

라이다(LiDAR) 측정을 이용한 나셀전달함수의 유도[§]

김현구^{*†} · 강용혁^{*} · 윤창열^{*}

* 한국에너지기술연구원, 신재생에너지자원센터

Derivation of Nacelle Transfer Function Using LiDAR Measurement

Hyun-Goo Kim ^{*†}, Yong-Heack Kang ^{*} and Chang-Yeol Yun ^{*}

* New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research

(Received February 27, 2015 ; Revised May 18, 2015 ; Accepted July 15, 2015)

Key Words: Nacelle Transfer Function(NTF; 나셀전달함수), Nacelle Anemometer(나셀 풍속계), Wind Turbine (풍력터빈), LiDAR(Light Detection And Ranging, 라이다), Multiple regression analysis(다중회귀)

초록: 풍력터빈 블레이드의 후단, 나셀 상부에 설치되는 나셀 풍속계는 블레이드 회전에 따른 후류효과 및 나셀형상 등으로 인하여 풍력터빈에 입사되는 자연풍속과는 다른 왜곡된 풍속을 측정한다. 풍력터빈 출력성능의 신뢰성 확보를 위해서는 나셀풍속을 자연풍속으로 보정하는 나셀전달함수를 유도하여 성능곡선을 보정하여야 한다. 본 연구에서는 전라남도 비금도 북부 해안에 건설된 신안풍력발전소에서 지상기반 원격탐사 장비인 라이다(LiDAR)를 설치하여 나셀 풍속계와 동일 높이에서의 자연풍속을 측정하였다. 나셀풍속을 자연풍속으로 보정하는 기존의 단순회귀분석에 의한 선형 나셀전달함수를 개선하기 위하여 다중회귀분석에 의한 비선형 나셀전달함수를 유도하였다. 나셀전달함수로 계산한 보정풍속을 풍력터빈 출력곡선에 대입하여 산출한 이론 발전량과 실제 발전량의 잔차를 비교하여 개선효과를 검증하였다. 다중회귀분석 나셀전달함수는 단순회귀분석에 비해 풍속의 표준오차는 9.4% 감소하였으며, 발전량 잔차 분포의 평균은 6.5% 감소하여 개선효과가 있음을 확인하였다.

Abstract: Nacelle anemometers are mounted on wind-turbine nacelles behind blade roots to measure the free-stream wind speed projected onto the wind turbine for control purposes. However, nacelle anemometers measure the transformed wind speed that is due to the wake effect caused by the blades' rotation and the nacelle geometry, etc. In this paper, we derive the Nacelle Transfer Function (NTF) to calibrate the nacelle wind speed to the free-stream wind speed, as required to carry out the performance test of wind turbines according to the IEC 61400-12-2 Wind-Turbine Standard. For the reference free-stream wind data, we use the Light Detection And Ranging (LiDAR) measurement at the Shinan wind power plant located on the Bigeumdo Island shoreline. To improve the simple linear regression NTF, we derive the multiple nonlinear regression NTF. The standard error of the wind speed was found to have decreased by a factor of 9.4, whereas the mean of the power-output residual distribution decreased by 6.5 when the 2-parameter NTF was used instead of the 1-parameter NTF.

1. 서론

1.1 연구배경

MW 급 풍력터빈에는 운전제어를 목적으로 풍

향, 풍속, 기압, 기온, 습도 등을 측정하는 기상관측 센서를 설치한다. 풍향계(wind vane)는 풍력터빈 블레이드 회전축을 입사 풍향에 일치선으로 일치시키기 위하여 요각도(yaw angle)를 제어하기 위함이고, 풍속계(anemometer)는 풍력터빈의 시동(cut-in) 및 정지(cut-out) 풍속을 판단할 뿐 아니라 풍속에 따른 피치각을 제어하여 풍력터빈의 출력 최대화 및 구조적 안전성을 확보하기 위함이다.

나셀 풍속계를 비롯한 기상 센서는 Fig. 1 과 같

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2015. 2. 25-27., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, hyungoo@kier.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

이 풍력터빈 블레이드 뿌리(blade roots) 후방, 나셀 상부에 설치된다. 그런데 블레이드 회전 시에는 후류(wake) 영역에 놓일 뿐 아니라 나셀의 형상에 의한 유동장 변형이 수반된다. 따라서 나셀 풍속계가 측정하는 나셀풍속(nacelle wind speed)은 원방에서 풍력터빈 블레이드에 입사되는 자연풍속(free stream wind speed)이 아니라 왜곡된 풍속이 된다.

일반적으로 풍력터빈 블레이드 회전시 나셀 풍속계는 운동에너지를 손실하여 자연풍속보다 낮은 풍속, 블레이드 회전에 의한 와류의 영향으로 높은 난류강도(turbulence intensity)를 측정하게 되며 나셀 형상, 블레이드 회전특성 등에 따라 자연풍속과 나셀풍속의 차이도 일정하지 않다. 문제는 왜곡된 풍속을 운전제어에 적용할 경우, 시스템 운전효율의 저하 또는 운전소음 및 피로하중이 증가할 수 있다는 것이다.

