

# 나셀 라이다 측정 데이터 특성 분석 및 신뢰성 검증

신동헌\* · 고경남\*\*\* · 강민상\*\*\*

\*제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정

\*\*제주대학교 대학원 풍력공학부

\*\*\*제주에너지공사 에너지연구기술센터

## Characteristics Analysis and Reliability Verification of Nacelle Lidar Measurements

Shin Dongheon\* · Ko Kyungnam\*\*\* · Kang Minsang\*\*\*

\*Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University

\*\*Faculty of Wind Energy Engineering, Graduate School, Jeju National University

\*\*\*Research and Development Center, Jeju Energy Corporation

†Corresponding author: gnkor2@jejunu.ac.kr

### Abstract

A study on Nacelle Lidar (Light detection and ranging) measurement error and the data reliability verification was carried out at Haengwon wind farm on Jeju Island. For measurement data error processing, the characteristics of Nacelle Lidar measurements were analyzed by dividing into three parts, which are weather conditions (temperature, humidity, atmosphere, amount of precipitation), mechanical movement (rotation of wind turbine blades, tilt variation of Nacelle Lidar) and Nacelle Lidar data availability. After processing the measurement error, the reliability of Nacelle Lidar data was assessed by comparing with wind data by an anemometer on a met mast, which is located at a distance of 200m from the wind turbine with Nacelle Lidar. As a result, various weather conditions and mechanical movement did not disturb reliable data measurement. Nacelle Lidar data with availability of 95% or more could be used for checking Nacelle Lidar wind data reliability. The reliability of Nacelle Lidar data was very high with regression coefficient of 98% and coefficient of determination of 97%.

**Keywords:** 나셀 라이다(Nacelle lidar), 풍력터빈(Wind turbine), 출력성능평가(Power performance test), 측정오차(Measurement error), 반송파 대 잡음비(Carrier to noise ratio, CNR)

### 1. 서론

2016년을 기준으로 세계 풍력발전 총 설비용량은 약 487GW이다<sup>1)</sup>. 한편, 해상풍력의 설비용량은 2010년 이후부터 5년간 풍력발전 총 설비용량의 1% (3.8GW)에서 3% (12.2GW)까지 꾸준히 증가하였으며, 연간 0.9 ~ 2.8GW 사이의 성장률을 보이며 지속적으로 성장하고 있다<sup>2)</sup>.

풍력발전단지가 준공된 후, 일반적으로 제조사가 보증하는 출력성능을 검증하기 위하여



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.37, No.5, pp.1-11, October 2017  
<https://doi.org/10.7836/kSES.2017.37.5.001>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 12 June 2017

Revised: 04 September 2017

Accepted: 24 October 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

IEC 61400-12-1<sup>3)</sup> 또는 IEC 61400-12-2<sup>4)</sup> 국제표준에 따라 출력성능평가가 수행되어야 한다. 이를 위하여 국제표준에서 제시하는 기준에 따라 기상탑(meteorological mast)을 설치하고 약 6개월 이상 바람 데이터를 측정해야 한다. 풍력발전단지 내에 설치된 모든 풍력터빈에 대하여 출력성능평가를 수행하는 것이 바람직하지만 시간 및 예산 부족 등의 이유로 대표 풍력터빈 1기에 대해서만 수행하고 있으며, 이를 전체 풍력터빈의 출력성능 보증에 적용하고 있다. 또한 풍력터빈의 대형화 및 해상풍력에 초점이 맞춰짐에 따라 출력성능 측정을 위한 기상탑도 높아져 이에 따른 고비용 문제, 환경적인 제약 등으로 인하여 기상탑 설치 시 많은 어려움이 있다.

이러한 문제를 극복하기 위한 대안으로 설치 및 철거가 용이하고 이동측정이 가능한 지상기반 라이다(ground-based LIDAR) 및 나셀 라이다(nacelle LIDAR)를 이용한 출력성능측정 연구가 풍력발전 선도국에서 활발하게 진행 중이며, 이를 국제표준으로 채택하기 위하여 노력하고 있다. 특히 나셀 라이다의 경우, 최근 국제표준 반영을 위해 유럽 국가들을 중심으로 IEA Wind Task 32 워크숍을 매년 개최하는 등 활발하게 연구가 진행 중이다.

덴마크 공과 대학교(Denmarks tekniske university, DTU)는 나셀 라이다를 이용한 측정 캠페인을 수행하고, 나셀 라이다 기반 풍력터빈 출력성능 측정을 위한 절차를 제안하였다<sup>5,6,7)</sup>. 미국의 신재생에너지 연구소(national renewable energy laboratory, NREL)는 대기조건과 이용률에 따른 나셀 라이다 데이터의 신뢰성 검증에 관한 연구를 수행하였다<sup>8)</sup>.

