

U50 풍력발전기 출력성능 실증연구

황 진수¹⁾, 장 성태²⁾, 김 대현³⁾, 방 조혁⁴⁾, 류 지윤⁵⁾

The Field Test of Power Performance Measurement for U50 Wind Turbine

Jin-su Hwang, Seong-Tae Jang, Daehyun Kim, Jo-Hyug Bang, Ji-Yune Ryu

Key words : Site Calibration(현장 보정), Correction factor(보정 계수), Power Curve(출력 곡선), Power Coefficient(출력 계수), Annual Energy Production(연간 에너지생산량)

Abstract : 750kW gearless type wind turbine, named U50, is developed by UNISON in Korea. The newly developed wind turbine should be evaluated the power curve and the estimated annual energy production by following international standard to verify the power performance characteristics. This paper shows the test and evaluation procedure according to IEC 61400-12-1 which specifies a procedure of measuring the power performance characteristics of a single wind turbine and applies to the testing of wind turbines of all types and sized connected to the electrical power network. And this paper also shows the power performance characteristics for U50 wind turbine which is determined in accordance with IEC regulation.

Nomenclature

D_e : the equivalent rotor diameter
 L_e : distance between wind turbine and obstacle
 l_h : the hight of obstacle
 l_w : the width of obstacle
 D_n : the rotor diameter of wind turbine
 L_n : distance between wind turbine and other turbine
 ρ_{10min} : derived 10 min averaged air density
 T_{10min} : measured air temperature averaged 10 min
 B_{10min} : measured air pressure averaged 10 min
 R_0 : gas constant of dry air 287.05 J/(kg×K)
 V_n : normalized wind speed
 V_i : normalized and averaged wind speed in bin i
 P_i : normalized and averaged power output in bin i
 $F(v)$: Rayleigh cumulative probability distribution function for wind speed

subscript

AEP : Annual Energy Production
 Cp : Power coefficient
 SD : Standard Deviation
 H_h : Hub Height
 CT : Current Transformer
 PT : Power Transformer

1. 서론

풍력발전기의 성능에 있어서 출력성능은 풍력발전기의 최종목표인 전력생산량을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 출력성능 측정은 제작사의 입장에서는 신뢰성 확보를 위하여 형식인증(Type certificate)을 획득하기 위한 필수항목이며, 단지개발자의 입장에서는 경제성 분석을 위한 필수 요구데이터이다. 이에 따라서 IEC 61400-12-1에서는 출력성능의 객관성과 정확성을 향상시키기 위하여 측정절차, 해석방법 및 보고방식에 대한 기준을 제시하고 있다¹⁾.

본 논문에서는 IEC에서 제시하고 있는 출력성

-
- 1) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : jshwang@unison.co.kr
Tel : (041)620-3412 Fax : (041)552-7416
 - 2) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : stjjang@unison.co.kr
Tel : (041)620-3419 Fax : (041)552-7416
 - 3) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : daehyun@unison.co.kr
Tel : (041)620-3416 Fax : (041)552-7416
 - 4) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : bjhzone@unison.co.kr
Tel : (041)620-3417 Fax : (041)552-7416
 - 5) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : jyryu@unison.co.kr
Tel : (041)620-3410 Fax : (041)552-7416

능 측정방법을 소개하고, 이에 따라서 측정된 750kW 국산화 풍력발전기에 대한 출력성능 결과를 소개하고자 한다.

2. 출력성능평가 절차 소개

출력성능 평가는 위치 조사, 측정, 데이터 분석 및 보정, 결과 도출 및 불확도 계산 순으로 진행된다. 위치조사 단계에서는 지형 및 장애요소에 의한 영향을 분석하고 필요에 따라서는 보정계수를 산출하며, 측정단계에서는 계측시스템 구축 및 성능평가에 필요한 데이터를 수집한다. 데이터 분석 및 보정단계에서는 풍향, 난류강도, 풍력발전기 가동상태 등을 고려하여 성능평가를 위한 데이터를 선택하며 보정계수, 공기밀도에 대한 보정을 수행한다. 이러한 절차를 통하여 획득된 데이터는 최종적으로 도출하고자 하는 출력곡선, 연간에너지 생산량(AEP)과 출력계수(Cp)를 계산하는데 활용되며, 마지막으로 이에 대한 불확도를 계산한다. 그림 1은 출력성능 평가절차를 보여주고 있다.