고가의 기계설비인 풍력터빈은 반드시 성능시험(performance test)를 실시하여 출력곡선(power curve)을 입증해야 한다. 출력곡선이란 입사풍속 대비 발전출력의 관계를 의미하므로 정확한 입사풍속을 알아야 한다.

풍력터빈 국제규격 IEC 61400-12-2⁽¹⁾에서는 풍력터빈 풍상부에 기상탑을 설치하되 허브높이(hub height)와 동일 높이에 풍속계를 장착하여 풍력터빈에 입사되는 자연풍속을 측정 후 나셀전달합수(NTF), 즉 나셀풍속을 자연풍속으로 변환하는 합수를 유도하여 나셀풍속을 보정하도록 권고한다.

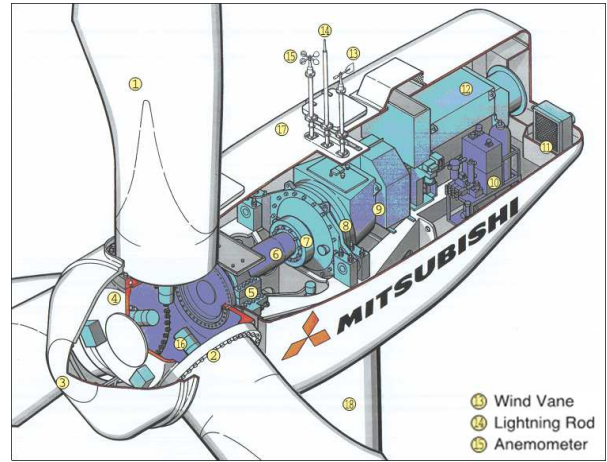


Fig. 1 Arrangement of nacelle anemometry on a Mitsubishi MWT-100A wind turbine (Source: Mitsubishi Power Systems, Inc.)