지상기반 라이다를 이용한 측정 데이터의 신뢰성 검증을 위한 연구는 국내에서도 다양한 방법을 통해 수행된 바 있다. 김현구 등<sup>9,10)</sup>은 윈드큐브(windcube) 지상기반 라이다와 램텍소다(remtech SODAR) 데이터를 비교하여 데이터 신뢰성을 검증하였고, 풍속연직분포 측정 값에 대한 불확도 분석을 수행하였다. 김대영 등<sup>11)</sup>은 지형조건이 다른 세 지역에서 측정된 지상기반 라이다와 기상탑 데이터를 비교·분석하여 지형 복잡도에 따른 라이다 데이터의 신뢰성을 보고하였다. 이와 같이 지상기반 라이다에 대한 몇몇 연구는 국내에서도 수행된 바 있지만 아직까지 나셀 라이다에 대한 연구는 수행된 바 없다.

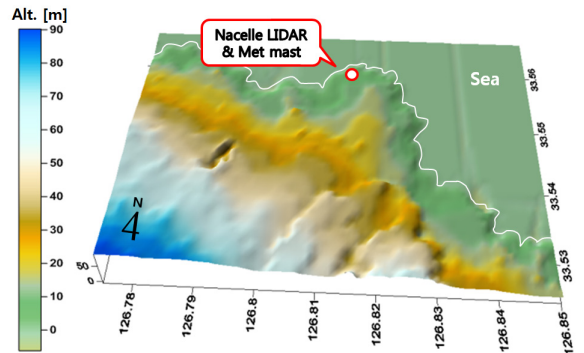
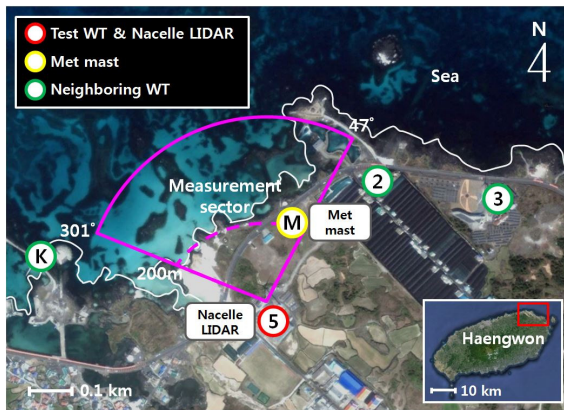
본 연구에서는 나셀 라이다 측정 데이터의 특성을 분석하고, 데이터 신뢰성을 검증하는 것을 목적으로 한다. 측정 데이터 특성은 기상상태(온도, 습도, 기압, 강수량), 기계거동(로터 블레이드 회전, 나셀 라이다 틸트 변화), 데이터 가용률에 따른 CNR (carrier to noise ratio) 신호 및 측정 정확도로 분류하여 분석하였다. 측정 데이터 특성 분석 결과를 토대로 나셀 라이다 데이터를 오차처리 하였고, 인근의 기상탑 데이터를 기준으로 선형회귀 및 라이다 측정오차 분석을 수행하여 데이터 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 분석조건 및 방법

### 2.1 행원 풍력발전단지

제주에너지공사가 운영하고 있는 행원 풍력발전단지는 제주특별자치도 제주시 구좌읍 행원리에 위치하고 있다. Fig. 1과 같이 행원 풍력발전단지 내 5번 풍력터빈에 나셀 라이다가 설치되어 있으며, 북쪽으로 200 m 거

리에 풍력터빈 출력성능평가를 위해 IEC 61400-12-1에 준수하여 설계된 기상탑이 설치되어 있다. 행원 풍력발전단지는 연안에 위치하여 북풍 계열의 해풍이 불어 풍부한 풍력자원을 가지며, 지형은 WAsP (wind atlas analysis and application program)을 구동시켜 산출한 결과, 거칠기 등급 0.1, 지형복잡지수 RIX (ruggedness index) 0.0에 해당하는 매우 평탄한 지형이다. Fig. 2는 행원 풍력발전단지 주변의 3차원 지형도를 나타낸다.



