온습도계 2개, 대기압계 2개, 강우계 1개가 설치되어 있다. 풍속계는 Thies(1st class advanced)로 80m 1개, 75m 1개, 70m 2개, 50m 1개, 35m 1개로 구성되어 있고, 풍향계는 Thies(1st class advanced)로 76m 1개, 67m 2개, 50m 1개로 구성되어 있다. Fig. 5와 Table 2는 자세한 기상탑 사항을 보여준다.

Table 2 The specification of met. mast

Category	Specification
Structure [-]	Independent truss structure
Height [m]	80
Weight [ton]	10.1
Extreme wind speed [m/s]	66.6
Installation sensor [EA] (height)	Anemometer [6 EA] (80m, 75m, 70m, 50m, 30m)
	Wind vane [4 EA] (76m, 67m, 50m)
	Temperature [2 EA] (65m)
	Air pressure [2 EA] (65m, 1m)
	Humidity [1 EA] (65m)

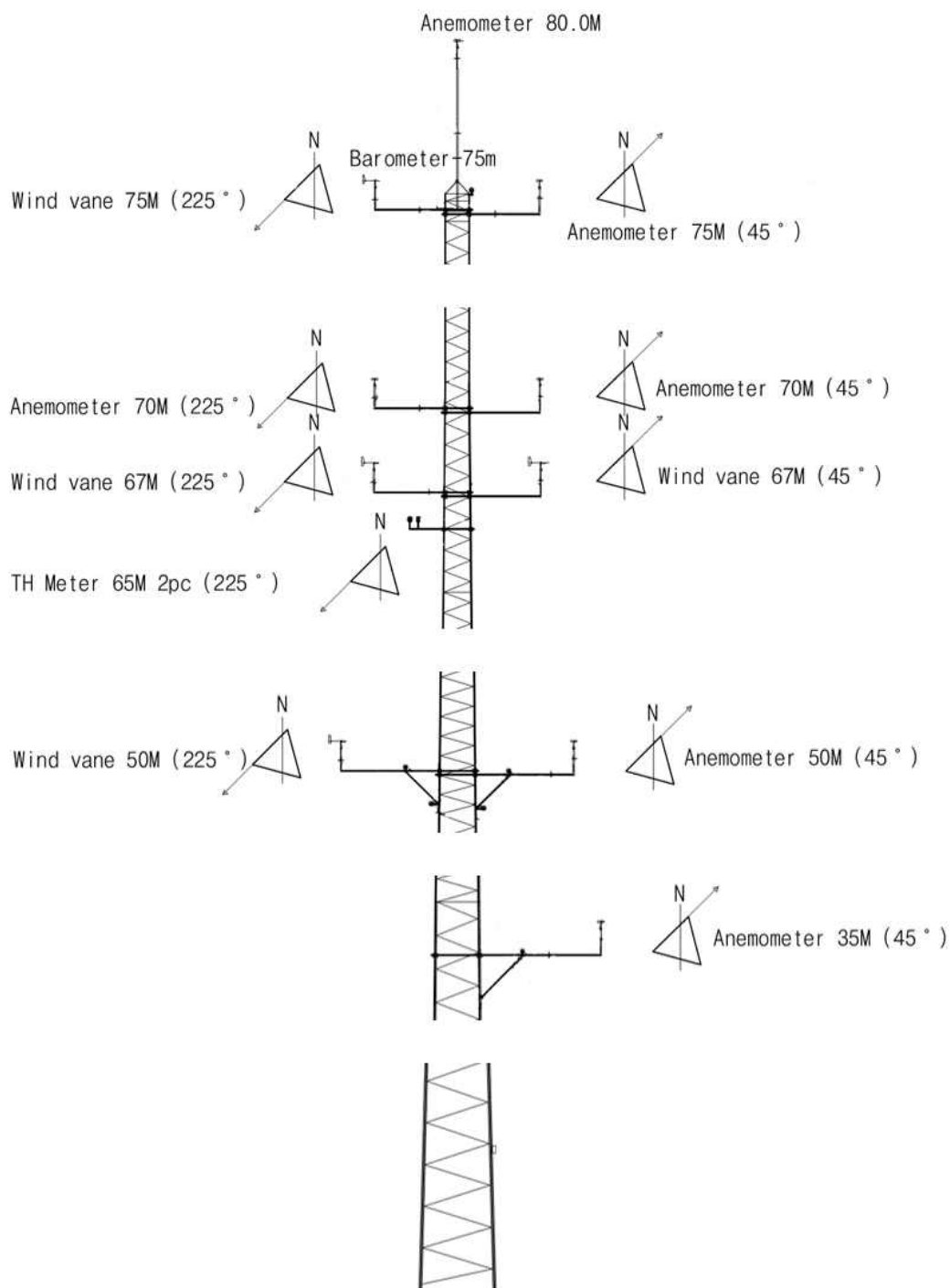


Fig. 5 Sensor layout and boom orientation of Meteorology mast tower in Hangwon wind farm

2. 분석방법

풍력터빈은 주변 장애물들로 인한 외란의 영향을 받으며, 풍력터빈 풍속계의 경우 나셀 상단에 설치되어 있어 로터로 인한 영향을 받는다. 따라서 우선 (1) 풍력터빈 주변 장애물들로 인한 영향을 받지 않는 유효방위각을 산정하고, (2) 유효방위각 범위내에서 수집된 나셀 풍속 데이터를 동일한 방위각에서 측정된 인근 기상탑 풍속 데이터를 이용하여 풍력터빈의 자유단 풍속을 예측하였다. 그리고 (3) 표준공기밀도에 대한 풍속 정규화를 수행하고 출력을 보정하였다.

2.1 유효방위각 산정

분석대상 풍력터빈 및 기상탑은 설치 주변지역으로 인한 영향을 받지 않아야 한다. 만약 분석대상에 인접한 다른 풍력터빈이 운전을 하고 있다면 그 후류 영향에 대해 평가가 이루어져야 한다. 평가를 통해 배제각을 구하고 유효방위각을 산정하기 위해 WTG 3과 기상탑 주변 장애물들을 Fig. 6과 같이 파악하였다. WTG 3은 행원풍력단지 내에 북쪽 해안가에 위치하고 있으며 동, 서, 남쪽 방향으로 다수의 풍력터빈들이 위치하고 운전되고 있어 주변 풍력터빈들로 인한 후류의 영향을 받는다. 또한 주변에 제주 신재생에너지홍보관과 양식장이 장애물로 작용하고 있다. 주변 장애물들에 대해 IEC 61400 12-1 Annex A에 따라[26] 배제각(disturbed sector)을 계산하여 유효방위각을 산정하였다. 배제각을 계산하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5D/L + 0.15) + 10 \quad (1)$$

$$D = \begin{cases} \text{Rotor diameter, if Wind Turbine} \\ \frac{2I_h I_w}{I_h + I_w}, & \text{if Obstacle} \end{cases}$$

여기서 α 는 배제각을 의미하며 D는 로터직경 혹은 대상의 크기, I_h 는 건물의 높이, I_w 는 건물의 폭, L은 분석대상과의 거리이다. 해당 공식을 사용하면 기상탑에서 WTG 3와 WT 3MW 및 주변 장애물의 영향으로 인해 284~67°의 유효방위각을 산정할 수 있다.

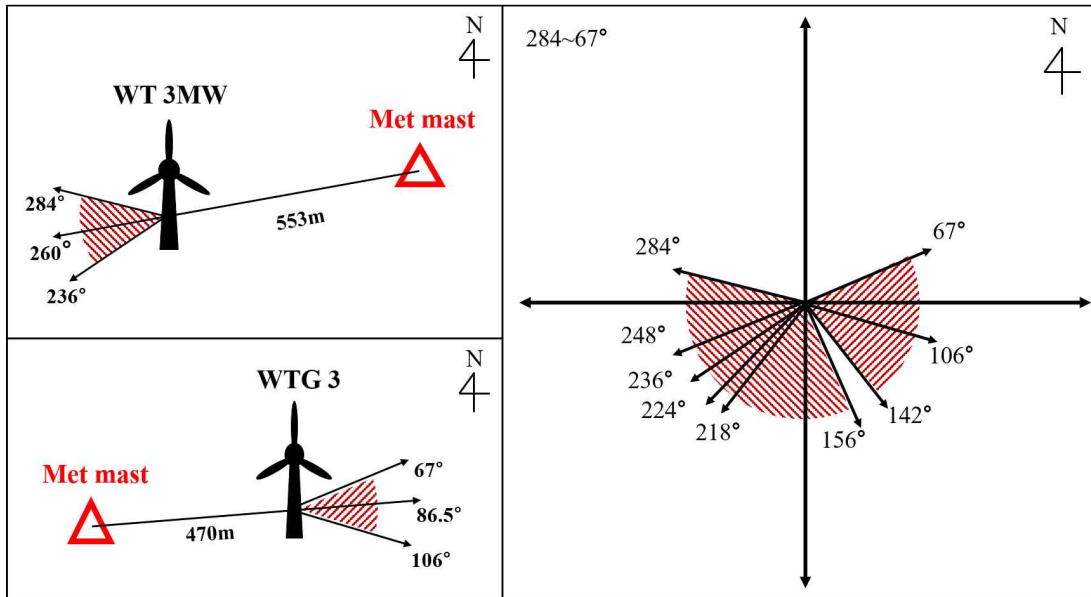


Fig. 6 Calculation of disturbed sectors and measurement sector of the meteorological tower

Table 3 Disturbed sector of met. mast

WTG, Obstacle	WTG 5	WT 3MW	WTG 3	New & Renewable energy exhibit hall	fish farm
Distance [m]	213	553	470	411	305
Rotor Diameter [m]	70	90	47	31.38	10
angle [deg]	190	260	86.5	91	105
range [deg ~ deg]	156 ~ 224	236 ~ 284	67 ~ 106	73 ~ 108	92 ~ 118
Obstacle height [I_h]	-	-	-	15.8	5
Obstacle Width [I_w]	-	-	-	2254.5	80000

2.2 나셀 풍속 보정

풍력터빈의 나셀 풍속계는 블레이드 후방에 위치하기 때문에 바람이 블레이드를 통과하면서 풍속의 감소와 로터 회전으로 인한 외란의 영향을 받는다. 따라서 풍력터빈 나셀 풍속 데이터를 이용하여 정확한 풍속별 운전특성을 분석하기 위해서는 풍력터빈 로터 앞단의 자유단 풍속을 도출할 필요가 있다. 이를 위해 IEC61400-12-2에 정의된 나셀풍속전달함수(nacelle wind speed transfer function, NTF)를 이용하였다. NTF는 풍력터빈 나셀 풍속계를 이용하여 풍력터빈의 출력 성능을 평가하기 위한 하나의 방법으로 이를 이용하여 실제 풍력터빈의 출력 성능평가를 수행한 연구사례가 있다[27].

본 연구에서는 나셀 풍속계의 풍속보정을 위해 앞서 산정한 유효방위각 범위에서 나셀에서 측정된 풍속과 기상탑에서 측정된 풍속을 0.5m/s 구간으로 구분하여 각각의 풍속별 평균풍속을 구하고 이를 나셀에서 측정된 풍속에 대해 아래와 같이 NTF를 적용하였다[22].

$$V_{free} = \frac{V_{free,i+1} - V_{free,i}}{V_{nacelle,i+1} - V_{nacelle,i}} \times (V_{nacelle} - V_{nacelle,i}) + V_{free,i} \quad (2)$$

여기서 V_{free} 는 나셀 풍속에 NTF를 적용한 자유풍속이며, $V_{nacelle,i}$ 은 0.5m/s 구간별 나셀 풍속계의 평균값이고 $V_{free,i}$ 는 0.5m/s 구간별 기상탑 풍속계의 평균값이다.

Fig. 7은 나셀에서 측정된 풍속과 기상탑에서 측정된 풍속의 관계를 확인하기 위한 선형회귀분석 결과를 보여주는 것으로 Fig. 7(a)는 NTF 수행 전 결과로 결정계수 $R^2 = 0.9897$ 이고 Fig. 7(b)는 NTF 수행 후의 결과로 $R^2 = 0.9909$ 임을 보여주고 있어 NTF 수행 후 나셀 풍속이 실제 풍속에 대한 편차가 감소하였음을 알 수 있다.