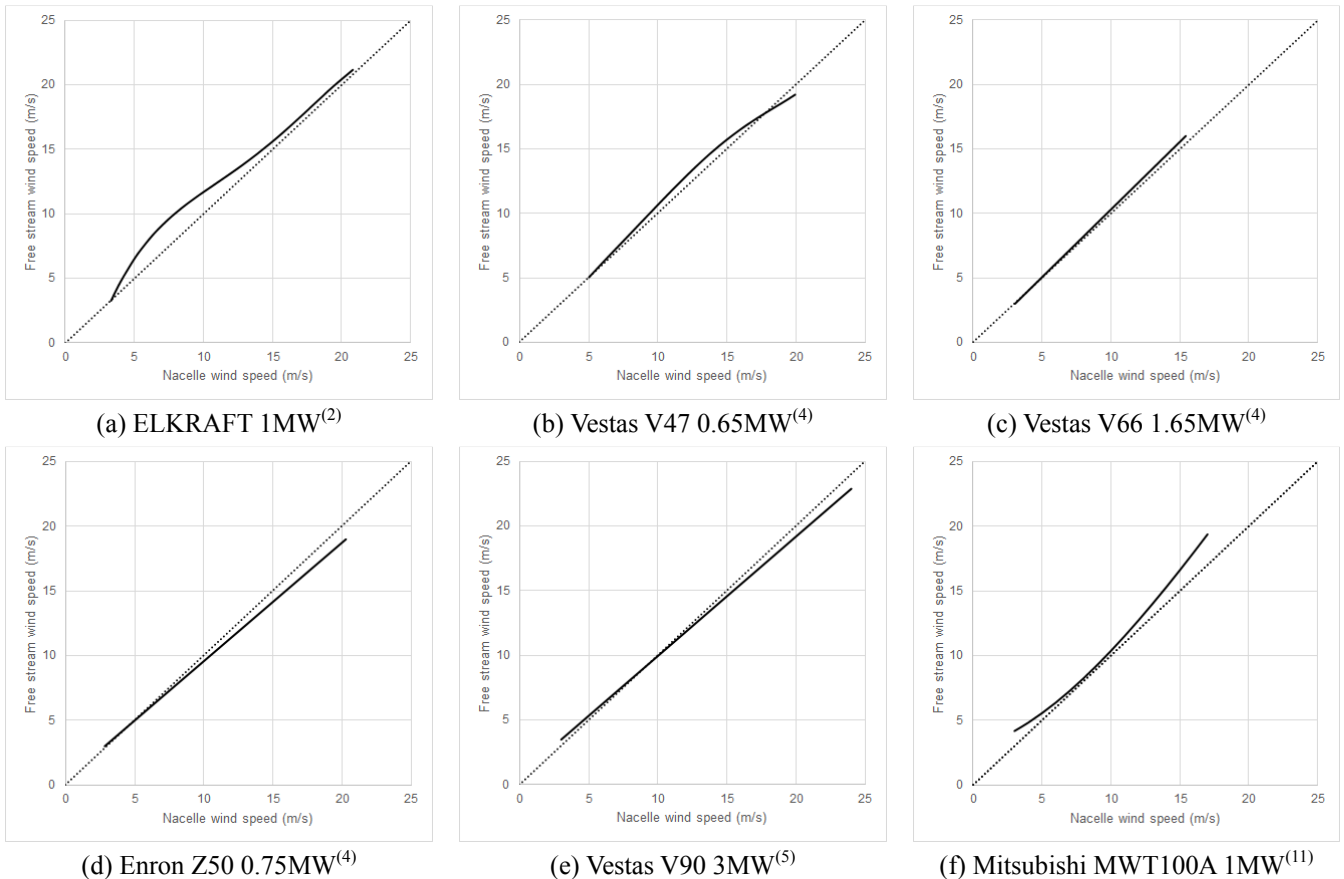


Fig. 2 Example of nacelle transfer functions (lines: regression curve of nacelle wind speed and free-stream wind speed)

최근에는 기상탑을 설치해야만 하는 기존의 성능시험 방식의 한계에서 벗어나, 풍속 연직구조를 정확하고 정밀하게 측정할 수 있는 지상기반 원격탐사 장비인 라이다(LiDAR)를 성능시험에 도입하는 추세이다.

1.2 선행연구

Antonius 와 Pedersen,⁽²⁾ Hunter 등,⁽³⁾ Smith 등,⁽⁴⁾ 김현우⁽⁵⁾는 MW 급 풍력터빈의 나셀전달함수를, Ziter⁽⁶⁾는 소형 풍력터빈의 나셀전달함수를 유도한 바 있다. 한편 김수상과 박세광⁽⁷⁾은 나셀풍속을 보정하지 않고 풍력터빈 성능시험에 적용하였기 때문에 그들의 해석결과에는 미보정에 따른 오차가 포함되었을 것으로 판단된다.

Fig. 2 는 선행연구를 통하여 확인된 여러 풍력터빈의 나셀전달함수를 보여주는 그래프로, 1.1 절에서 언급한 바와 같이 풍력터빈의 기중, 블레이드의 형상, 센서의 위치 등에 따라 나셀전달함수의 형태가 매우 다양함을 확인할 수 있다.

나셀풍속을 보정하여 자연풍속을 정확히 산출할 경우 풍력터빈 제어 정확도 향상에 의한 발전효율 증가, 풍력터빈 성능평가 정확도 향상, 풍력발전 예보자료로 나셀풍속 활용 등 다양한 공학적 이득이 있다. 이에 General Electric,⁽⁸⁾ 삼성중공업,⁽⁹⁾ 한국에너지기술연구원⁽¹⁰⁾ 등이 나셀전달함수 관련 특허를 선점하고 있다. 이 중 Sivers 등⁽⁸⁾과 김기현 등⁽⁹⁾은 단일 독립변수로 나셀풍속만을 사용하였다.

1.3 연구목적

본 연구에서는 나셀 풍속계가 측정하는 왜곡된 나셀풍속을 풍력터빈에 입사하는 자연풍속으로 보정하는 나셀전달함수를 유도하고자 한다. 이를 위하여 지상기반 원격탐사장비인 라이다를 이용하여 자연풍속의 연직구조를 측정하였으며, 다중회귀분석으로 나셀전달함수를 유도함으로써 기존의 단순 회귀분석⁽¹¹⁾보다 개선된 결과를 얻고자 하였다. 이를 통하여 풍력터빈의 출력성능 확인 시 나셀풍속계 활용방법의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 연구자료

2.1 측정위치

본 연구의 대상으로 전라남도 신안군 비금도의 북부 해변에 위치한 신안풍력발전소의 풍력터빈을 선정하였다. 신안풍력발전소에는 Fig. 3과 같이 Mitsubishi MWT-1000A 1MW 풍력터빈 3기가 해안선을 따라 동서방향으로 배치되어 있다.



Fig. 3 Landscape of the Shinan Wind Power Plant at Bigeumdo (up) and wind turbine layout (bottom)

Mitsubishi MWT-1000A 의 제원은 허브높이 69m, 블레이드 지름 61.4m, 그리고 시동 및 정지풍속은 각각 3m/s 와 25m/s 이며 IEC Class IIA 이다. 라이다는 Fig. 3 에 표시된 바와 같이 풍력터빈 2 호기로부터 3 호기 방향으로 80m 이격시켜 설치하도록 풍향을 기준으로 풍력터빈 2 호기의 나셀 풍속계와 동일선상에 위치하도록 하였다. 참고로 Fig. 3 에 표시한 원은 풍력터빈 블레이드의 회전반경 및 라이다의 스캔반경이다(Fig. 4 참조).