**Fig. 1** Positions of a Nacelle Lidar and a met mast on Haengwon wind farm **Fig. 2** 3D image of terrain around Haengwon wind farm

## 2.2 나셀 라이다 및 기상탑

Fig. 3은 행원 풍력발전단지 5호기에 설치된 나셀 라이다를 나타낸다. Tables 1과 2에 나셀 라이다와 풍력터빈의 자세한 사양을 각각 나타내었다. 본 연구의 계측장비로 사용된 나셀 라이다는 프랑스 Avent 사의 Wind Iris 제품이다. Wind Iris는 펄스형 도플러 헤테로다인 레이저(pulsed doppler heterodyne laser) 기술을 기반으로 15° 간격으로 전방에 2개의 빔을 방출하여 검사 체적 내의 에어로졸 입자(aerosol particles)와 작은 물방울 등에 의해 후방 산란(backscatter)되어 돌아오는 빛의 도플러 이동(doppler shift)을 검출하여 벡터량을 계산한다. 측정거리는 80 ~ 400 m까지 측정 가능하며, 총 10개의 거리를 설정하여 동시에 측정이 가능하다. 5호기는 한진 1.5 MW 풍력터빈으로 허브높이와 로터직경은 각각 70 m이며, 정격 로터 회전속도는 17.02 rpm이다. 2016년 6월부터 2017년 3월까지 약 8.5개월간의 10분 평균 나셀 라이다 측정 데이터가 분석되었다.

나셀 라이다 데이터의 신뢰성 검증을 위하여 5호기로부터 북쪽으로 약 200 m 거리에 위치한 기상탑의 70 m 높이의 풍속 데이터가 기준값으로 사용되었다. Table 3은 기상탑에 설치된 각종 기상센서 사양을 나타낸다. 주변 풍력터빈들이 운전할 때 블레이드 회전으로 인해 발생하는 후류의 영향을 배제하기 위하여 IEC 61400-12-1<sup>3)</sup> Annex A에 정해진 다음 식으로부터 유효 측정방위구간(measurement sector)을 설정하였으며, 본 연구의 모든 분석결과는 유효 측정방위구간 내의 데이터로부터 도출되었다.



**Fig. 3** Nacelle Lidar installed on No. 5 wind turbine of Haengwon wind farm

**Table 1** Specification of Nacelle Lidar

Category	Description
Model	Wind Iris
Measurement range	80 ~ 400 m
Data sampling rate	1 ~ 2.5 Hz
Laser source	Fiber pulsed laser 1.54 $\mu\text{m}$ (Two beam)
No. of measuring distances	10
Speed accuracy	0.1 m/s
Speed range	-10 ~ 40 m/s
Direction accuracy	$\pm 0.5$ deg
Measurement height	70 m (Wind turbine hub height)
Measurement period	2016. 6. 17 ~ 2017. 3. 2 (About 8.5 months)

**Table 2** Specification of the wind turbine tested

Category	Description
Model	HJWT 1500
Rated power	1500 kW
IEC class	IIA
Hub height	70 m
Rotor diameter	70 m
Swept area	4657 $\text{m}^2$
Rated rotor RPM	17.02 rpm
Power control	Pitch control
Cut-in / Rated / Cut-out wind speed	3.5 / 13 / 25 [m/s]

**Table 3** Specification of sensors on meteorological mast

Item	Model	Accuracy	Measurement height
Anemometer	Thiese S11100	1 %	70 m
Wind vane	Thiese S52100	0.5 deg	67 m
Temperature	Galltec P6312P	0.2 K	65 m
Humidity	Galltec P6312	1 %	65 m
Pressure	Vaisala PTB110	±0.6 hPa	75 m
Data logger	Ammonit Meteo-40L	-	1 m

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5 D_n / L_n + 0.15) + 10 \quad (1)$$

여기서,  $L_n$ 은 풍력터빈 또는 기상탑과 주변에서 운전 중인 풍력터빈의 거리 [m],  $D_n$ 은 인근에서 운전 중인 풍력터빈의 로터 길이 [m]이다.

식(1)로부터 계산된 5호기와 기상탑의 동시 유효 측정방위구간은 296 ~ 52°이다. 나셀 라이다의 풍향측정 불확도(uncertainty)를 고려하여 계산 결과에 ± 5°를 적용하였다. 최종적으로 유효 측정방위구간은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 301 ~ 47°로 설정하였다.

### 3. 나셀 라이다 측정 데이터 특성 분석 결과

#### 3.1 CNR의 정의 및 평균 CNR

검사 체적 내의 에어로졸 입자와 작은 물방울 등에 의해 후방 산란되어 돌아오는 빛의 도플러 이동을 검출하여 백터량을 계산하는 라이다 기술의 측정 정확도는 CNR과 매우 밀접한 관계가 있다. CNR이란 Carrier to noise ratio의 약어로서 반송파와 잡음과의 진폭 차이를 말하며 다음의 수식으로 구해진다.

$$CNR [dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{P_c}{P_n} \right) \quad (2)$$

여기서,  $P_n$ 은 잡음 전력 [W],  $P_c$ 는 반송파 전력 [W]이다.