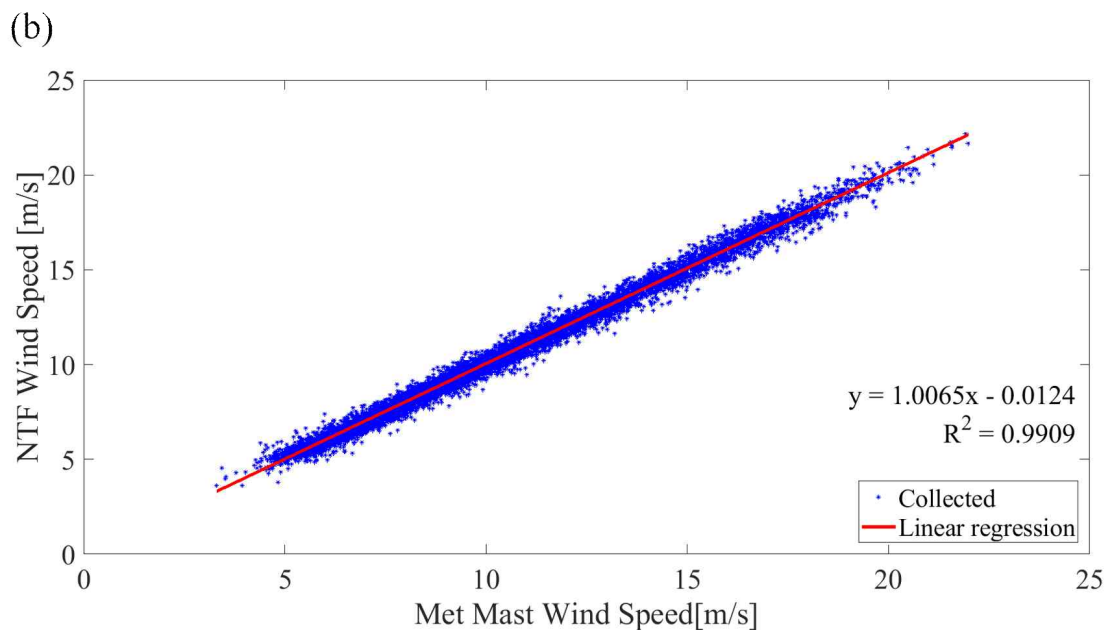
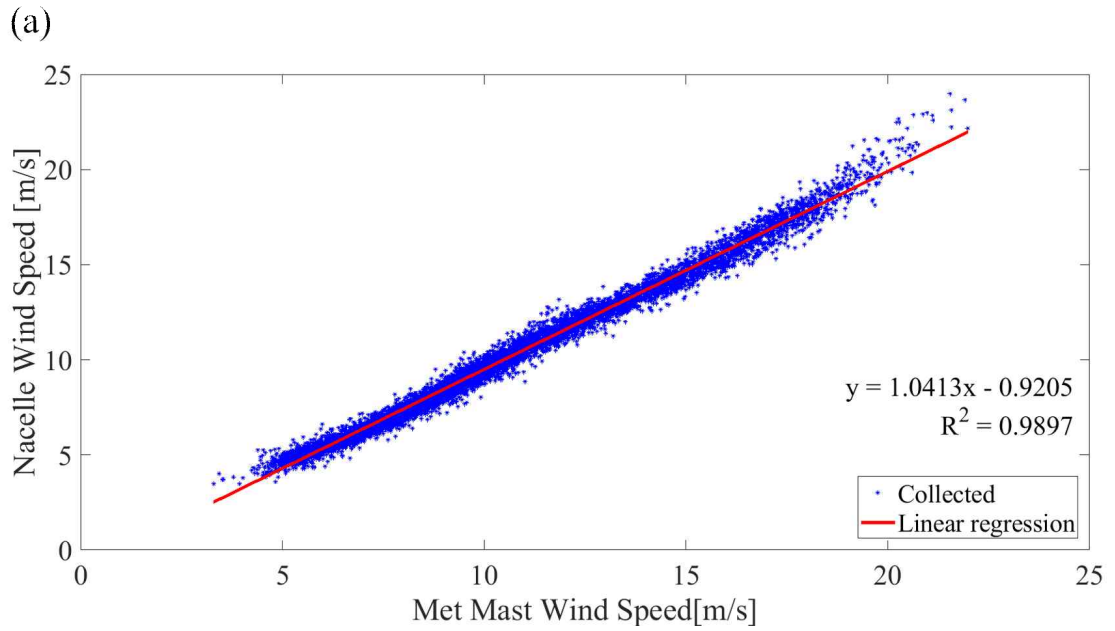


Fig. 7 Nacelle wind speed versus met. mast measurement(a: before NTF, b: after NTF)

2.3. 풍속 정규화

풍력터빈의 출력은 공기밀도의 영향을 받으며 공기밀도는 풍력터빈 주변 환경(온도, 대기압, 습도 등)에 따라 변화하기 때문에 풍력터빈의 출력성능을 평가하거나 분석하기 위해서는 기준이 되는 공기밀도에 따른 풍속과 출력으로 보정해야 한다. 본 연구에서는 기상탑에 설치된 온도계와 대기압계, 습도계에서 측정된 값을 가지고 아래식을 이용하여 수집된 10분 데이터의 공기밀도를 계산하였다[22].

$$\rho_{10\min} = \frac{1}{T_{10\min}} \left[\frac{B_{10\min}}{R_0} - \phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 $\rho_{10\min}$ 은 10분 평균 공기밀도이며 T는 절대온도, B는 대기압, R_0 는 건조한 공기의 기체상수(287.05J/kgK), ϕ 는 상대습도, P_w 는 증기압 $0.0000205e^{0.0631846T}$, R_w 는 수증기의 기체상수(461.5J/kgK)이다.

일반적으로 기준이 되는 공기밀도는 표준공기밀도를 사용하는데 식 (4)를 이용하여 계산된 공기밀도와 표준공기밀도를 적용하여 다음과 같이 측정 풍속을 표준공기밀도에 대해 정규화할 수 있다[22].

$$V_n = V_{free} \times \left(\frac{\rho_{10\min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (4)$$

여기서 ρ_0 는 표준공기밀도(1.225kg/m³)이다.

풍속 정규화까지 완료된 데이터의 변화를 다음 Fig. 8 과 같이 비교해보았다. Fig. 8(a)는 NTF를 적용하기 전 SCADA의 풍속 데이터로, 행원기상탑의 풍속 데이터보다 다소 낮은 경향을 보여준다. Fig. 8(b)는 NTF와 풍속 표준화를 적용한 데이터로, 자유풍속이 예측되어 행원기상탑과 거의 흡사한 경향을 보여준다.

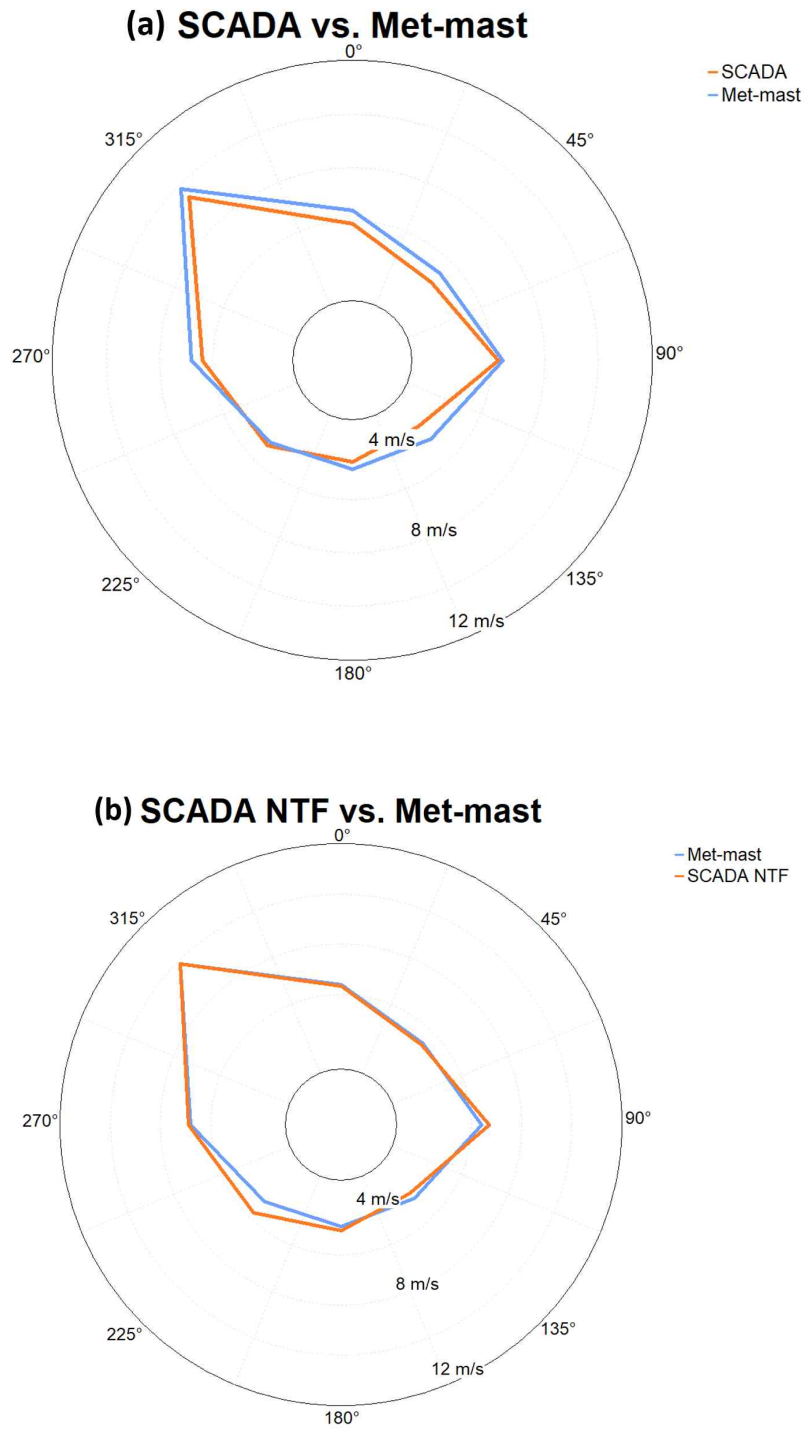


Fig. 8 Windrose (a: before NTF, b: after NTF)

III. 풍력터빈 운전특성

1. 풍속별 운전특성

풍력터빈의 풍속별 운전특성을 살펴보기 위해 풍속보정이 완료된 데이터를 이용하여 풍력터빈의 출력, 회전수, 피치각 변화 및 주요 부품의 온도 변화를 확인하였다. 풍속별 분석은 빈 구간법(method of bin)을 이용하여 풍속 0.5m/s 구간으로 구분하여 각 풍속구간별 평균값을 사용하였다. 분석에 사용된 데이터는 수집된 데이터 중 출력이 발생하는 풍속영역(4~25m/s)에 대한 데이터를 사용하였고, 해당 영역에서 풍력터빈이 정지 혹은 가동중 일시 정지하거나 시동구간이 아닌 풍속에서 재가동되는 상태의 데이터는 제외하였다.

1.1 풍속별 출력 변화

Fig. 9는 분석한 풍력터빈의 풍속별 10분 평균 출력변화를 보여주고 있는 것으로 전체적으로 제조사에서 제시한 풍속별 출력경향을 잘 따르고 있으나 풍속 10 m/s 이하에서는 다소 낮은 출력을 보여주고 있다. 측정된 풍력터빈의 출력곡선은 설치된 지역적 환경 및 풍황조건에 영향을 받으며 시스템 제조사가 시제품을 측정한 환경과 다르므로 제조사 출력곡선과 반드시 일치하지는 않는다[28].

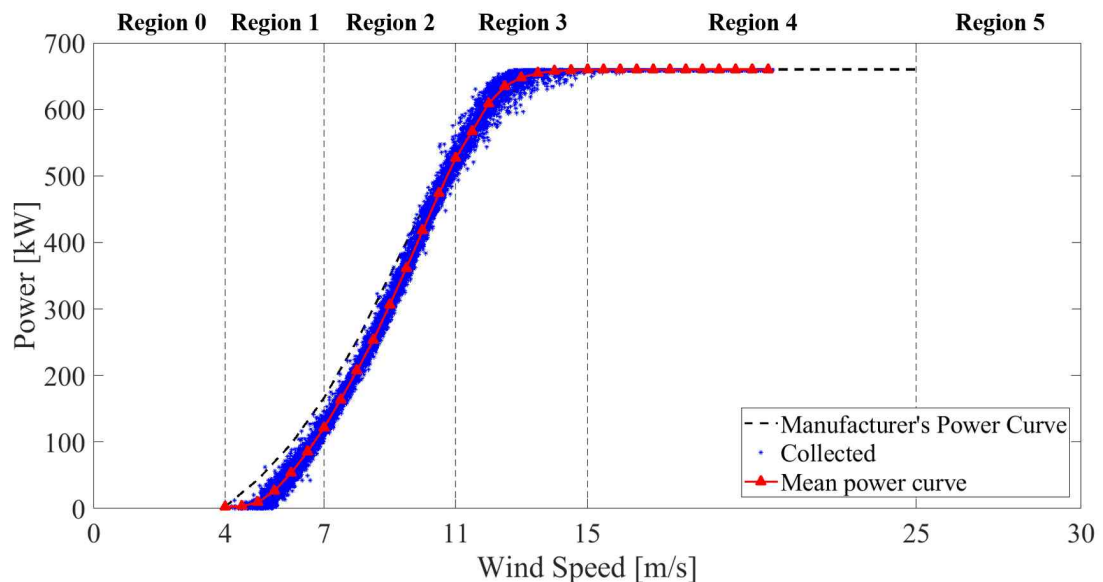


Fig. 9 Power curve, power versus wind speed

분석 풍력터빈의 출력구간은 4~25m/s로 출력구간 전후 영역을 포함하여 전체 영역을 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 6개의 운전영역으로 구분하여 분석하였다. Region 0은 풍속이 낮아 운전되지 않는 영역으로 시동풍속 구간까지 해당된다. 이때 풍력터빈의 로터는 28RPM 미만으로 회전하면서 시동 가능한 풍속조건을 기다리게 된다. Region 1은 전력 생산을 시작하는 구간으로 시스템 제어는 로터 회전수에 의존하여 출력을 위한 준비를 하게 된다. 유도발전기를 사용하는 정속형 풍력터빈의 경우 풍속이 지속적으로 상승하지 않으면 시동 시점에서 전력을 다소 소모한다. Fig. 9 에서 시동풍속 구간에서 다소 낮은 출력을 보이는 것이 이러한 영향을 일부 반영하고 있다. Region 2는 풍속 상승에 따라 출력이 가파른 상승을 하는 구간으로 풍력터빈 출력효율이 가장 좋은 구간이다. Region 3은 정격출력에 도달하기 이전 천이(transition) 구간으로 블레이드 피치를 상승시켜 출력을 제어하기 시작한다. Region 4는 정격출력 구간으로 블레이드 피치제어를 통해 바람을 흘려보내면서 종단풍속인 25m/s까지 풍력터빈의 정격출력을 유지한다. Region 5는 종단풍속 이후의 구간으로 풍속이 25m/s를 넘어서면 풍속이 종단풍속 이하로 낮아질 때까지 풍력터빈의 가동을 일시정지한다. 이 때 블레이드는 피치각을 대기상태인 페더링(feathering) 각도(83°~90°)로 변경하여 바람에 의한 로터회전을 중지한다.