2.2 측정자료

나셀전달함수 유도에 필요한 자연풍속을 확보하기 위하여 라이다를 설치하고 원격탐사 캠페인을 실시하였다. 원격탐사 캠페인은 2009 년 11 월 30 일부터 2010 년 3 월 17 일까지 3.5 개월간 수행되었다. 이때 풍력터빈 허브높이인 69m 가 포함되도록 라이다 측정높이를 설정하였다. 원격탐사에 이용한 라이다는 프랑스 레오스피어(Leosphere)사의 윈드큐브(WindCube) 모델로, 다수의 실측 캠페인을 통하여 그 정확도가 컵 풍속계(cup anemometer)와 동일 수준임이 이미 충분히 검증된 바 있다.

윈드큐브 라이다는 Fig. 4 와 같이 레이저 빔으로 만들어지는 26m 높이의 원통형 공간을 통과하

는 에어로졸과 미세먼지의 도플러 이동속도를 측정 후 벡터합성으로 풍향, 풍속을 산출한다. 따라서 라이다가 측정하는 허브높이 풍속이란 지상 56m(=69-13)부터 82m(=69+13)까지의 원통체적을 통과하는 바람의 평균값이 된다.

풍력터빈이란 블레이드 회전면에 작용하는 바람의 운동에너지를 회전력으로 전환하여 발전기를 돌려 전기를 생산하는 기계이다. 따라서 풍력터빈의 출력곡선은 회전면에 입사하는 풍속으로 정의되어야 한다. 그러나 기술적인 어려움 때문에 차선택으로 풍력터빈 풍상부에 기상탑을 설치하고 허브높이에서 컵 풍속계로 풍속을 측정하여 이를 출력곡선의 대표풍속으로 사용하여 왔다.

컵 풍속계는 지점측정(point measurement)인 반면에 라이다는 Fig. 4의 측정원리에 의해 체적측정(volume measurement)을 하기 때문에 풍력발전 측면에서 출력곡선에 대한 설명력은 더 우수하다. 따라서 본 연구에서는 라이다 측정자료를 나셀 풍속계의 보정을 위한 자연풍속으로 이용함으로써 보다 설명력이 높은 나셀전달함수를 유도하고자 하였다.

3. 연구방법

다음과 같은 절차로 비선형 다중회귀분석을 수행하여 새로운 나셀전달함수를 유도하였다.

3.1 변수선정

풍력터빈에 입사하는 자연흐름의 풍속은 다음의 식과 같이 나셀에 설치된 기상관측 센서로부터 측정된 풍향(D), 풍속(U), 난류강도(TI), 기온(T), 대기압(P), 습도(H) 등의 함수로 표현할 수 있다.

$$\text{Free-stream } U = f(\text{nacelle } U, D, TI, T, P, H, \dots)$$

$$\text{Free stream } TI = f(\text{nacelle } U, D, TI, T, P, H, \dots)$$

위 식에서 독립변수로는 풍력터빈 센서에서 측정되는 모든 변수가 포함될 수 있으나, 회귀분석의 적합도를 높이기 위해서는 종속변수와 상관성이 높으며 상호간에 직교성(orthogonal)이 있는 변수를 선정하여야 한다.

본 연구에서는 측정변수간의 상관분석을 통하여 종속변수인 자연흐름의 풍속 및 풍속 표준편차와 통계적 상관성이 높은 독립변수로 나셀풍속 및 나셀풍속 표준편차를 선택하였다.

3.2 자료 필터링

Fig. 5 좌측에 원격탐사 캠페인 기간에 라이다가 측정한 바람장미(wind rose)를 도시하였다. 바람장미는 풍향별 출현빈도를 보여주는데, 신안풍력발전소의 주풍향은 북북서풍 계열이 탁월하게 나타나고 있다. 참고로 우측에 함께 도시한 한국에너지기술연구원의 한반도 풍력자원지도⁽¹²⁾와 매우 유사하게 일치함을 알 수 있다.

신안풍력발전소 풍력터빈은 비금도 북부 해안선을 따라 일렬로 설치되어 있다. 따라서 해풍인 북북서풍은 일체의 지형지물 영향이 배제된 풍향구간이므로 나셀전달함수를 유도하기에 적합한 상황이 된다. 이에 해석 풍향구간을 북서풍에서 북동풍까지의 90° 구간으로 한정하였다.

회귀분석에 사용할 측정자료를 선택함에 있어서 2.5σ 필터링을 적용하여 이상치(outlier)를 제외하였으며, 컵 풍속계의 유효 측정구간 이하인 1m/s 이하는 제외하였다. 또한 블레이드 회전 유무에 따른 변동성을 제거하기 위해 풍력터빈 정지시 자료를 제외하였다. 참고로 대표적 풍력자원평가용 풍속계 제작사인 NRG Systems 등에서 생산하는 컵 풍속계의 풍속 측정구간은 1m/s 이상이며 측정 불확도는 1.4~4.5% 수준이다.