나셀 라이다 사용자 매뉴얼<sup>12)</sup>에 따르면 CNR의 임계값(threshold)은 -23 dB로 임계값 미만의 데이터는 분석할 때 배제하여야 하며, CNR 값이 낮을수록 측정 감도가 약함을 의미한다. Fig. 4는 측정기간 동안의 10분 평균 데이터의 거리별 최대, 최소, 평균, 표준편차 CNR을 나타낸다. 평균 CNR은 -10 ~ -18 dB 정도이며, 200 m 거리에서 CNR이 가장 높고, 160 m 이전의 근거리와 200 m 이후에 거리가 멀어질수록 CNR이 낮아지는 것을 알 수 있다.

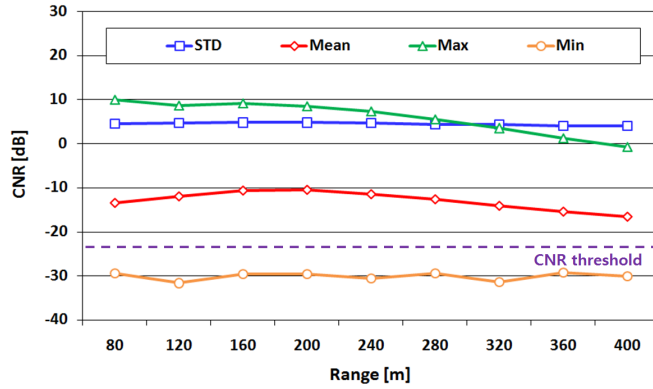
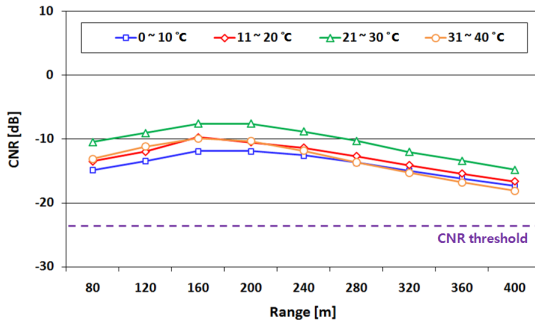
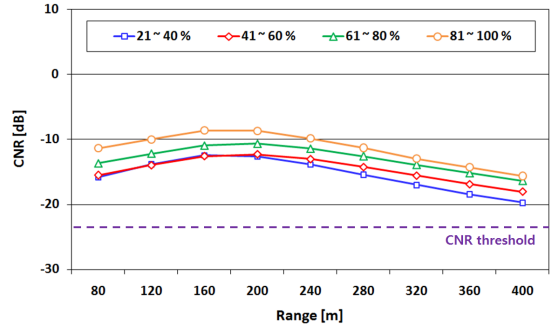


Fig. 4 Max, min, mean and standard deviation of CNR for about 8.5 months

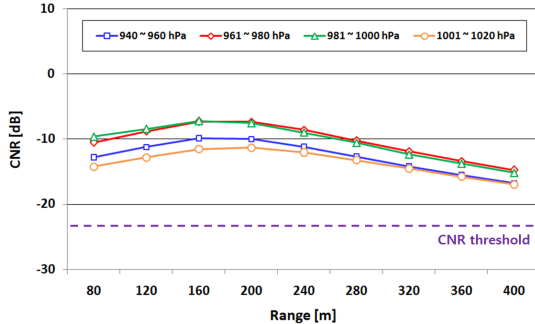
### 3.2 기상상태에 따른 측정 데이터 특성



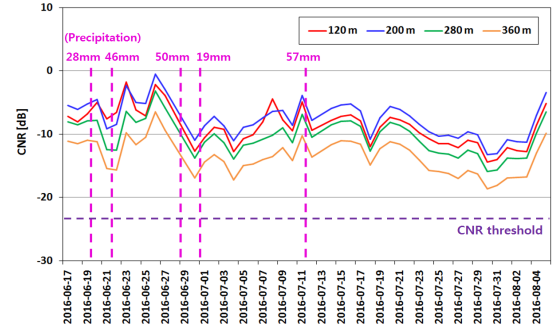
(a) CNR variation by distance with temperature