1.2 풍속별 회전수 및 피치 변화

정속형 풍력터빈의 풍속별 로터 회전수와 발전기 회전속도를 살펴보았다. Fig. 10은 분석 풍력터빈의 풍속별 10분 평균 로터 회전수이며, Fig. 11은 풍속별 발전기의 회전수이다. 발전기의 회전수는 증속기에 의한 로터 회전수에 비례하므로 로터회전수 변화와 비교하여 변화경향은 큰 차이가 없다. 다만 일반적으로 정속형 풍력터빈은 1~2%정도의 슬립(slip) 구간에서 출력을 발생하나 본 연구에서 분석한 Vestas사의 660kW 풍력터빈은 발전기 회전수가 평균 약 1800~1870 rpm(순간 최대 회전수는 1980 rpm) 구간에서 변화하고있어 보다 넓은 회전수 변화 구간을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 급격한 풍속변동에 의한 영향을 줄이기 위한 방식으로 보고되고 있다.[29]

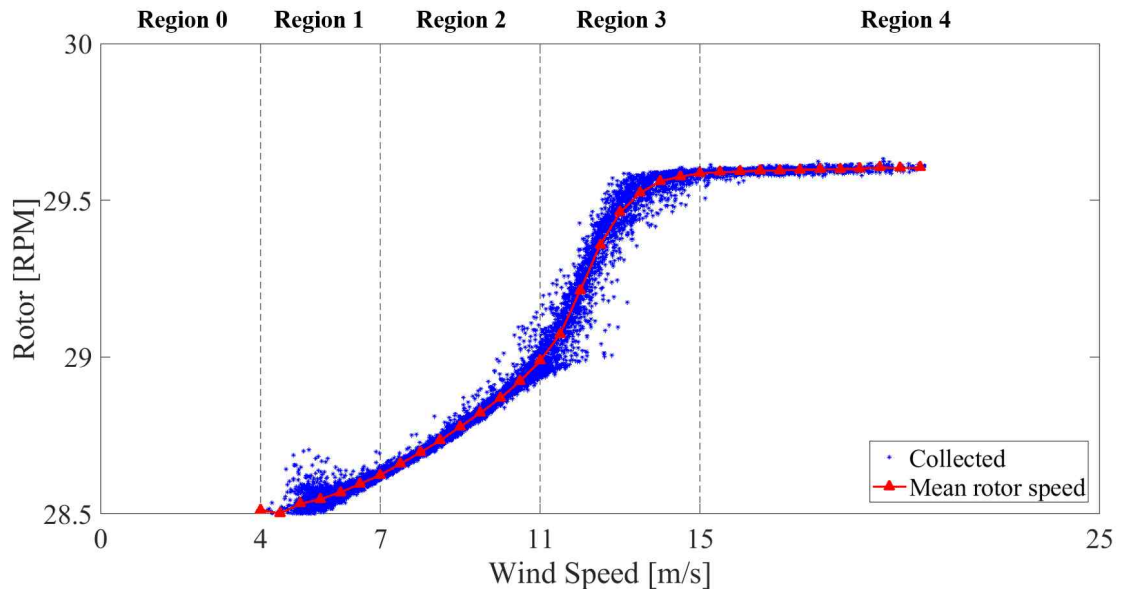


Fig. 10 Wind Speed Versus Rotor RPM

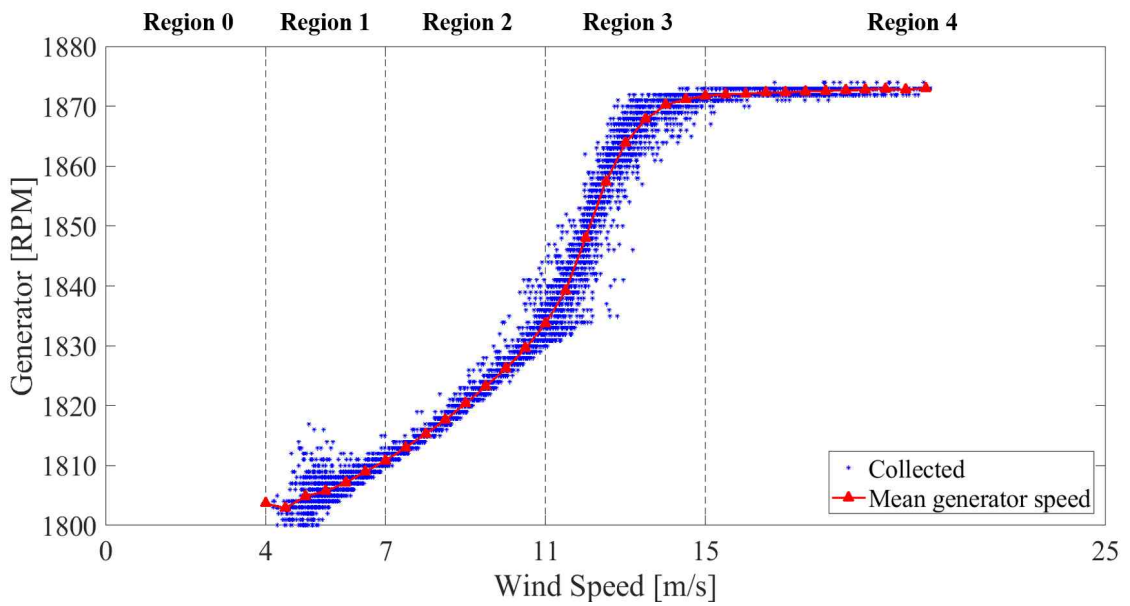


Fig. 11 Generator RPM versus wind speed

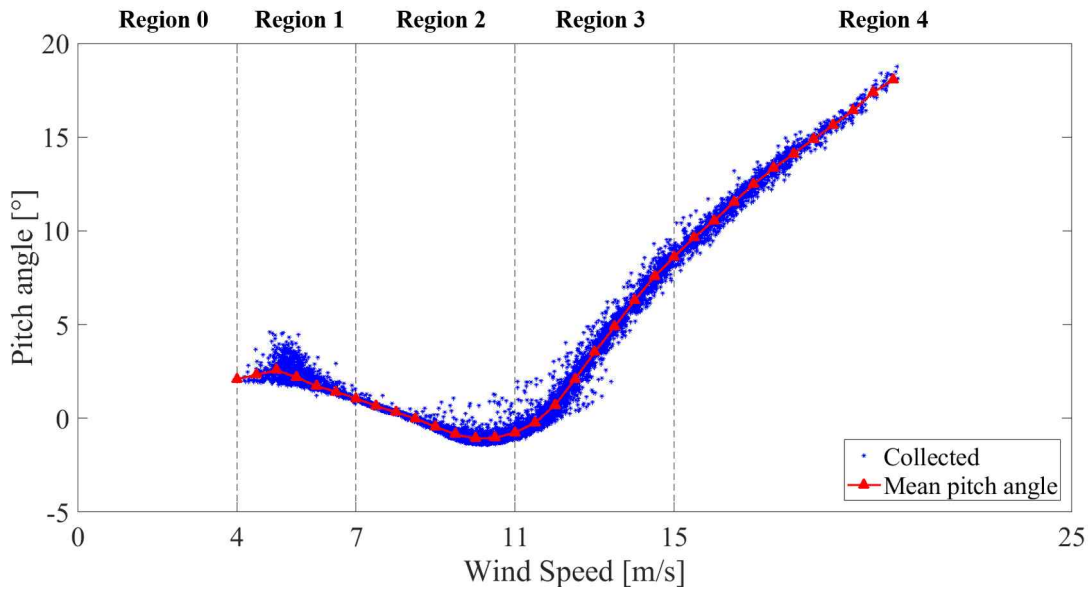


Fig. 12 Pitch angle versus wind speed

Fig. 12는 분석한 풍력터빈의 풍속별 피치각 변화를 보여주는 것으로 일반적인 풍력터빈이 천이 구간에서 피치제어를 시작하여 정격풍속 이상에서 피치제어를 통해 출력을 일정하게 유지하는 것과 달리 본 연구에서 분석한 풍력터빈은 정격 풍속 이하에서도 피치제어를 하고 있음을 알 수 있다. 이는 높은 슬립구간을 가짐으로써 얻을 수 있는 회전속도 변화를 통해 정속형 풍력터빈의 단점인 저풍속 구간에서 풍속별 최적의 회전수에 대응하지 못하여 발생하는 낮은 풍속 에너지 효율을 증가시키기 위한 것으로 보인다. 특히 시동구간 Region 1에서 피치각이 상승하는 이유는 부족한 기동토크를 보상하기 위하여 블레이드의 추력을 증가시키기 위해 피치각을 최대 약 5°까지 상승시키고 있다[29]. Region 1에서 상승한 피치각은 출력효율을 높이기 위해 Region 2에서 점차 각도를 낮추고 있으며 로터와 발전기 회전수가 급격히 상승하는 약 11m/s(Region 3) 지점에서 변곡점을 보이면서 피치각이 상승하고 있다.

1.3 풍속별 주요 부품의 온도 변화

풍력터빈의 운전 중 주요 부품의 온도상태를 확인하기 위하여 풍속에 따른 기어오일의 온도분포와 고속축(HSS: high speed shaft) 베어링의 온도분포를 분석하였다. 기어박스과 고속축 베어링의 경우 고속회전과 운전 중 지속적인 기계적

인 마찰로 인해 발열량이 많은 부품으로 고장 발생 확률이 높은 요소들이다.

Fig. 13은 운전 중 풍속에 따른 기어오일의 온도분포를 보여주고 있다. Region 1에서 평균 약 50℃를 시작으로 서서히 상승하다가 풍속 8m/s(Region 2)에서부터 상승폭이 커지면서 정격풍속 이전까지 상승하고 있다. 정격풍속 구간에서는 최대 80℃에 가까운 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 운전 중 80℃이상의 온도가 지속적으로 발생하는 경우 이는 기어박스내부에 문제가 있는 것으로 생각할 수 있으며, 윤활상태 혹은 냉각계열을 확인하거나 기어오일 분석 및 기어박스 내부에 대한 점검이 필요하다.

Fig. 14는 고속축 베어링의 풍속별 온도분포를 보여주고 있다. 고속축 베어링은 타 부품들에 비해 고속회전을 유지하는 부품으로, 고속회전으로 인해 기어오일의 온도분포보다 높은 최소 60℃에서 최대 90℃까지의 온도분포를 보여준다.

Region 1에서 평균 70℃까지 상승하고 그 이후에는 완만히 상승하고 있는 모습을 확인할 수 있다. 고속축 베어링의 경우 고속회전에 기인하여 터빈이 운전하는 동안 상시 높은 온도를 유지하므로 풍력터빈 운전시 주요 관심 대상이다.