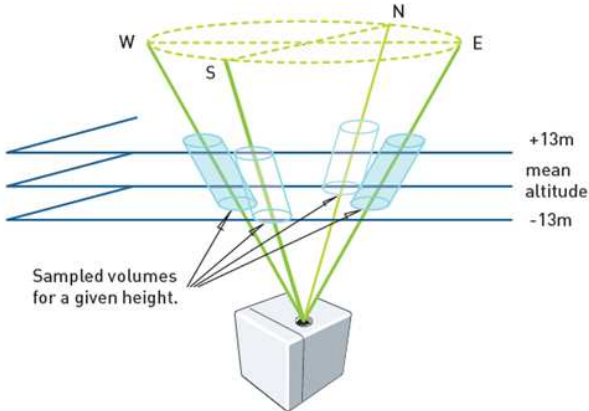


Fig. 4 Volume measurement principle of WindCube LiDAR (Source: Leosphere Co.)

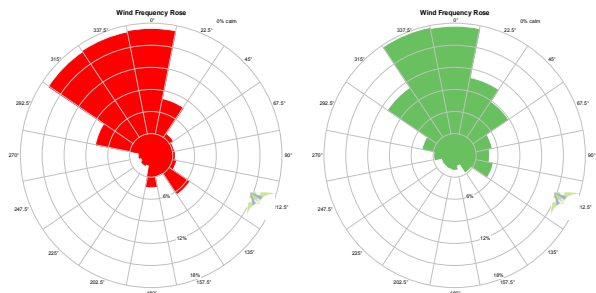


Fig. 5 Wind rose during the remote-sensing campaign period (left: LiDAR measurement, right: KIER-WindMapTM)

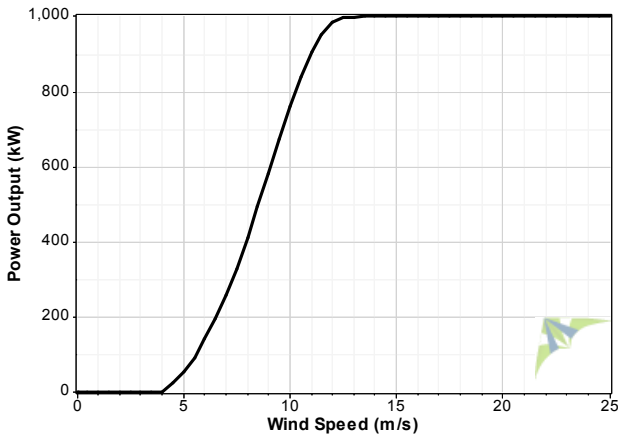


Fig. 6 Wind turbine power curve of Mitsubishi MWT-1000A (Source: Mitsubishi Power Systems, Inc.)

3.3 회귀분석

비선형 다중회귀분석을 위해 상용 소프트웨어인 CurveExpert Professional v2.2.0 을 사용하였다. 이 소프트웨어는 다양한 회귀분석 함수 라이브러리를 구비하고 있으며 적합도가 가장 우수한 회귀함수를 비교·선정할 수 있는 기능을 제공한다.

3.4 비교평가

나셀전달함수의 개선효과를 정량평가하기 위하여 풍력발전량 잔차(residual)를 산출하여 비교하였다. 풍력발전량 잔차는 이론 발전량에서 실제 발전량을 뺀 것으로, 잔차의 절대값이 작을 수록 풍력터빈의 이론적 출력곡선에 접근함을 의미한다. 이때 이론 발전량은 허브높이 풍속을 풍력터빈 출력곡선에 대입하여 계산한 발전량을 의미한다. 따라서 나셀풍속 및 라이다 풍속에 의한 이론 발전량을 산출하였으며, 실제 발전량은 풍력터빈 운영 기록인 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 자료이다. 참고로 Mitsubishi MWT-1000A 1MW 풍력터빈의 출력곡선은 Fig. 6 과 같다.

4. 연구결과

4.1 독립변수 선정

풍력터빈 가동 시에 SCADA 측정요소와 라이다 측정요소 간의 교차 상관행렬을 Table 1 에 제시하였다. 측정요소로는 풍력발전기 출력(P), 나셀풍속(V_N) 및 표준편차(S_N), 라이다가 측정한 자연풍속(V_L; 이후 라이다 풍속) 및 표준편차(S_L), 그리고 기온차(dT)이다. 기온차는 나셀 높이와 라이다 높이 간의 기온차(dT=T_N-T_L)다.