(b) CNR variation by distance with humidity



(c) CNR variation by distance with pressure



(d) CNR variation with amount of precipitation

Fig. 5 CNR analysis result according to weather conditions

기상탑에서 측정된 온도, 습도, 기압 데이터로부터 기상상태에 따른 거리별 평균 CNR 변화를 분석하였다. 분석은 온도의 경우 0 ~ 40°C 사이의 10°C 빈 간격(bin interval), 습도의 경우 21 ~ 100% 사이의 20% 빈 간격, 기압의 경우 940 ~ 1020 hPa 사이의 20 hPa 빈 간격으로 수행되었다. Fig. 5(a) ~ (c)은 각각의 분석 결과를 나타낸다. 전반적으로 160 ~ 200 m 거리에서 CNR 값이 높았으며, 160 m 이전의 근거리와 200 m 이후에 거리가 멀어질수록 감소하였다. 온도의 경우, 21 ~ 30°C에서 가장 큰 CNR 값을 나타냈으며, 온도 변화에 따른 순차적



인 경향을 보이지 않았다. 습도의 경우, 습도가 높아질수록 순차적으로 CNR이 높아졌다. 압력의 경우, 온도와 같이 압력 변화에 따른 순차적인 경향을 보이지 않았다. 하지만 모든 분석조건에서 CNR이 임계값  $-23$  dB 이상으로 측정됨에 따라 다양한 기상조건 변화에도 CNR이 정상범위 내에서 측정됨을 확인하였다.

Fig. 5(d)는 2016년 6월 17일부터 2016년 8월 4일까지 약 한달 반 동안의 일일 강수량에 따른 일평균 CNR을 나타낸다. 지상기반 라이더의 경우, 일일 강수량이 10 mm 이상일 경우의 데이터를 배제하도록 추천한다<sup>13)</sup>. 따라서, 일일 강수량이 10 mm 이상일 경우를 분석조건으로 설정하였다. 그림에서 일일 강수량이 19 ~ 55 mm 일 때의 일평균 CNR이 정상범위 내로 측정됨에 따라 동기간 동안의 강수량이 나셀 라이더의 정상적인 데이터 측정에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(d)에 일정기간의 결과 값을 대표적으로 나타내었지만 모든 측정기간 동안 정상범위 내에서 CNR이 측정되었음을 확인하였다.

### 3.3 기계거동에 따른 측정 데이터 특성

나셀 라이더는 풍력터빈 로터 블레이드 뒤에 설치되어 전방으로 레이저 빔을 발사한다. 풍력터빈 운전 시에 로터 블레이드 회전에 의한 간섭에 따른 CNR 변화를 분석하기 위하여 SCADA (supervisory control and data acquisition) 시스템으로부터 측정된 5호기의 로터 회전속도(rotor RPM) 데이터가 활용되었다.

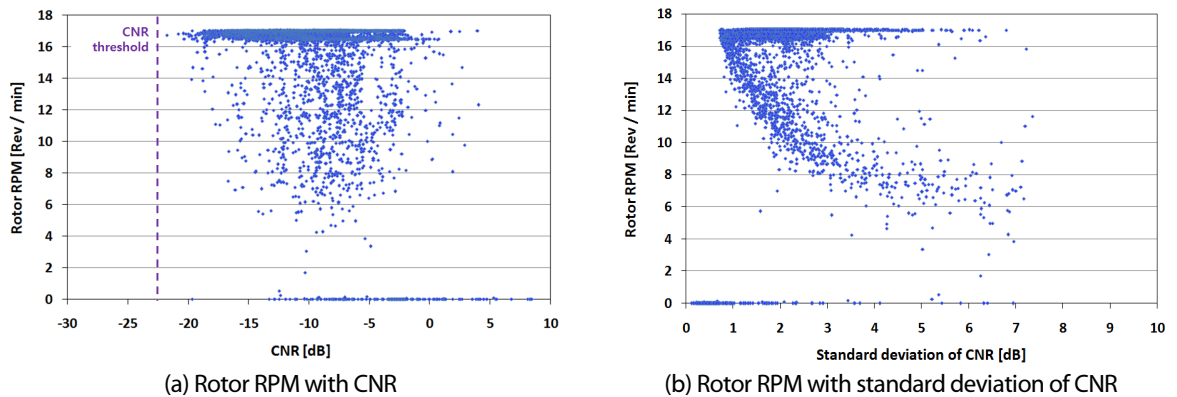


Fig. 6 CNR analysis according to rotor blade rotation

Fig. 6(a)는 로터 회전속도에 따른 평균 CNR 분석 결과를 보여준다. 5호기의 정격 로터 회전속도는 17.02 rpm이다. 전반적으로 대부분의 CNR이 임계치를 벗어나지 않는 정상범위 내에서 측정이 되었다. 특히, 정격 로터 회전속도 근처에서 평균 CNR이  $-20$  dB 정도까지 떨어진 데이터도 있지만 정상범위 내에서 측정되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 로터 블레이드 회전이 나셀 라이더의 정상적인 측정에 방해요소로 작용하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 로터 회전속도에 따른 CNR의 표준편차를 나타낸다. CNR 표준편차 값이 로터 회전 속도에 반비례하며, 로터 회전속도가 빠를수록 1에 수렴하는 경향을 보였다. 즉, 로터 회전속도가 빠를수록 CNR 값

의 변동이 적음을 알 수 있다.