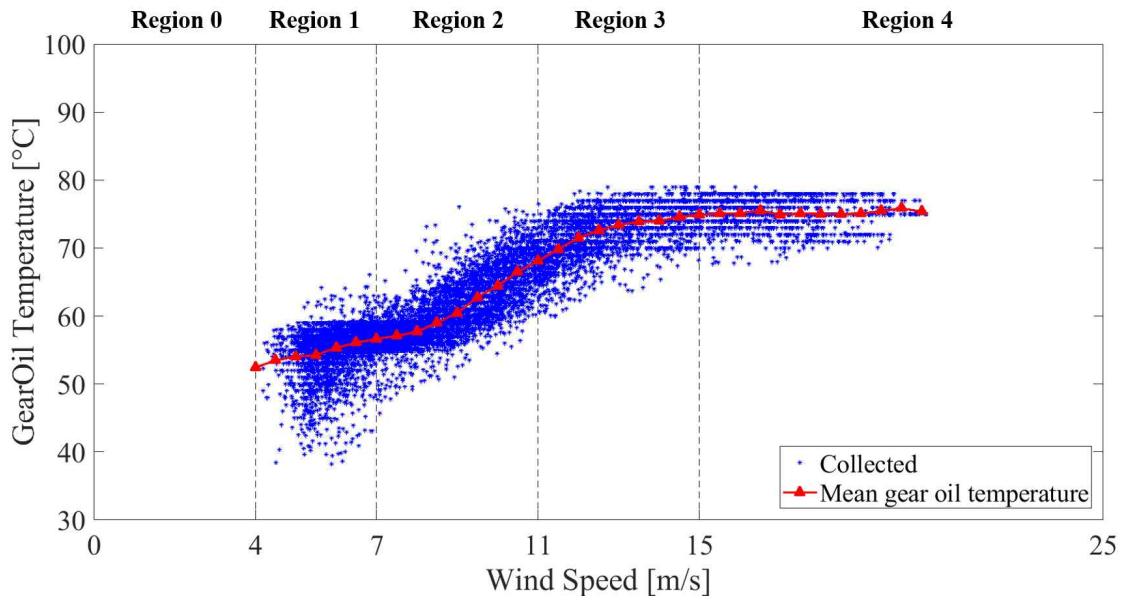


Fig. 13 Gear oil temperature versus wind speed

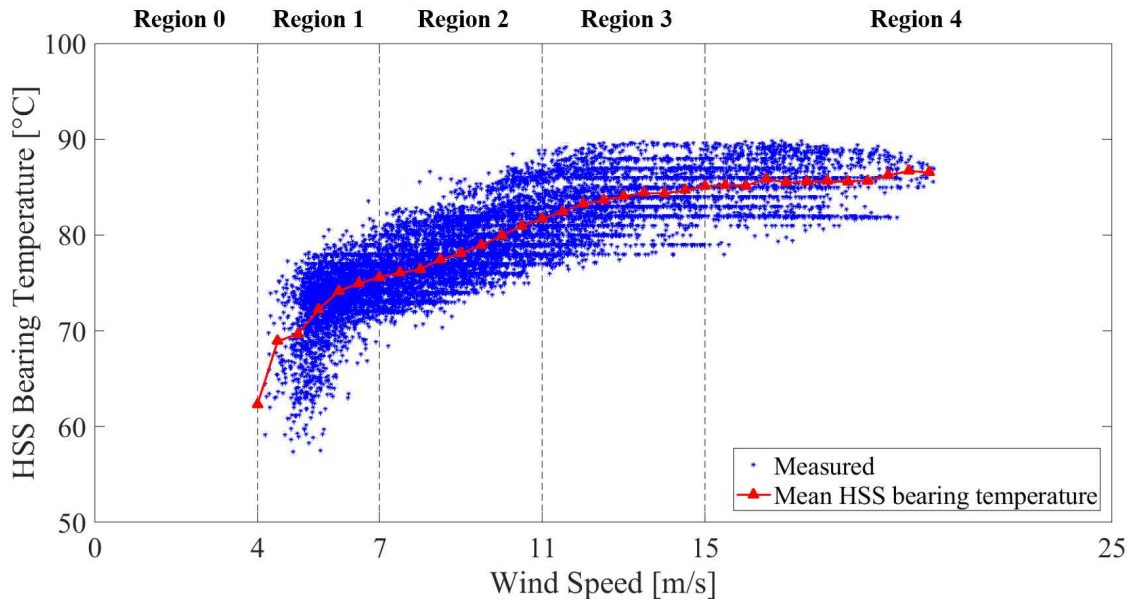


Fig. 14 HSS bearing temperature versus wind speed

2. 주요부품 교체 후 운전특성 변화

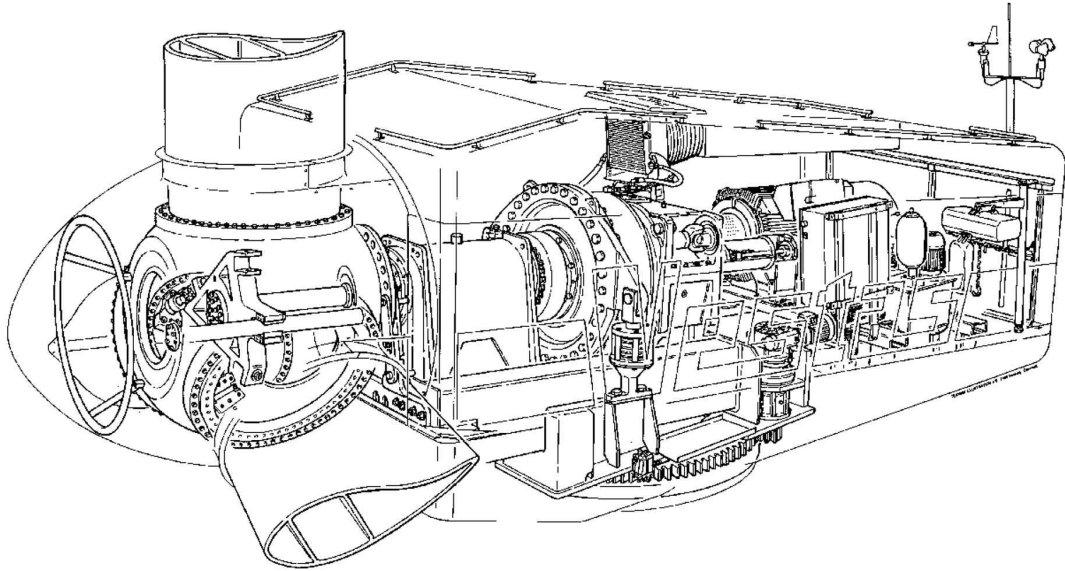


Fig. 15 Nacelle design drawing of Vestas V47 version [29]

분석대상 풍력터빈은 2017년 7월 풍력터빈의 주요 부품인 기어박스의 노후화로 인한 이상현상이 발생하여 2017년 8월 보수를 시행하였다. 보수는 기어박스, 발전기, 블레이드 등 주요 부품들을 교체 하였다.

주요 부품 교체 후, 교체 이전 풍력터빈의 데이터와 어떠한 차이가 있는지 확인하기 위해 보수를 완료한 2017년 10월부터 2018년 5월까지의 데이터를 사용하여 풍속별 운전특성을 파악하고 먼저 파악했던 2017년 1월부터 6월까지의 운전특성과 비교하였다.

주요 부품 교체 후 획득한 데이터에 대해 앞서 행했던 풍력터빈의 풍속별 운전특성을 파악한 것과 같이 데이터 처리를 진행하였다. 동일 위치이기 때문에 같은 유효방위각을 적용하고, 인근 기상탑의 풍속 데이터를 이용하여 풍력터빈의 자유단 풍속을 예측하고 표준공기밀도에 대한 풍속 정규화를 수행하였다. 이에 풍속 정규화를 완료한 데이터를 0.5m/s 간격으로 빈 평균하여 출력, 회전수, 피치각에 대하여 주요 부품 교체 전 데이터와 비교하였다. 비교데이터는 풍속 데이터를 기준으로 1 m/s 간격으로 평균한 데이터를 Table 4와 Table 5를 통해 확인할 수 있다.

Table 4 Data table before maintenance

Bin	Count	Wind speed	power	power coefficient	Turbulence	Rotor RPM	Generator RPM	Pitch
4	17	4.35	2.26	0.0259	0.20	28.50	1802.47	2.25
5	799	5.21	14.82	0.0987	0.13	28.54	1805.09	2.44
6	1986	5.99	53.45	0.2339	0.09	28.57	1807.14	1.76
7	1638	6.99	121.40	0.3345	0.09	28.62	1810.86	1.06
8	1491	8.00	206.64	0.3803	0.10	28.70	1815.24	0.33
9	1447	8.98	304.77	0.3962	0.11	28.78	1820.30	-0.43
10	1269	9.98	415.96	0.3943	0.11	28.87	1826.12	-1.04
11	925	10.99	523.74	0.3717	0.10	28.99	1833.83	-0.73
12	846	12.02	607.84	0.3295	0.10	29.22	1848.36	0.80
13	705	12.97	646.83	0.2787	0.10	29.45	1863.31	3.47
14	502	14.02	657.57	0.2246	0.10	29.56	1870.06	6.29
15	460	14.94	659.44	0.1862	0.10	29.58	1871.69	8.53
16	433	15.99	659.83	0.1519	0.11	29.59	1872.11	10.52
17	390	16.98	659.89	0.1269	0.12	29.60	1872.35	12.41
18	281	17.90	659.89	0.1082	0.12	29.60	1872.58	14.02
19	126	18.97	659.90	0.0910	0.13	29.60	1872.73	15.58
20	62	19.91	659.90	0.0787	0.13	29.60	1872.89	17.21
21	3	20.60	659.87	0.0710	0.12	29.61	1873.00	18.45

Table 5 Data table after maintenance

Bin	Count	Wind speed	power	power coefficient	Turbulence	Rotor RPM	Generator RPM	Pitch
4	2	4.44	-0.79	-0.0085	0.07	28.33	1792.30	2.09
5	517	5.22	0.66	0.0044	0.09	28.41	1797.55	2.85
6	2274	6.00	42.55	0.1857	0.11	28.52	1804.49	2.13
7	2325	6.98	115.41	0.3188	0.11	28.62	1810.84	1.13
8	2156	7.98	202.17	0.3739	0.12	28.69	1815.54	0.40
9	1905	9.00	313.04	0.4039	0.12	28.78	1821.29	-0.41
10	1702	9.95	420.18	0.4009	0.12	28.88	1827.15	-0.92
11	1481	11.01	522.25	0.3687	0.12	29.00	1835.10	-0.64
12	1462	11.97	602.28	0.3307	0.11	29.21	1848.43	0.70
13	1086	13.00	642.41	0.2750	0.11	29.43	1862.41	2.96
14	868	13.99	654.71	0.2251	0.12	29.54	1869.51	5.33
15	815	14.99	658.19	0.1838	0.12	29.58	1872.09	7.61
16	583	15.96	658.84	0.1524	0.12	29.59	1872.78	9.59
17	294	17.00	659.54	0.1264	0.13	29.60	1873.08	11.53
18	196	18.01	659.79	0.1063	0.13	29.60	1873.18	13.30
19	132	18.99	659.88	0.0907	0.13	29.61	1873.46	14.79
20	92	19.88	659.91	0.0790	0.13	29.61	1873.62	16.16
21	41	20.72	659.90	0.0698	0.14	29.62	1874.06	17.43
22	9	21.85	659.92	0.0596	0.14	29.62	1873.99	18.62

주요 부품 교체 전 데이터와 교체 후 데이터의 출력 및 출력계수를 비교하였다. Fig. 16은 출력곡선을 비교한 것으로 전체적인 경향은 상반기 데이터와 유사한 경향을 보인다. 출력곡선의 차이를 확인해보면, 4~8m/s에서 교체 후 데이터가 교체 전 데이터보다 시동풍속이 1m/s 정도 올라간 경향을 보이며, 10m/s 이후에는 거의 유사한 출력곡선을 보여주고 있다. 이를 출력계수를 통하여 추가적으로 확인하였다.

출력곡선에서 시동풍속의 변화를 Fig. 17의 출력계수를 통해 확인하면 5.5m/s에서 약 10% 정도의 차이를 보여주고 있어 시동풍속의 출력 생산이 다소 떨어진 것을 확인할 수 있다. 하지만, 8~11m/s 구간에서 교체 후 데이터가 교체 전 데이터보다 출력계수가 높은 경향이 보인다.

출력과 출력계수의 변화를 좀 더 확인하기 위해 회전수 및 피치각을 살펴보았다. 회전수는 로터와 발전기의 경향이 거의 일치하므로 로터 회전수를 기준으로 확인하였다. 로터 회전수를 통해 확인하면 7m/s 이상에서는 이전 데이터와 거의 일치하는 경향을 보이지만 그 이하의 구간에선 현저히 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 Fig. 16의 출력곡선과 같이 확인하면 풍력터빈의 시동구간(4~7m/s)에서 출력이 늦게 발생하여 로터의 정격 회전속도인 28.5 RPM까지 상승하는 구간이 늦춰진 것으로 보인다. 출력곡선에서는 5.5m/s까지 출력이 거의 생산되지 않는데 로터 회전속도가 해당 구간에서 정격회전수까지 증가하지 못하는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 19는 피치각을 비교한 것으로 주요 부품 교체 전 데이터에서는 5m/s에서 피치각이 잠시 상승하는 현상 확인되며, 주요 부품 교체 후 데이터에서는 5.5m/s에서 해당 현상이 확인되어 시동풍속에서의 피치제어가 다소 상승한 경향을 보여준다. 12m/s에서부터 출력 및 로터 회전속에서 확인하지 못한 특이한 사항이 피치각에서 확인되었다. 교체 후 피치각의 데이터가 교체 전 피치각에 비해 1° 가량 낮은 경향을 보인다.

Fig. 21과 Fig. 21은 기어오일과 고속축 베어링의 온도를 보여준다. 주요 부품 교체 전에는 급격하게 상승하고, 전체적으로 높은 온도를 보였으나, 교체 후 온도분포가 완만하며 낮은 온도를 유지하고 있다.