중속변수인 라이다 풍속(V_L)과 높은 상관도를 보이는 SCADA 측정요소는 나셀풍속(V_N)과 나셀

Table 1 Cross-correlation matrix for operational status of wind turbine

	P	V _N	S _N	dT	V _L	S _L
P	1	0.96	0.29	-0.23	0.93	0.53
V _N		1	0.41	-0.22	0.98	0.62
S _N			1	-0.07	0.39	0.85
dT				1	-0.22	-0.16
V _L					1	0.62
S _L						1

Table 2 Coefficient of the rational model equation (1)

Coeff.	Value	Standard error	Range (95% confidence)
a	1.066341	0.057994	0.95266 to 1.18002
b	0.748946	0.027299	0.69543 to 0.80246
c	-0.014446	0.003708	-0.02171 to -0.00718
d	-0.000271	0.000160	-0.00059 to 0.00004

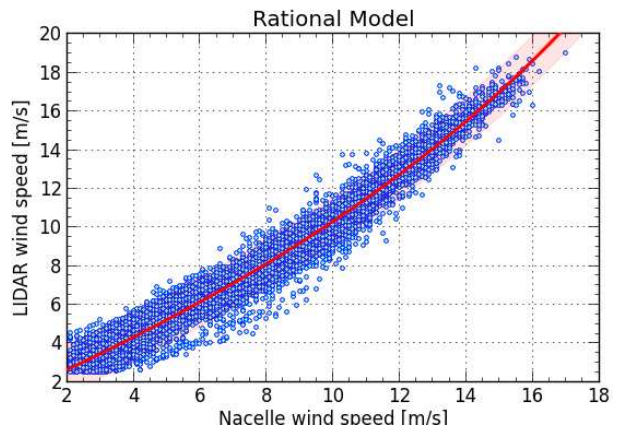


Fig. 7 1-parameter regression plot of the Nacelle Transfer Function by rational model

풍속 표준편차(S_N)이다. 대기안정도와 관련이 있는 기온차(허브높이와 지상)는 미약한 상관도가 보이지만 설명력이 높지 않기 때문에 독립변수로는 선택하지 않았다.

4.2 단순회귀분석

나셀풍속을 독립변수(x)로, 라이다 풍속을 종속변수(y)로 놓고서 비선형 단순회귀분석을 통해 다음과 같이 Rational 함수로 표현되는 나셀전달함수를 얻었으며, 회귀계수는 Table 2 에 정리하였다.

$$y = \frac{a + b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2} \tag{1}$$

Fig. 7 은 지상 70m 높에서 측정된 풍력터빈 나셀풍속과 라이다 풍속의 산포도와 함께 비선형 회귀분석 그래프를 보여준다. 참고로 풍속은 10 분-평균으로 환산하였다. 회귀곡선을 보면 풍속 10m/s 이전까지는 나셀풍속과 라이다 풍속의 차이가 없지만 정격풍속 이후부터는 라이다 풍속이나 셀풍속보다 단조적으로 커지는 경향이 보인다.

4.3 다중회귀분석

나셀풍속과 나셀풍속 표준편차를 독립변수(x_1, x_2)로, 라이다 풍속을 종속변수(y)로 놓고서 비선형 다중회귀분석을 통해 다음과 같이 Rational 함수로 표현되는 나셀전달함수를 얻었으며, 회귀계수는 Table 3 에 정리하였다.

$$y = \frac{a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2}{1 + d \cdot x_1 + e \cdot x_2} \quad (2)$$

Fig. 8 은 라이다 풍속과 나셀풍속 및 나셀풍속 표준편차의 상관관계를 보여주는 3 차원 그래프로, 격자곡면은 식 (2)의 회귀분석 결과이다.

Table 3 Coefficient of the rational model equation (2)

Coeff.	Value	Standard error	Range (95% confidence)
a	1.395232	0.034363	1.32787 to 1.46259
b	0.672489	0.007344	0.65809 to 0.68689
c	-0.055471	0.055789	-0.16482 to 0.05389
d	-0.022036	0.000496	-0.02301 to -0.02106
e	0.002012	0.005089	-0.00796 to 0.01199

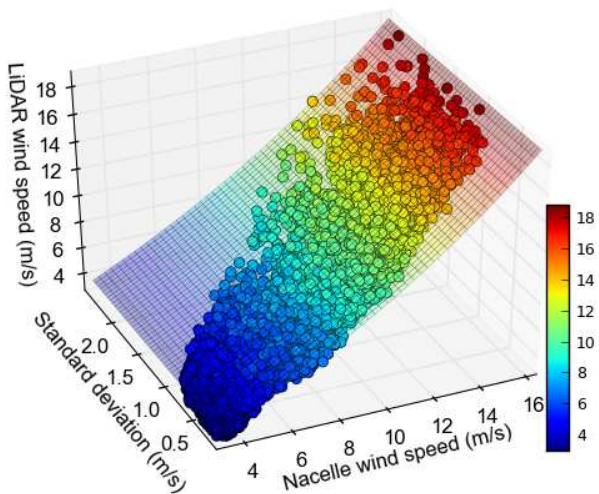


Fig. 8 2-parameter regression plot of the Nacelle Transfer Function by rational model

4.4 회귀분석 적합도

단순회귀분석 및 다중회귀분석에 의한 나셀전달 함수의 적합도(fitness)를 Table 4 에 비교·평가하였다. 단순회귀분석에 비해 다중회귀분석의 적합도가 표준오차는 9.35% 감소하였으나 결정계수는 0.15%로 매우 미약하게 증가하였다. 따라서 표준 오차로 비교한 경우에는 다중회귀분석의 적합도가 향상되었다고 볼 수 있다.