나셀 라이더는 설치 시에 풍력터빈 나셀 상단으로부터 측정하고자 하는 거리의 허브높이 부근에 레이저 빔이 통과하도록 틸트 값을 설정(pre-tilt configuration)해 주어야 한다. 이 때, 레이저 빔은 허브 높이의  $\pm 2.5\%$ 를 넘어서는 안 된다. 틸트 값 초기 설정 시, 고풍속이 불 경우 추력에 의해 풍력터빈 타워가 뒤로 쏠려질 것을 고려하여 허브 높이의 2.5% 하단(lower limit)에 레이저 빔이 통과하도록 설정한다. 다음 식으로부터 틸트 설정 값( $\beta_{pretilt}$ )을 구할 수 있으며<sup>12)</sup>, 본 연구를 위해 설치된 나셀 라이더의 틸트 설정 값은  $-1.45^\circ$ 이다.

$$\beta_{pretilt} = -\text{Arctan}\left(\frac{H - 0.025 Z_{hub}}{2.5D + L}\right) \quad (3)$$

여기서, D는 로터 직경 [m], H는 로터중심에서 나셀 라이더까지의 거리 [m], L은 로터 블레이드로부터 나셀 라이더까지의 거리 [m],  $Z_{hub}$ 는 풍력터빈 허브높이 [m]이다.

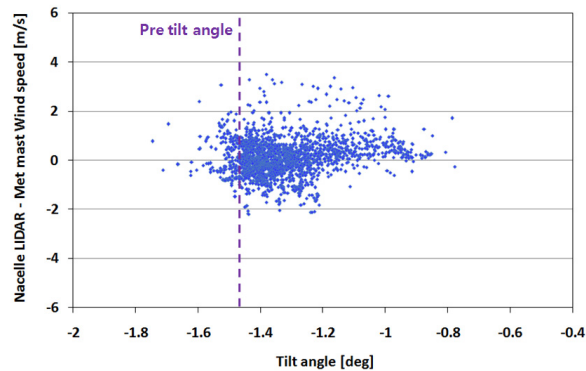


Fig. 7 Tilt angle of Nacelle Lidar with Nacelle Lidar measurement error

나셀 라이더의 틸트 값은 불어오는 바람에 의해 기기가 흔들릴 수 있으며, 초기 설정 값으로부터 미세하게 변할 수 있다. 이에 따라, 나셀 라이더의 틸트 변화에 따른 측정 정확도를 분석하였다. 측정 정확도는 라이더 측정 오차로부터 확인하였으며, 이는 동시간대의 나셀 라이더 풍속과 기상탑 풍속의 차로 정의된다. 분석은 테스트 풍력터빈의 정격풍속인 12 m/s 이상의 바람 데이터를 사용하여 수행하였다. Fig. 7은 틸트 각도 변화에 따른 라이더 측정오차 분석 결과를 나타낸다. 측정기간 동안에 초기 틸트 설정 값  $-1.45^\circ$ 에서  $-0.8 \sim -1.8^\circ$  범위의 틸트 각도 변화에도 라이더 측정오차는 대부분 0에 가까이 수렴하였다. 따라서 틸트 변화가 라이더 측정정확도에 별로 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다.



### 3.4 데이터 가용률에 따른 측정 데이터 특성

데이터 가용률(data availability)에 따른 측정 정확도를 분석하였다. Courtney<sup>14)</sup>의 나셀 라이다 교정연구 보고서에 따르면 나셀 라이다 데이터 처리 시, 1Hz 간격으로 측정되어 평균화된 10분 평균 데이터의 가용률이 95% 미만일 경우 분석에서 배제하였다. Fig. 8은 데이터 가용률에 따른 측정 정확도 분석 결과를 나타낸다. 데이터 가용률이 95% 이상일 경우, 라이다 측정오차는 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 데이터 가용률이 95% 미만일 경우, 데이터 가용률이 작아질수록 라이다 측정오차는 커지며, 최대 35 m/s까지의 큰 오차를 가짐을 알 수 있다. 분석 데이터 중 가용률 95% 이상의 데이터가 91.9%를 차지하였으며, 95% 미만의 데이터는 8.1%로 낮았다.