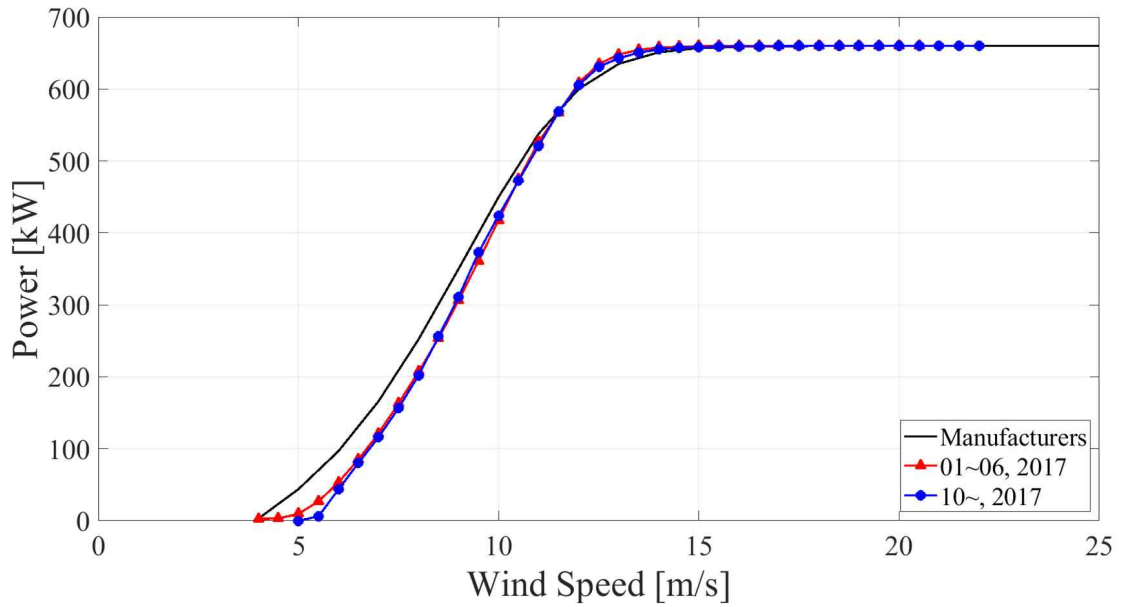


Fig. 16 Comparison of power curve between maintenance before, after

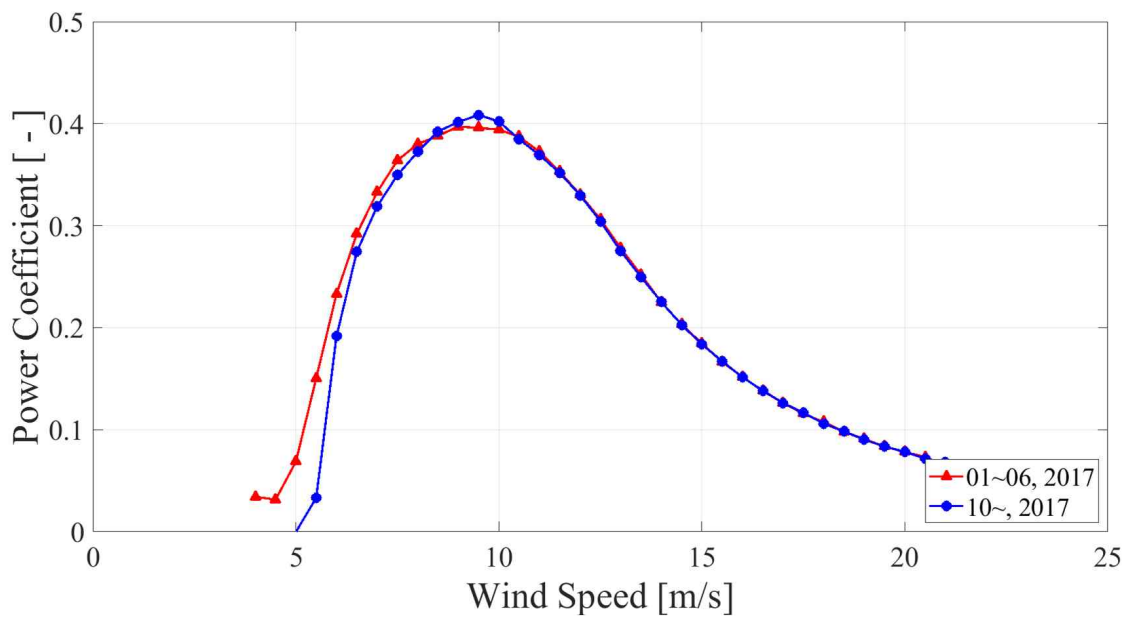


Fig. 17 Comparison of power coefficient between maintenance before, after

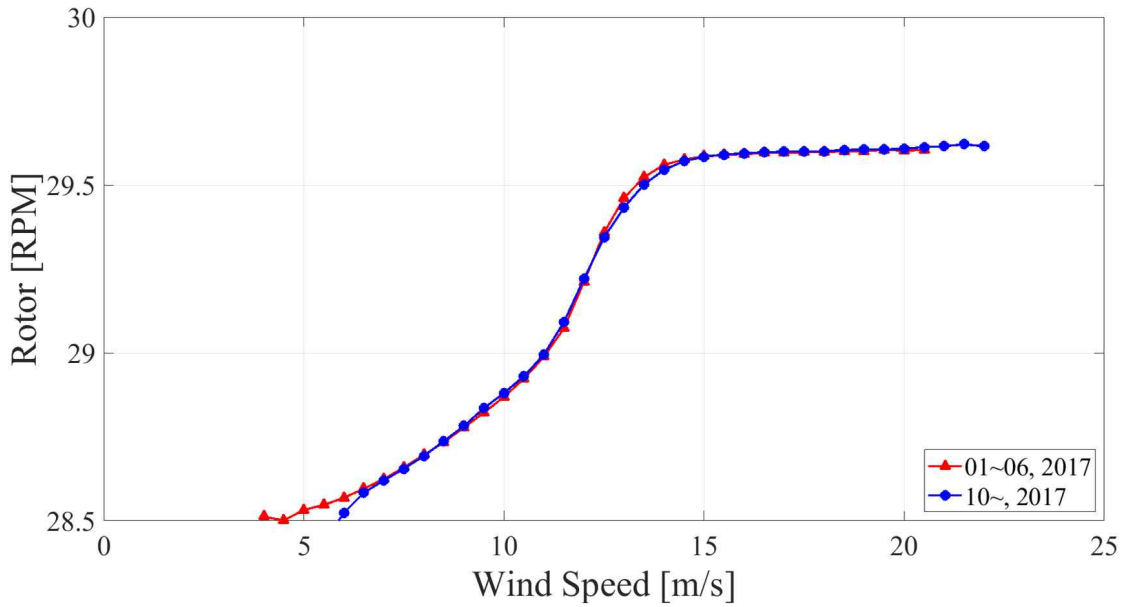


Fig. 18 Comparison of rotor rpm between maintenance before, after

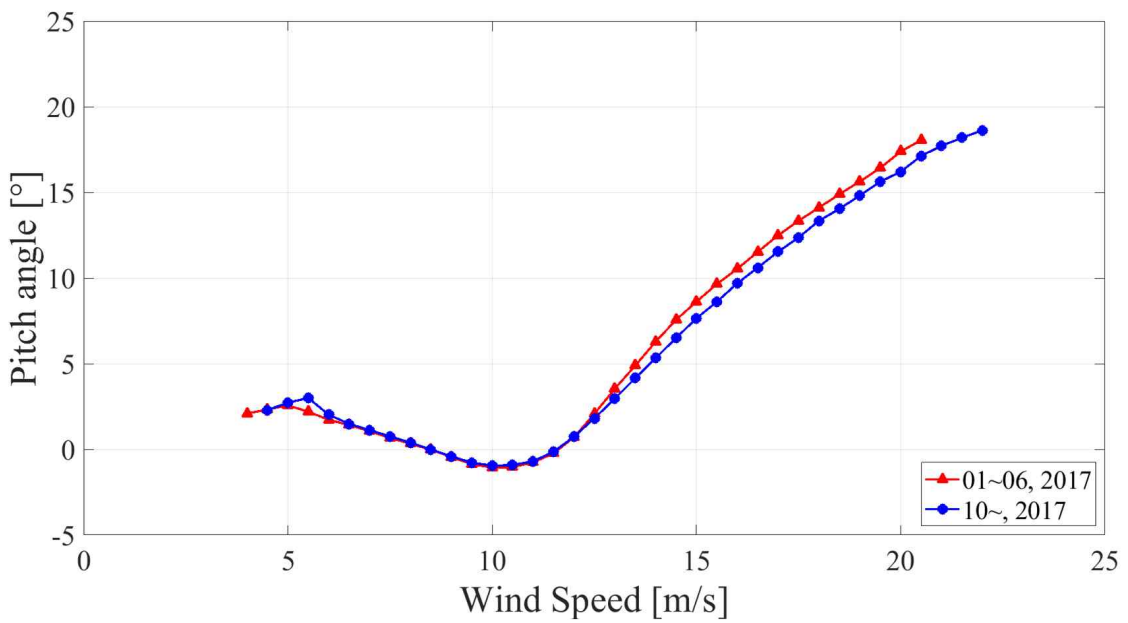


Fig. 19 Comparison of pitch angle between maintenance before, after

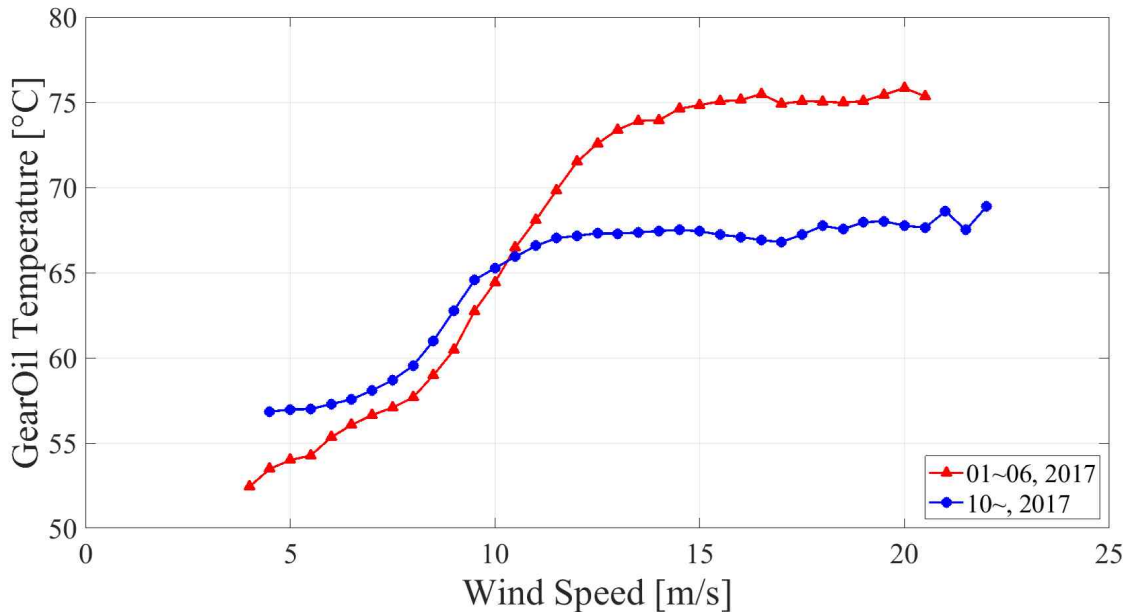


Fig. 20 Comparison of GearOil Temperature between HTI and LTI

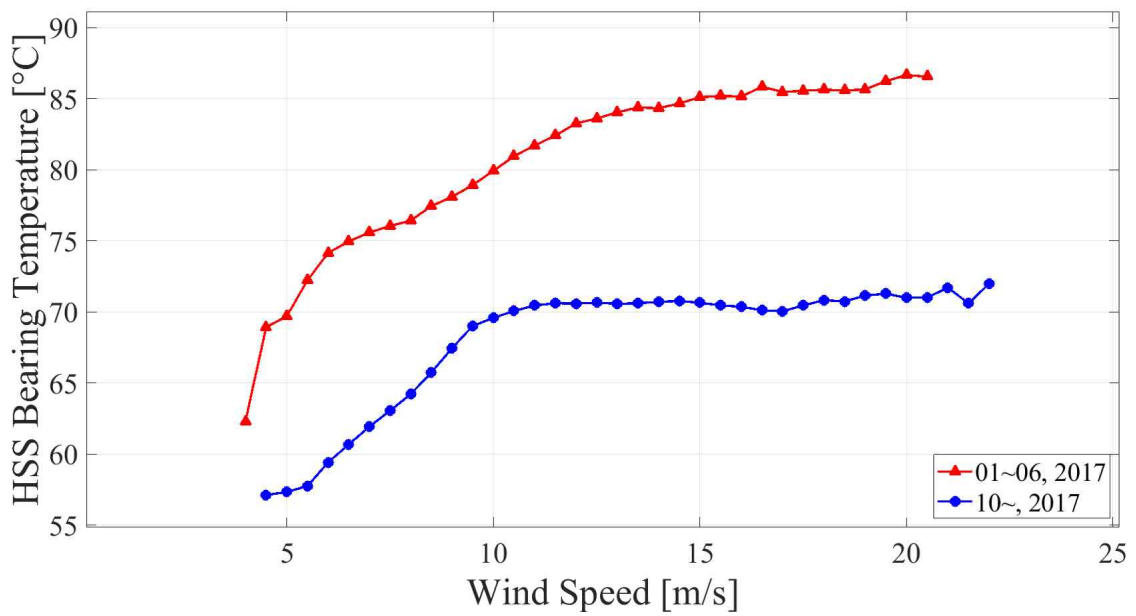


Fig. 21 Comparison of HSS Bearing Temperature between HTI and LTI

IV. 난류강도에 따른 영향

난류가 풍력터빈의 운전특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서는 난류의 세기를 정의한 난류강도를 계산해야한다. 난류강도는 일정시간 동안(본 연구에서는 10분 평균)의 풍속변화의 편차(σ)를 동일시간의 평균풍속으로 나누어준 값으로 다음과 같이 표현된다[23].

$$TI = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (5)$$

Fig. 22는 WTG 3의 데이터 수집기간 동안 식(5)에 의한 풍속별 난류강도 분포를 IEC 61400-1에 정의된 풍력터빈 클래스별 난류강도 곡선과 함께 보여주고 있다.