풍속 회귀분석의 잔차를 비교한 Fig. 9를 보면 다중회귀분석은 단순회귀분석에 비하여 오차분포가 약간 감소하였으나, 풍속 표준편차 회귀분석의 잔차를 비교한 Fig. 10을 보면 단순회귀분석에 비하여 확실히 개선되었음을 볼 수 있다.

Table 4 Fitness of regression Eqs. (1) and (2)

	Eq. (1)	Eq. (2)	Comparison
Standard error	0.64729	0.58680	-9.35 %
Coefficient of determination	0.96976	0.97124	+0.15 %

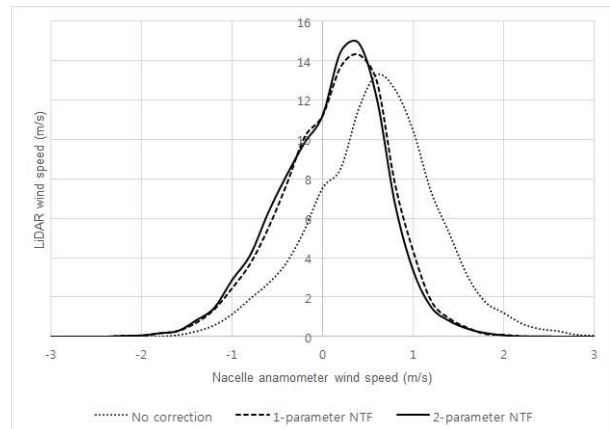


Fig. 9 Distributions of regression residuals of wind speed

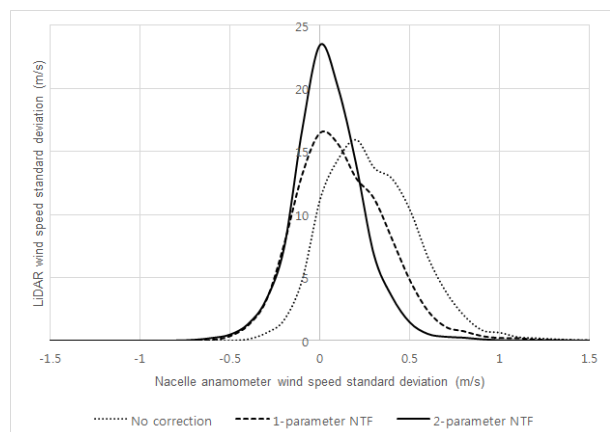


Fig. 10 Distributions of regression residuals of wind speed standard deviation

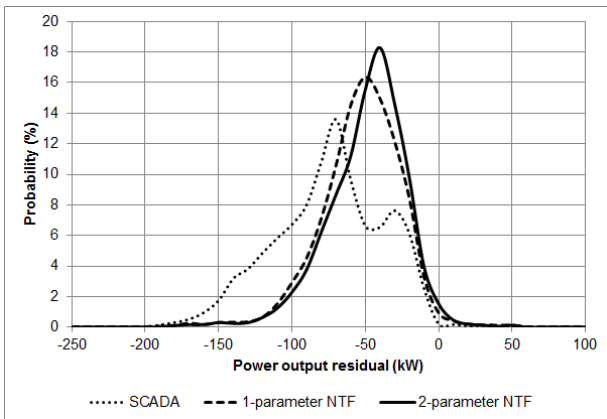


Fig. 11 Distributions of power output residuals by Eqs. (1) and (2)

4.5 발전량 잔차

나셀전달함수의 개선효과는 풍력터빈 발전량 잔차의 감소 여부로 판정할 수 있다. 즉, 미보정된 나셀풍속을 풍력터빈 출력곡선에 대입하여 발전량을 계산할 경우 오차가 포함되므로 잔차가 커지는 반면, 나셀전달함수로 보정할 경우 잔차가 작아지게 된다. 또한 나셀전달함수에 의한 보정의 정확도가 높아지면 이와 비례하여 발전량 잔차가 감소할 것이다.