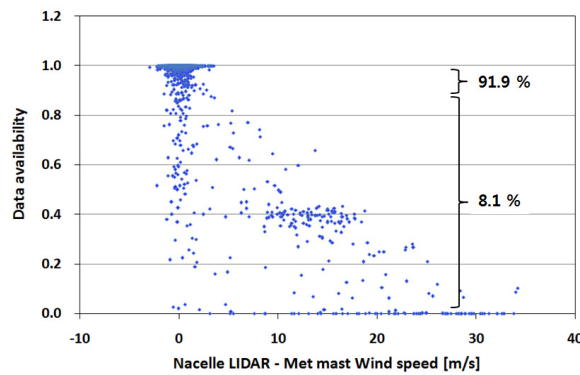


Fig. 8 Data availability with Nacelle Lidar measurement error

### 4. 나셀 라이다 데이터 오차처리 및 데이터 신뢰성 검증

기상상태, 기계거동, 데이터 가용률에 따른 나셀 라이다 측정 데이터 특성 분석 결과에 따라 다음과 같은 데이터는 제외하고, 200m 떨어진 거리의 기상탑 데이터와 비교하여 나셀 라이다 측정 바람 데이터를 검증하였다.

- IEC 61400-12-1 Annex A에 따른 유효 측정방위구간 ( $\pm 5^\circ$  적용) 외의 데이터<sup>3)</sup>
- 나셀 라이다가 정상운전 상태가 아닌 경우의 데이터<sup>3)</sup>
- CNR 신호가  $-23\text{dB}$  이하일 때의 데이터<sup>12)</sup>
- 데이터 가용률이 95% 미만일 때의 데이터<sup>14)</sup>
- 4 ~ 16 m/s 풍속 범위 외의 데이터<sup>14)</sup>

데이터 오차처리 후에 나셀 라이다와 기상탑의 풍속 데이터 간의 선형회귀분석을 수행한 결과, Fig. 9(a)와 같이 회귀계수(coefficient of regression)는 0.984, 결정계수(coefficient of determination)  $R^2$ 은 0.970으로 두 풍속 데이터가 높은 상관성을 보였다.