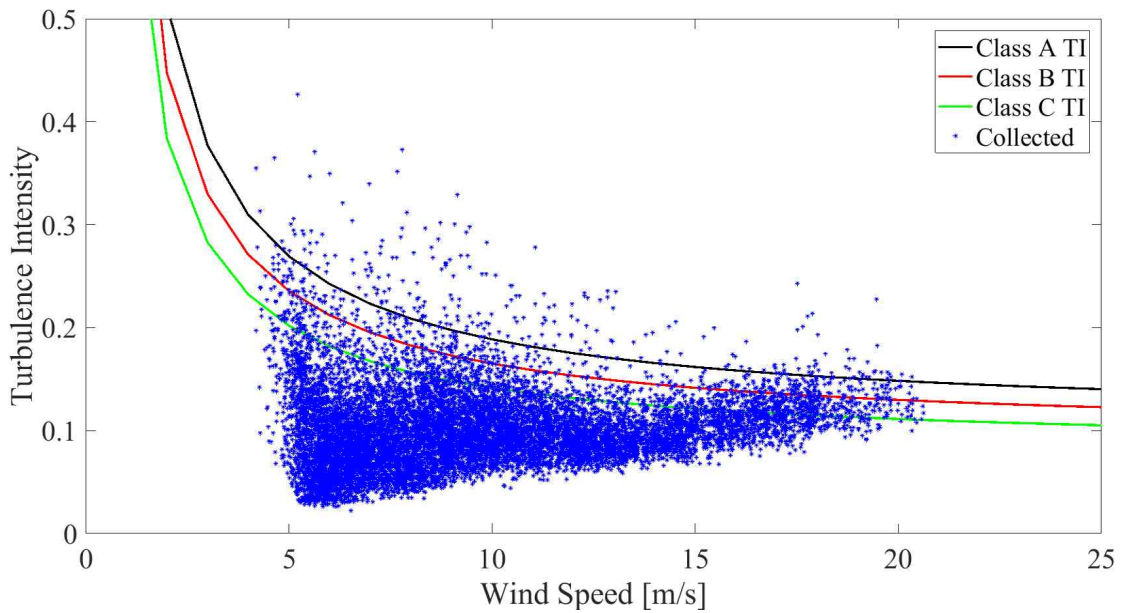


Fig. 22 Turbulence intensity versus wind speed

1. 난류의 분류

난류강도에 따른 풍력터빈의 운전특성 변화를 살펴보기 위해 Fig. 22의 전체 난류강도 데이터를 IEC61400-1(ed. 3rd)에서 제시된 정상난류모델(NTM: normal turbulence model)의 풍력터빈 클래스 C 난류특성 곡선에 의해 고난류(HTI: high turbulence intensity)와 저난류(LTI: low turbulence intensity)로 구분하였다. 난류강도의 경우 식 (5)과 같이 풍속편차에 대한 평균 풍속의 비율로서 동일한 값이더라도 풍속에 따라 그 크기의 정도가 다르므로 본 연구에서는 특정 난류강도 값을 기준으로 구분하지 않고 풍속별 난류강도 수준을 제시하고 있는 다음과 같은 정상난류모델을 기준으로 구분하였다[23].

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \times 0.9 \quad (6)$$

$$b = 5.6 \text{ m/s}$$

여기서 I_{ref} 의 경우 10분 평균풍속에서 허브 높이에 작용하는 난류강도의 값으로 풍력터빈 클래스별로 클래스 A인 경우 0.16이고 클래스 B인 경우 0.14, 클래스 C인 경우 0.12를 적용하고 있다. Fig. 13은 정상난류모델 클래스 C 곡선에 의해 분류된 난류강도의 분포를 보여주고 있다.

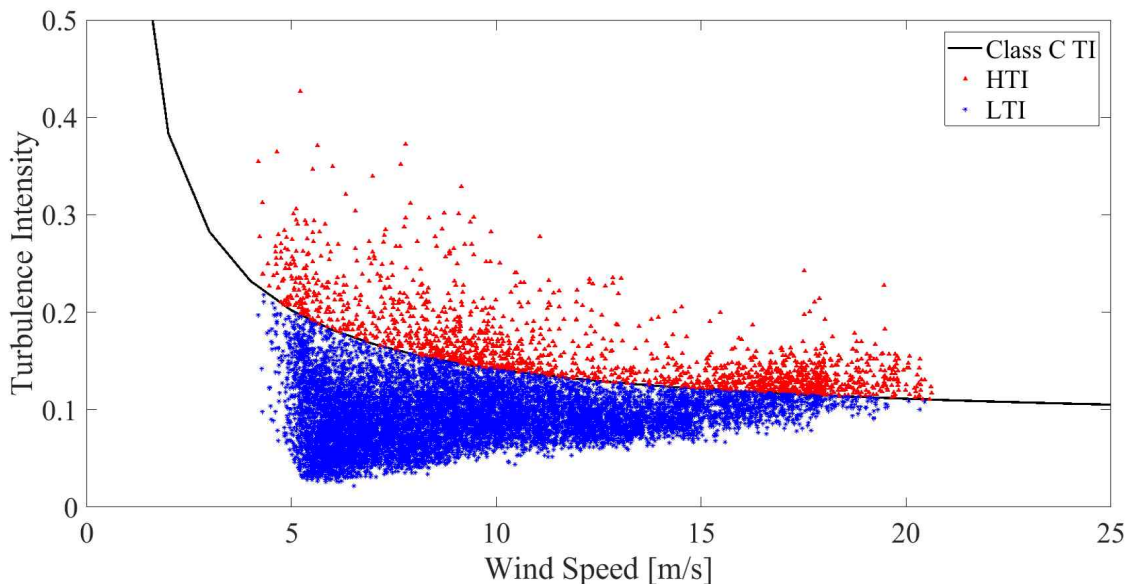


Fig. 23 Turbulence separation by the normal turbulence model of wind turbines class C

2. 난류강도에 따른 출력 변화

난류강도에 따른 출력변화를 살펴보기 위해 앞서 구분한 난류강도별로 각각의 출력을 비교하였다. 이를 비교하기 위해 IEC 61400-12-1의 ‘Method of bins’인 식(8)과 식(9)를 이용하여 빈 평균 데이터로 표현하였다.

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (7)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (8)$$

여기서 V_i 는 빈 i 에서의 평균 풍속이며, $V_{n,i,j}$ 는 빈 i 안에 데이터 셋 j 의 평균 풍속, P_i 는 빈 i 에서의 평균 출력이며, $P_{n,i,j}$ 는 빈 i 안에 데이터 셋 j 의 평균 출력, N_i 는 빈 i 에서 10분 데이터의 수 이다.

Fig. 24는 고난류와 저난류로 구분한 WTG3의 출력곡선을 보여주는 것으로 평균풍속 11m/s 이하의 Region 1과 2에서는 고난류와 저난류의 경우 차이를 보이지 않고 있으나 Region 3의 천이구간에서는 고난류에서 출력이 낮아지고 있음을 알 수 있다.

이를 확인하기 위하여 출력계수를 통해 살펴보았다. 출력계수는 일반적으로 전체 터빈 동력 시스템의 효율을 설명하는 데 사용되며 실제 생산한 출력과 터빈이 받는 바람의 힘으로 아래 식과 같이 계산된다.

$$C_{p,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (9)$$

여기서 $C_{P,i}$ 는 빈 i 에서 출력계수이며, P_i 는 빈 i 에서의 표준화된 평균 출력이며, V_i 는 빈 i 에서 표준화된 평균풍속, A 는 풍력터빈 로터의 회전면적, ρ_0 는 표준공기밀도이다.

Fig. 25의 풍속별 출력계수를 통해 살펴보면 Region 1과 2에서 난류가 높은 경우 출력계수가 조금 높은 경향을 보이고 있는 반면 Region 3에서는 출력계수가 낮아지고 있어 높은 난류강도는 저풍속구간에서 출력을 상승시키는 효과가 있으며 천이구간(Region 3)에서는 출력을 감소시키는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 정격출력 운전구간인 Region 4에서는 피치제어를 통한 출력제어로 난류강도에 따른 차이를 보이지 않는다. 이에 대하여 난류강도별 로터 회전수 변화와 블레이드 피치 변화를 통해 좀 더 자세히 살펴보았다.

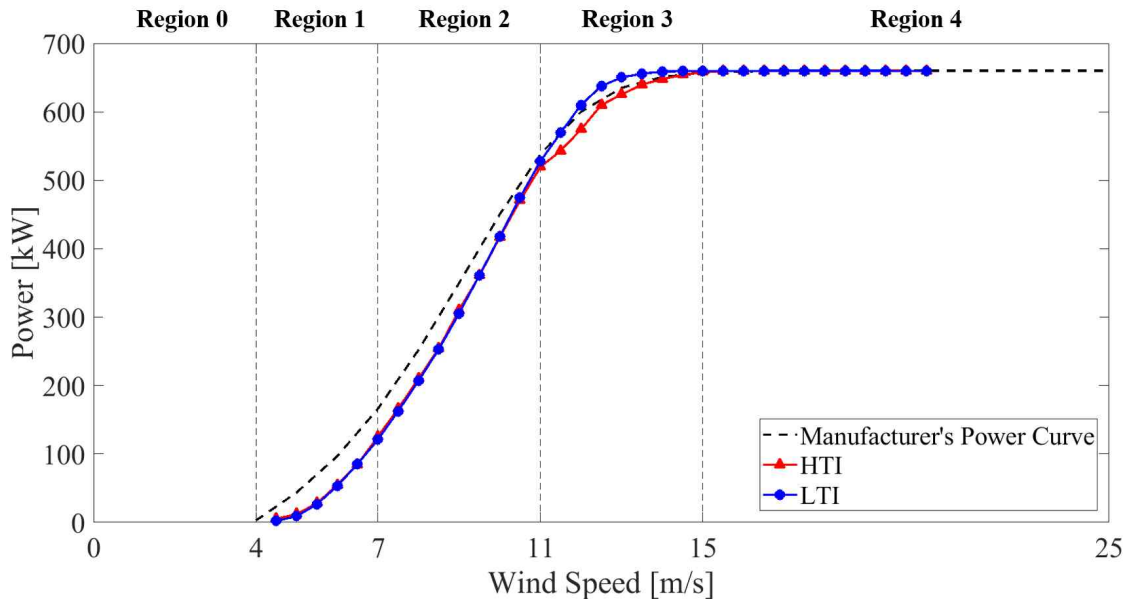


Fig. 24 Comparison of power curve between HTI and LTI

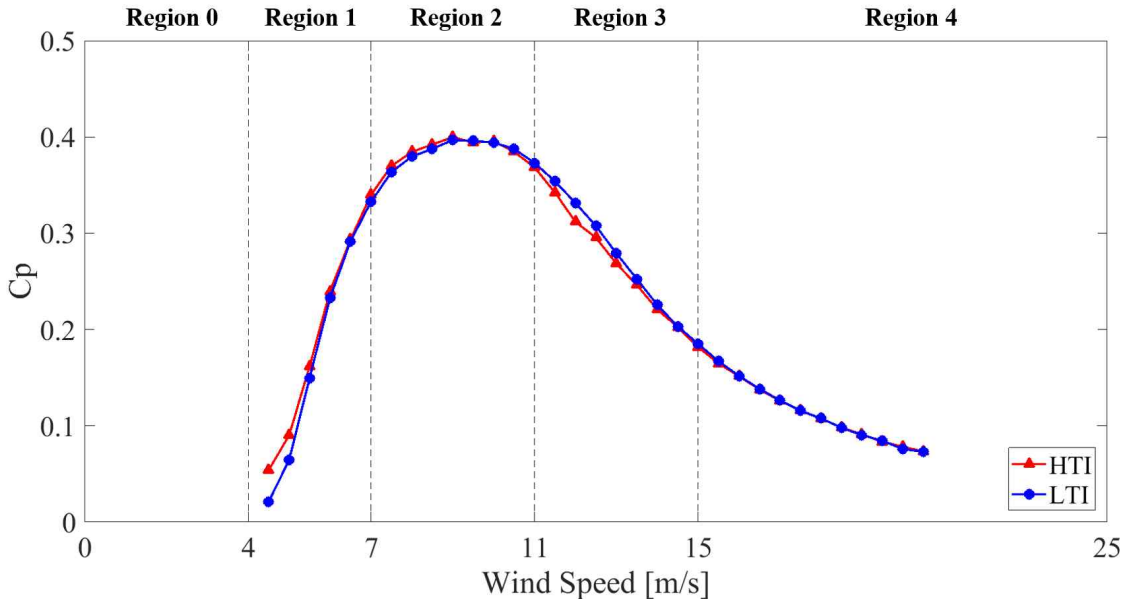


Fig. 25 Comparison of power coefficient between HTI and LTI

Table 6 Power performance and power coefficient between HTI and LTI

Bin	HTI		LTI	
	Power [kW]	Power coefficient	Power [kW]	Power coefficient
4	2.670	0.034	2.770	0.035
5	12.074	0.090	9.068	0.065
6	54.765	0.240	53.287	0.233
7	125.267	0.340	120.897	0.332
8	210.034	0.385	206.739	0.380
9	310.361	0.400	305.437	0.397
10	416.475	0.395	417.635	0.394
11	519.264	0.368	527.521	0.373
12	574.261	0.312	610.088	0.331
13	625.445	0.268	650.247	0.279
14	647.658	0.221	658.706	0.226
15	658.136	0.182	659.783	0.185
16	659.660	0.151	659.891	0.152
17	659.869	0.126	659.901	0.126
18	659.890	0.108	659.892	0.108
19	659.894	0.091	659.912	0.090
20	659.898	0.078	659.840	0.076

3. 난류강도에 따른 회전수 및 피치 변화

Fig. 26은 난류강도별 로터 회전수의 변화를 비교한 것이고 Fig. 27은 난류강도별 블레이드 피치각 변화를 비교한 것이다. 회전수에 의한 출력변화를 살펴보기 위해서는 발전기 회전수를 다루는 것이 타당하나 앞서 보았던 두 개의 회전수 변화 패턴이 유사하므로 블레이드 피치 변화와 함께 검토하기 위해 로터 회전수를 중심으로 분석하였다. 로터 회전수를 보면 고난류의 경우 평균풍속 약 10~12m/s에서 로터 회전수가 저난류의 경우보다 높으며 이에 따라 피치각도 높게 나타나고 있다. 반면 12~15m/s 구간에서는 로터 회전수가 저난류의 경우보다 낮음을 알 수 있다.