단순회귀분석 및 다중회귀분석에 의한 나셀전달함수를 적용하여 계산한 발전량 잔차의 분포를 Fig. 11 에 도시하였다. 미보정 경우의 잔차분포는 이종 봉우리와 넓은 산포(-80±37kW)를 보이는 반면, 나셀전달함수를 적용한 잔차분포는 모두 정규분포를 보인다. 다중회귀분석은 54±26kW, 단순회귀분석은 58±27kW 로 다중회귀분석에 의한 나셀전달함수가 단순회귀분석에 비해 상대적으로 개선효과가 큰 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

풍력터빈 나셀에 장착된 풍속계가 측정한 나셀 풍속을 블레이드에 입사하는 자연풍속으로 보정하는 나셀전달함수는 풍력터빈 제어의 정확도 향상을 비롯한 다양한 공학적 활용 및 풍력터빈 성능평가의 신뢰성 확보를 위해 보정 정확도의 향상이 요구된다.

본 연구에서는 전라남도 신안군 비금도 신안풍력발전소의 Mitsubishi MWT-1000A 1MW 풍력터빈을 대상으로 나셀전달함수를 유도하였으며, 다음과 같은 결론은 도출하였다.

(1) 지상기반 원격탐사장비인 라이다(LiDAR)로 자연풍속을 측정하였으며, 지형지물의 영향을 배

제할 수 있는 해풍 구간만을 분석에 사용하였다. 또한 풍력터빈 블레이드가 회전하지 않았던 기간도 제외하였다.

(2) 라이다 풍속과 상관도가 높은 측정변수로 나셀풍속과 나셀풍속 표준편차를 독립변수로 선택하였으며, 비선형 다중회귀분석을 수행하여 Rational 함수 형태의 나셀전달함수를 유도하였다.

(3) 다중회귀분석이 단순회귀분석과 비교하여 표준오차 9.35% 감소, 결정계수 0.15% 증가로 회귀분석 적합도가 높음을 확인하였다.

(4) 풍력발전량 잔차 분석을 통해 다중회귀분석에 의해 유도된 나셀전달함수로 나셀풍속을 보정할 경우 단순회귀분석 대비 발전량 잔차의 평균이 6.5% 감소하여 개선효과가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업으로 수행한 결과이며(GP2014-0030), 대한민국 특허등록되었습니다(라이다 측정을 이용한 나셀 풍속계 보정 방법, 10-1383792).

참고문헌 (References)

- (1) International Electrotechnical Commission (IEA), 2008, *WIND TURBINES – Part 12-2: Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines Based on Nacelle Anemometry*, IEC 61400-12-2.
- (2) Antonius, I. and Pedersen, T.F., 1997, *Nacelle Anemometry on a 1MW Wind Turbine: Comparing the Power Performance Results by Use of the Nacelle or Mast Anemometer*, Rosie-R-941(EN), Risoe National Laboratory, Denmark.
- (3) Hunter, R., Pedersen, T. F., Dunbabin, P., Antoniou, I., Frandsen, S., Klug, H., Albers, A. and Lee, W. K., 2001, *European Wind Turbine Testing Procedure Developments, Task 1: Measurement Method to Verify Wind Turbine Performance Characteristics*, Risø-R-1209(EN), Risoe National Laboratory, Denmark.
- (4) Smith, B., Link, H., Randall, G. and McCoy, T., 2002, *Applicability of Nacelle Anemometer Measurements for Use in Turbine Power Performance Tests*, NREL/CP-500-32494, National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA.
- (5) Kim, H. W. 2013, *Wind Turbine Power Performance Testing Using Nacelle Transfer Function and Uncertainty Analysis*, M.S. Thesis, Multidisciplinary Graduate School, Jeju National University, Korea.
- (6) Ziter, B., 2010, *Alternative Methods Of Estimating Hub-Height Wind Speed For Small Wind Turbine*

- Performance Evaluation*, M.S. Thesis, Dept. of Applied Science, The University of Guelph, Canada.
- (7) Kim, S. S. and Park, S. W., 2012, "Evaluation of Power Performance by Anemometer on Wind Turbine Generator System," *J. of Sensor Science and Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 303~310.
- (8) Siebers, T., Kooijman, H. J. and Rogers, D., 2008, *Anemometer Calibration Method and Wind Turbine*, US Patent, US 2008/0307853 A1, General Electric.
- (9) Kim, K. H., Shon, C. H., Ha, I. C. and Lee, J. S., 2012, *System and Method for Compensation Nacelle Wind Velocity of Wind Turbine*, Korea Patent, 10-1215503, Samsung Heavy Industry.
- (10) Kim, H. G., 2014, *Method of Calibration of Nacelle Anemometer using LiDAR Measurements*, Korea Patent, 10-1383792, Korea Institute of Energy Research.
- (11) Kim, H. G., Ahn, H. J., Yang, S. J., Park, W. J. and Kim, S. W., 2013, "Calibration Equation for Nacelle Anemometer Derived by LIDAR Measurements," *J. of New & Renewable Energy*, Vol. 9, No. 1, pp. 12~16.
- (12) Kim, H. G. and Kang, Y. H., 2012, "The 2010 Wind Resource Map of the Korean Peninsula," *J. of Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 16, No. 4, pp. 167~172.