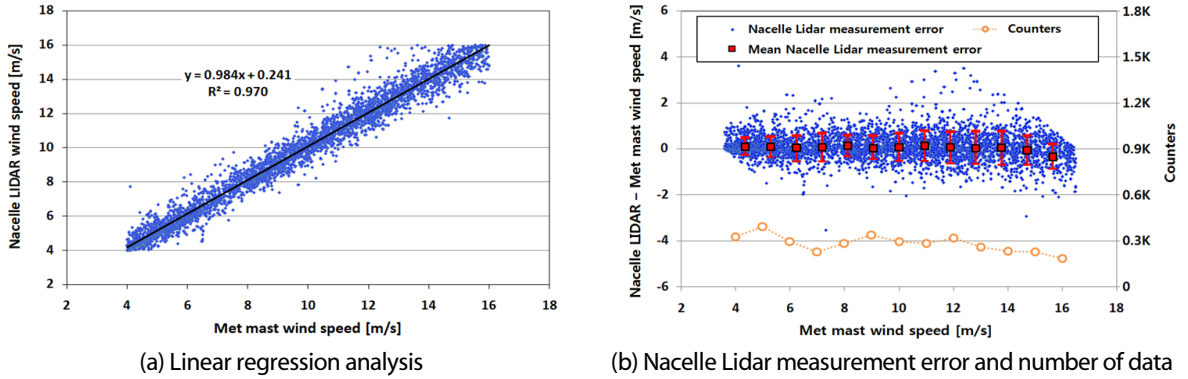


Fig. 9 Data reliability analysis after data filtering

Fig. 9(b)는 데이터 오차처리 후에 기상탑 풍속 데이터와 라이다 측정오차의 산포도를 보여준다. 또한, 1 m/s 빈 간격의 평균 라이다 측정오차와 단일 표준편차도 함께 나타낸다. 라이다 측정오차는 모든 구간에서 거의 0에 수렴하였으며, 빈 평균 라이다 측정오차 범위는  $-0.30 \sim 0.16$  m/s였으며 중앙값은 0.09 m/s이었다. 또한 단일 표준편차의 범위는  $0.38 \sim 0.73$  m/s였으며 중앙값은 0.61 m/s이었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 나셀 라이다 측정 데이터의 특성을 분석하고, 데이터 신뢰성을 검증하였다. 나셀 라이다 데이터의 오차처리에 앞서 기상상태, 기계저동, 데이터 가용률로 분류하여 나셀 라이다 측정 데이터 특성을 분석하였다. 오차처리 된 나셀 라이다 측정 데이터를 인근의 기상탑 데이터와 비교·분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 나셀 라이다 데이터 측정 시, 기상조건(온도, 습도, 기압, 강수량) 변화에도 CNR 값은 정상범위임을 확인하였다.
- (2) 로터 블레이드 회전은 나셀 라이다 데이터 측정 시, CNR에 영향을 미치지 않았으며 블레이드 회전속도가 빠를수록 CNR 값의 변동이 적었다. 12 m/s 이상의 고풍속에서 나셀 라이다 틸트 각도 변화는 나셀 라이다의 정상적인 측정에 방해요인으로 작용하지 않았다.
- (3) 데이터 가용률이 95% 이상일 경우, 나셀 라이다 측정오차는 0에 수렴하였다. 95% 미만일 경우, 데이터 가용률이 작아질수록 라이다 측정오차는 커지며 최대 35m/s까지의 큰 오차를 보였다. 또한 전체 데이터 중 데이터 가용률이 95% 이상의 데이터는 91.9%, 95% 미만의 데이터는 8.1%를 차지하였다.
- (4) 데이터 오차처리 후에 나셀 라이다와 기상탑 풍속 데이터 간의 선형회귀분석 결과, 회귀계수 0.984, 결정계수 0.970으로 두 풍속 데이터 간의 상관성은 매우 높았다.
- (5) 데이터 오차처리 후에 1 m/s 빈 간격으로 평균한 라이다 측정오차를 분석한 결과,  $-0.30 \sim 0.16$  m/s 범위 내였으며 중앙값은 0.09 m/s이었다. 또한, 단일 표준편차의 범위는  $0.38 \sim 0.73$  m/s였으며 중앙값은 0.61 m/s이었다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업 「나셀 라이다를 이용한 풍력발전설비 및 풍력단지 출력성능측정 기술개발(No. 20163010024560)」과 에너지인력양성사업 「육·해상 풍력터빈 신뢰성 및 발전량 향상을 위한 O&M 기술 고급트랙 (No. 20164030201230)」의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

## REFERENCES

1. Global wind statistics 2016, Global wind energy council (GWEC), 2016.
2. JRC Science for policy report, JRC Wind energy status report 2016, 2016.
3. IEC, Wind turbine generator systems part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, Third edition, IEC 61400-12-1, 2005.
4. IEC, Wind turbine generator systems Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry, First Ed., IEC 61400-12-2, 2013.
5. Wagner, R., Rivera, R. L., Antoniou, I., Davoust, S., Pedersen, T. F., Courtney, M., and Diznabi, B., Procedure for Wind Turbine Power Performance Measurement with a Two-beam Nacelle Lidar, DTU Wind Energy report 2013.
6. Wagner, R., Samuel, D., Nacelle Lidar for Power Curve Measurement \_Avedøre Campaign, DTU Wind Energy report 2013.
7. Wagner, R., Friis Pedersen, T., Courtney, M., Gottschall, J., Antoniou, I., Møller, R., Pedersen, S. M., Velociter, T., Bardon, M., and Mouritzen, A. S., Power Performance Measured Using a Nacelle Lidar. EWEA Annual Event 2011.
8. Davoust, S., Jehu, A., Bouillet, M., Bardon, M., and Vercherin, B., Assessment and Optimization of Lidar Measurement Availability for Wind Turbine Control, National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2014.
9. Kim, H. G. and Choi, J. H., Uncertainty Analysis on Wind Speed Profile Measurements of Lidar by Applying SODAR Measurements as a Virtual True Value, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 4, pp. 79-85, 2010.
10. Kim, H. G., Chyng, C. H., An, H. J., and Ji, Y. M., Comparative Validation of Windcube Lidar and Remtech SODAR for Wind Resource Assessment-remote Sensing Campaign at Pohang Accelerator Laboratory, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 2, pp. 63-71, 2011.
11. Kim, D. Y., Kim, T. W., Oh, G. J., Huh, J. C., and Ko, K. N., A Comparison of Ground-based Lidar and Met Mast Wind Measurements for Wind Resource Assessment Over Various Terrain Conditions, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 158, pp. 109-121, 2016.
12. Wind Iris user manual with software 1.5.1, Avent Lidar technology.
13. Windcube v2 user manual version 6, Leosphere.
14. Courtney, M., Calibrating nacelle lidars, DTU Wind Energy 2013 (DTU Wind Energy E; No. 0020), 2013.