이를 에너지밀도의 관점에서 살펴보았다. 에너지밀도는 아래 식과 같이 계산된다.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (10)$$

여기서, WPD(Wind power density)는 바람의 힘을 이론적으로 계산한 것으로 단위는 W/m²이며 ρ 는 표준공기밀도, v 는 평균 풍속을 의미한다.

Fig. 28은 WTG 3의 난류강도별 에너지밀도를 비교한 것으로 풍력에너지 밀도는 풍속의 3승에 비례하므로 높은 난류강도를 가지는 바람은 다수의 높은 바람 성분으로 인해 저난류보다 높은 에너지 밀도를 보인다. 그러나, 정격출력구간에 가까운 천이구간에서 고난류 상태에서 출력이 낮아지는 이유는 고난류가 여전히 높은 에너지 밀도를 갖고 있지만 정격풍속보다 높은 다수의 바람을 포함하고 있기 때문이다. 이러한 난류성분 중 정격풍속 이상의 풍속은 상승된 피치제어로 인해 로터회전 증가에 영향을 주지 않고 난류 성분 중 낮은 풍속으로 인해 실질적인 에너지 밀도가 낮아지고 로터 회전수가 감소하여 출력이 낮아지는 것으로 보인다. 반면 저풍속 구간에서는 고난류가 저난류보다 높은 에너지 밀도로 인해 저난류에 비해 높은 회전수를 보여주고 있다.

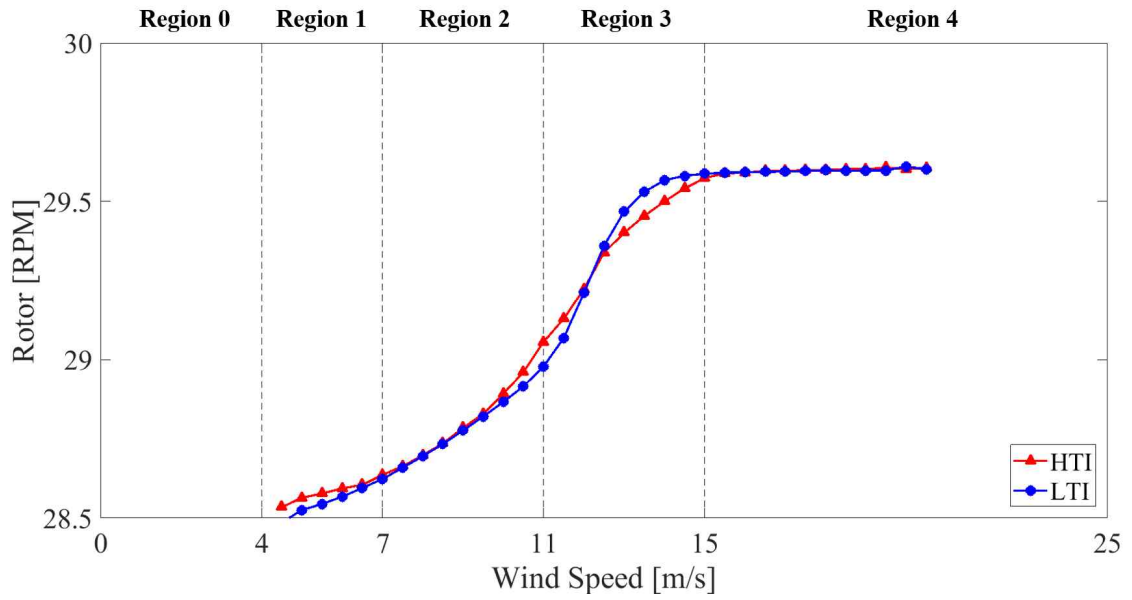


Fig. 26 Comparison of rotor RPM between HTI and LTI

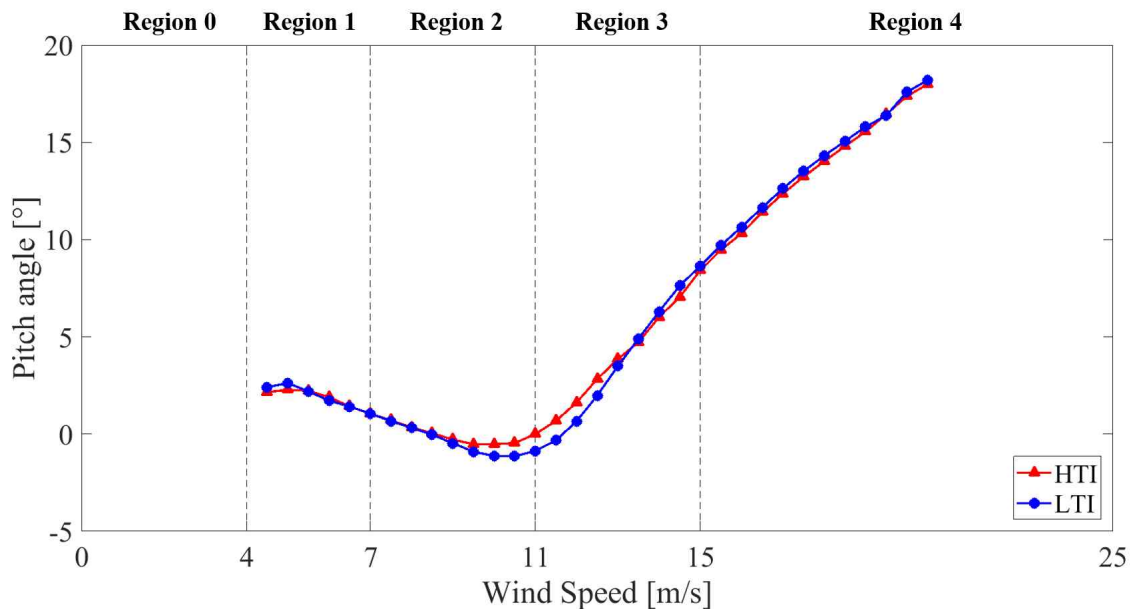


Fig. 27 Comparison of pitch angle between HTI and LTI

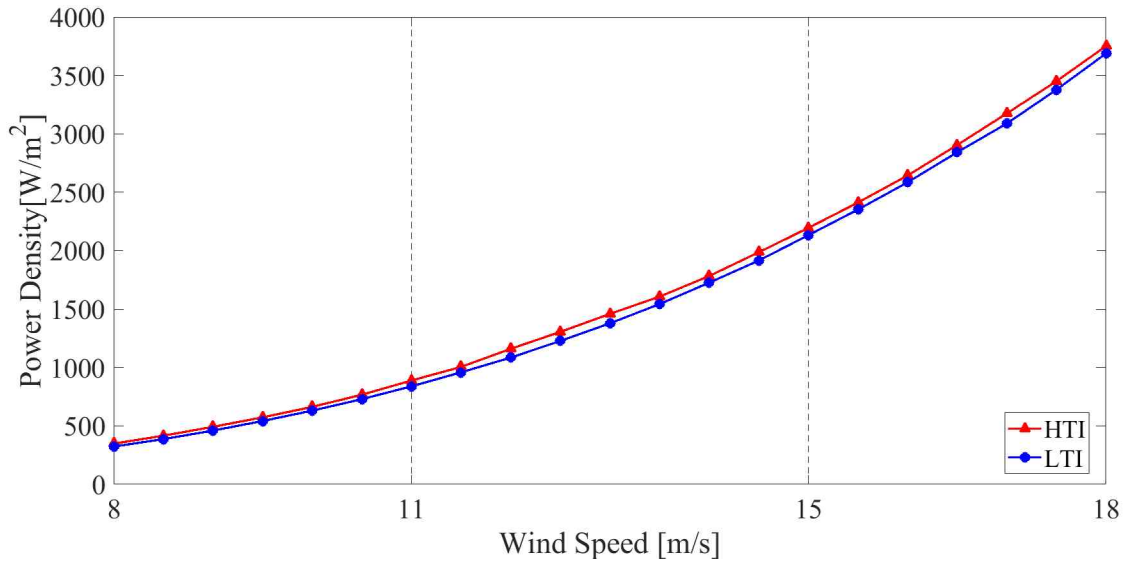


Fig. 28 Comparison of power density between HTI and LTI

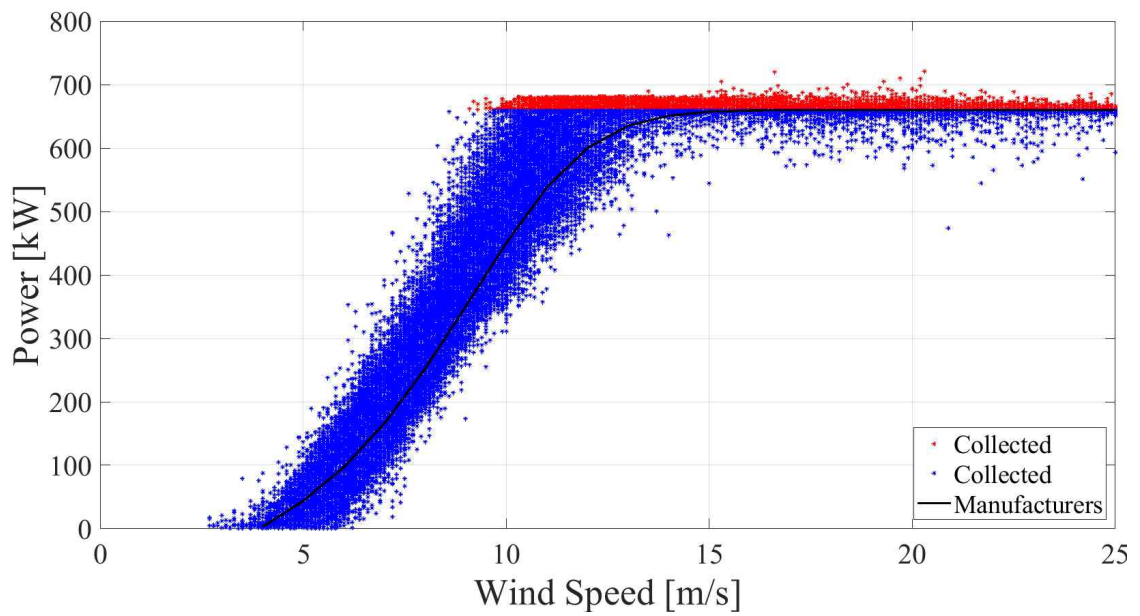


Fig. 29 Classification of components over 660 kW in 1 second data

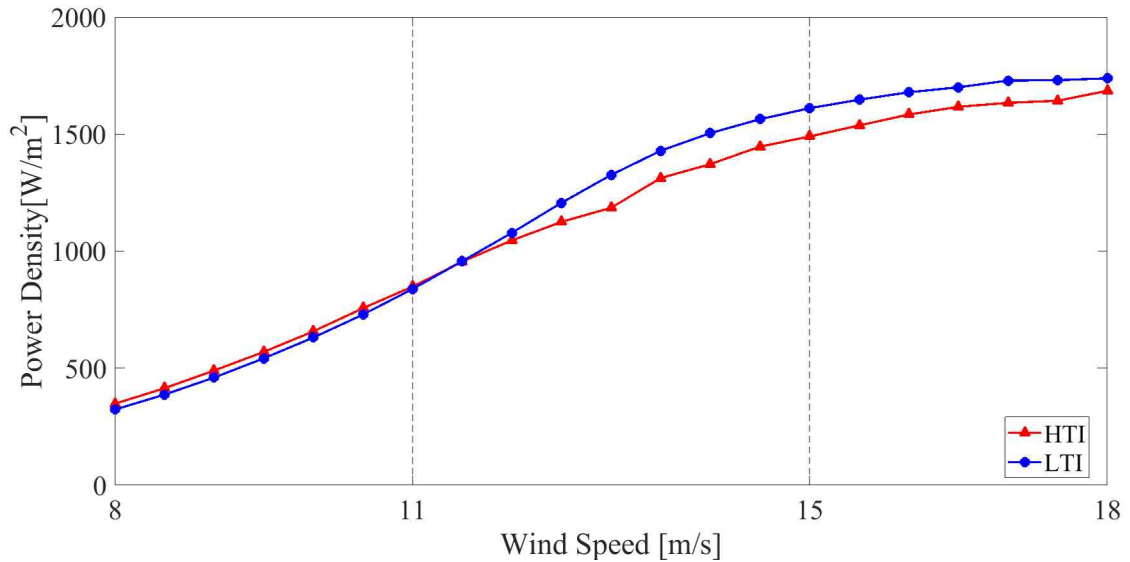


Fig. 30 Simulation of power density variation by rated wind speed control

이를 확인하기 위하여 앞서 언급한 가정을 기반으로 Fig. 29와 같이 10분 평균에 포함되는 1초 데이터의 난류 성분 중 정격풍속이상(WTG 3인 경우 15m/s)의 풍속을 제외하여 평균 에너지밀도 변화를 Fig. 30와 같이 시뮬레이션 하였다. 이를 살펴보면 Fig. 24에서 보았던 출력이 감소하는 풍속 약 11m/s 지점을 지나면서 고난류의 에너지밀도도 같이 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

이를 연간 에너지생산량(Annual energy production, AEP)을 통하여 비교하였다. 연간 에너지생산량은 풍속에 대한 확률 밀도함수와 풍력터빈의 출력곡선을 이용하여 식 (11)과 같이 산출된다. 풍속 확률 밀도함수는 일반적으로 와이블(Weibull) 분포 함수를 사용하고 있으며 형상계수(shape factor, k)가 2인 레일리(Raleigh) 분포 함수를 사용할 수 있다. 와이블 분포 함수는 독립변수가 두 개인 형상계수와 척도계수로 이루어져 있기 때문에 측정된 풍속 데이터로부터 독립변수들을 추정할 수 있다. 레일리 분포는 형상계수를 2로 고정하기 때문에 측정데이터가 필요없고 연평균 풍속으로부터 척도계수를 추정할 수 있다.

본 연구에서는 4m/s에서 10m/s까지의 연평균 풍속을 기준으로 레일리 분포를 생성한 후 이를 출력곡선에 대입하여 연간 에너지생산량을 산출하였다. 사용된 출력곡선은 상기 언급한 고난류 출력곡선과 저난류 출력곡선을 이용하였다. 와이블 확률 밀도 함수(weibull probability density function)[30] 식 (11)을 적용하려

면 해당 지역의 형상계수를 얻어야 하지만, 형상계수를 2로 가정하여 척도계수만의 식 (13)과 같이 레일리 확률밀도를 계산할 수 있다. 해당 데이터를 사용하여 연간 에너지생산량을 산출하기 위해 식 (14)를 사용하였다.

$$F(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{\bar{V}}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (11)$$

$$\bar{V} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (12)$$

$$F(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{\bar{V}^2} \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$AEP = 8760h \times \int_{cut-in}^{cut-out} [P(V) \times F(V)] \quad (14)$$

여기서, k는 형상계수이며 c는 척도계수, v는 풍속을 나타낸다. 해당 공식을 이용하여 산출한 결과는 Table 7, Fig. 31과 같다.

Table 7 Annual energy production between HTI and LTI

Annual wind speed [m/s]	HTI AEP [MWh/year]	LTI AEP [MWh/year]	Ratio [LTI AEP / HTI AEP]
4	296	287	0.9715
6	1,169	1,169	1.0000
8	2,172	2,192	1.0091
10	2,967	2,998	1.0104

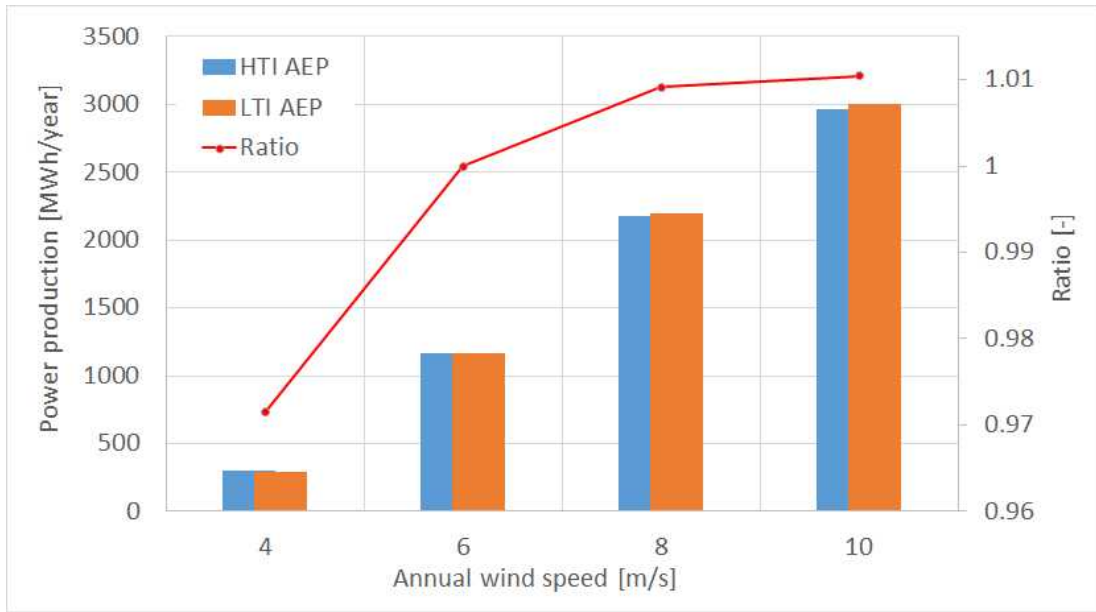


Fig. 31 Annual energy production using power curve of HTI and LTI

연간 에너지생산량을 확인한 결과, 연 평균풍속이 시동풍속인 4m/s에선 고난류가 저난류보다 연간 에너지생산량이 높으며, 연 평균풍속이 6m/s이상으로 올라갈수록 저난류가 고난류보다 높은 연간 에너지생산량을 보인다. 저풍속에서 고난류는 높은 에너지밀도를 갖기 때문에 저난류에 비해 높은 에너지생산량을 보이며 고풍속에선 고난류의 에너지밀도가 낮아지며 에너지생산량이 저난류보다 낮아짐을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 풍력터빈에서 수집된 운전 데이터 분석을 통해 풍력터빈의 운전특성과 난류에 따른 영향을 살펴보았다.

본 연구에서 분석한 660kW 풍력터빈의 경우 일반적인 정속형 풍력터빈의 슬립구간에 비해 넓은 범위의 슬립구간을 가지고 있으며 정속형 풍력터빈의 단점인 저풍속 구간에서의 낮은 풍속 에너지 효율을 증가시키기 위해 정격이하의 풍속구간에서도 피치제어를 하고 있음을 알 수 있었다. 또한 시동풍속 구간에서 기동토크를 높이기 위해 피치각을 상승하는 방법도 확인하였다. 주요 부품 온도변화 관찰을 통해 기어오일 온도의 경우 고풍속영역으로 갈수록 온도가 상승하고 있으나 정격구간에서는 일정하게 유지하고 있으며 고속축 베어링의 경우 고속회전으로 인해 상시 높은 온도 상태를 유지하였다.

분석대상 풍력터빈의 주요 부품들의 교체를 수행함으로써 교체 전·후의 데이터를 비교하였다. 시동풍속(4~7m/s) 구간에서 교체 후 데이터가 교체 전 데이터보다 출력이 낮지만 천이구간 및 정격구간에선 교체 전 데이터와 교체 후 데이터가 유사한 경향을 보이고 있다. 교체 후의 온도 데이터가 급격한 상승 없이 완만하며 교체 전보다 낮은 온도를 유지함으로써 주요 부품 교체 후 분석대상 풍력터빈이 많이 안정화된 것으로 보인다.

풍력터빈의 난류에 따른 영향분석을 위해 계산된 난류데이터를 고난류와 저난류 상태로 구분하여 각각의 상태에 대한 출력변화와 회전수, 피치각 변화를 분석하였다. 고난류의 경우 저풍속구간에서는 회전수가 증가하며 이에 따라 출력도 저난류인 경우보다 다소 높게 나타났다. 반면 고풍속영역으로 진입하는 천이구간(Region 3)에서는 회전수와 출력이 감소하였다. 이에 대해 풍속에 따른 에너지밀도를 분석하고 출력제어에 대한 에너지밀도 변화 시뮬레이션을 통해 고난류는 저난류에 비해 좀 더 많은 에너지를 가지고 있어 로터회전수의 증가와 이에 따른 출력상승을 유발함을 확인하였다. 이는 천이구간 이전 저풍속 영역(Region 1, 2)에 해당하며 천이구간에서는 정격풍속 이상의 바람과 그 이하의 바람이 혼재하여 이를 제어하는 과정에서 낮은 풍속영역에 대응하여 로터 회전수가 낮아지고

출력이 감소하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 풍력터빈 출력을 제어함에 있어 난류강도를 고려한 피치제어 방식이 필요해 보인다.

참고문헌

- [1] Erich Hau, 2006, Wind Turbines ed.2, Springer Berlin, pp. 495~503.
- [2] Ciaran Cooney, Raymond Byrne, Willian Lyons, Fergal O'Rourke, 2017, "Performance characterisation of a commercial-scale wind turbine operation in an urban environment, using real data", Energy for Sustainable Development, Vol. 36, pp. 44~54.
- [3] Francis Pelletier, Christian Masson, Antoine Tahan, 2016, "Wind turbine power curve modelling using artificial neural network", Renewable energy, Vol. 89, pp. 207~214.
- [4] Jeon, S. H., Go, Y. J., Kim, B. S., Huh, J. C., 2016, "Validation of the Eddy Viscosity and Lange Wake Models using Measured Wake Flow Characteristics Behind a Large Wind Turbine Rotor", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 40, No. 1, pp. 21~29.
- [5] Gustavo Oliveira, Filipe Magalhães, Álvaro Cunha, Elsa Caetano, 2018, "Continuous dynamic monitoring of an onshore wind turbine", Engineering Structures, Vol. 164, pp. 22~39.
- [6] Andrew Kusiak, Wenyan Li, 2011, "The prediction and diagnosis of wind turbine faults", Renewable Energy, Vol.36, pp. 16~23.
- [7] Wenxian Yang, Richard Court, Jiesheng Jiang, 2013, "Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data", Renewable Energy, Vol. 53, pp. 365~376.
- [8] Mathew L. Wymore, Jeremy E. Van Dam, Halil Ceylan, Daji Qiao, 2015, "A survey of health monitoring systems for wind turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.52, pp. 976~990.
- [9] Shuangyuan Wang, Yixiang Huang, Lin Li, Chengliang Liu, 2016, "Wind turbines abnormality detection through analysis of wind farm power curves", Measurement, Vol. 93, pp. 178~188.
- [10] Magda Ruiz, Luis E. Mujica, Santiago Alférez, Leonardo Acho, Christian Tutivén, Yolanda Vidal, José Rodellar, Francesc Pozo, 2018, "Wind turbine fault detection and classification by means of image texture analysis", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 107, pp. 149~167.
- [11] Lars Morten Bardal, Lars Roar Sætran, 2017, "Influence of turbulence intensity on wind turbine power curves", Energy Procedia, Vol. 137, pp. 553~558.
- [12] Guorui Ren, Jinfu Liu, Jie Wan, Fei Li, Yufeng Guo, Daren Yu, 2018, "The analysis of turbulence intensity based on wind speed data in onshore wind farms", Renewable Energy, Vol. 123, pp. 756~766.
- [13] Kim, H. G., Jeong, T. Y., Jang M. S., 2010, "Analysis on Turbulence Intensity Characteristics at Gimnyeong, Jeju-do by Applying IEC 61400 Wind Turbine Standards", The Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 6, pp. 59~65.

- [14] Wiebke Langreder, Klaus Kaiser, Harald Hohlen, Jørgen Højstrup, 2004, “Turbulence Correction for Power Curves”, EWEC, London
- [15] Yoo, N. S., Yoon, K. Y., 2008, “ A Study on the Effect of Wind Characteristics on the Wind Turbine Power Output”, Journal of Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 12, No. 2, pp. 75~83.
- [16] Hyun, S. G., Ju, Y. C., Kim, K. H., 2012, “A Study on the Effect of Wind Turbulence Intensity on the Power Performance of Wind Turbine System”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 4, pp. 17~23.
- [17] Clara M. St. Martin, Julie K. Lundquist, Andrew Clifton, Gregory S. Poulos, Scott J. Schreck, 2016, “Wind turbine power production and annual energy production depend on atmospheric stability and turbulence”, Wind Energy Science, Vol. 1, pp. 221~236.
- [18] Kim, C. H., Kong, J. S., Oh, C. S., 2000, “Power Control of Variable and Constant Speed Wind Power System”, Journal of Energy Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 117~122.
- [19] Ro, K. S., Kim, T. H., 2009, “Comparison of Characteristics for Variable Operation using Doubly-fed Induction Generator and Fixed Speed Operation in Wind Turbine System, The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol 58, No. 7, pp. 1313~1320.
- [20] Nam, Y. S., Yoon, T. J., Yoo, N. S., 2009, “Dynamic Characteristic Analysis of a Wind Turbine Depending on Varying Operational Conditions”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.33, No. 1, pp. 42~48.
- [21] Hwang, B. S., Nam, Y. Y., 2011, “Status of Korea and World Wind Energy Wind Industry”, Journal of Drive and Control, Vol. 8, No.1, pp. 33~39
- [22] International Electrotechnical Commission, 2013, International Standard IEC 61400-12-2 Edition 1.0 Wind turbines-part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry.
- [23] International Electrotechnical Commission, 2010, International Standard IEC 61400-1 Edition 3.0 Wind turbines-part 1: Design requirements.
- [24] Han, W. B., Kim, J. H., Kim, B. S., 2018, “Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines”, Renewable Energy, Vol. 115, pp. 817~823
- [25] Kim, K. B., Yang, K. B., Mun, C. E., Park, J. K., Huh, J. C., 2010, “A study on the real-time monitoring system of wind power in jeju”, Journal of the Korean solar energy society, Vol. 30, No. 3, pp. 25~32
- [26] International Electrotechnical Commission, 2005, International Standard IEC 61400-12-1 Edition 1.0 Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- [27] Kim, H. W., Ko, K. N., Huh, J. C., 2013, “Power Performance Test of the Long-Distance Wind Turbine using Nacelle Anemometer”, The Korean Solar Energy Society, Vol. 33,

No. 1, pp. 35~40

- [28] Barry P. Hayes, 2011, "Equivalent Power Curve Model of a Wind Farm Based on Field Measurement Data", IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway, pp. 1~7
- [29] Operating manual, 2000, General specification V47-660kW, Vestas, Denmark
- [30] Kwon, I. H., Kim, J. H., Paek, I. S., Yoo, N. S., 2013, "Variation of capacity factors by weibull shape parameters", The korean solar energy society, Vol. 33, No. 1, pp. 32~39.