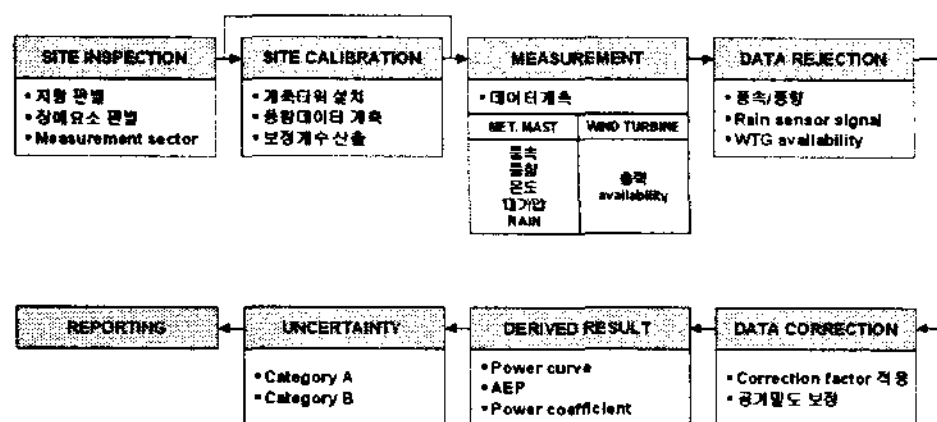


Fig. 1 Procedure of power performance measurement

3. 출력성능 평가

3.1 대상기종

출력성능 평가를 위한 대상기종은 2004년 말에 개발된 750kW gearless형 풍력발전기이다. 본 기종의 설계등급은 IEC TC IA이며, 출력제어는 피치제어방식을 채택하고 있다. 또한 영구자석 동기발전기와 전력변환장치를 사용하여 가변속 운전특성을 가지고 있으며, 기어가 없는 직접구동 동력전달방식을 채택하고 있다.

Table 1 Main specification

Design	Rated power	750 kW
	Cut-in/rated/cut-out	3.0/12.0/25.0 m/s
	Type class	IEC TC IA
Rotor	Rotor diameter	50 m
	Operational rpm	9 ~ 28 rpm
	Power regulation	Pitch control
Drive train	Type	Direct drive
Generator	Type	Permanent magnet
Grid connection		AC/DC/AC inverter
Tower	Type	Tubular steel tower
	Hub height	50 m
Brake system	Air brake	Full feathering
	mechanical brake	Hydraulic disc brake
Yaw system	Typ	Electric drive
	Brake	Hydraulic disc brake
Control system		PLC Controller

3.2 현장조사(Site inspection)

Site inspection은 계측타워 및 풍력발전기의 설치위치를 선정하고, 성능측정을 위한 풍속구간 선정 및 site calibration의 필요성을 판단하기 위한 절차이다.

IEC 국제기준에서는 성능평가를 위한 계측타워 및 풍력발전기 간 이격거리는 풍력발전기 회전자 직경의 최소 2배에서 최대 4배 이내에 위치하여야 하며, 지형 및 장애물의 영향에 대하여 고려하여 성능평가 가능영역에 대한 규제를 하고 있다. 성능평가 가능영역을 조사하기 위해서는 장애물의 경우 식 (1)에 따라서 등가 회전자 직경을 계산하여야 하며, 식 (2)에 따라서 풍력발전기 및 장애물에 의한 방해각도를 계산하여야 한다.

$$D_e = \frac{2 \cdot l_h \cdot l_w}{l_h + l_w} \quad (1)$$

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5 \frac{D_{e(n)}}{L_{e(n)}} + 0.15) + 10 \quad (2)$$

본 연구에서는 '대관령 풍력실증연구단지'에 대하여 지형 장애물에 대한 영향을 조사한 결과 주변 풍력발전기 및 건물의 영향 의하여 123° ~ 300°의 영역에서 성능평가가 가능한 영역으로 조사되었으며, 지형의 기울기 분포는 10° ~ 25°를 나타내고 있어 site calibration이 수행되어야 하는 것으로 나타났다.

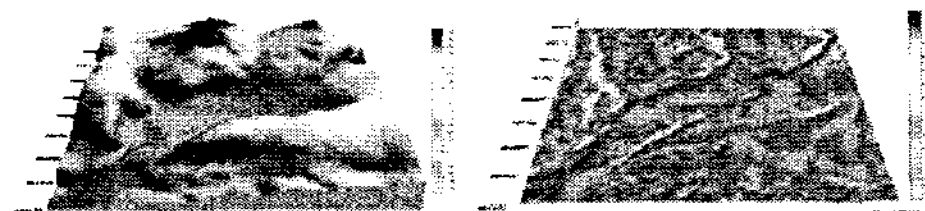


Fig. 1 Terrain and slope map of the site



Obstacle	Disturbed sector
J48	68.0° (5.0° ~ 73°)
Hyosung wind turbine	70.5° (300.75° ~ 11.25°)
Renewable energy exhibition center	57.4° (327.3° ~ 24.7°)
Wind turbine wake	79.2° (43.4° ~ 122.6°)

Fig. 2 Result of disturbed sector

3.3 현장 보정(Site Calibration)

Site calibration은 풍력발전기의 구동풍속을 정확하게 측정하기 위하여 풍력발전기와 계측타워 간의 보정계수(correction factor)를 계산하는 절차이다. 보정계수는 추후 성능평가 시에 계측타워에서 계측한 풍속데이터를 이용하여 풍력발전기 위치의 풍속을 산출하기 위한 계수로 활용된다.

IEC 기준에서는 보정계수를 산출하기 위하여 데이터 계측과 요구 데이터량에 대하여 제시하고 있다.

○ Data acquisition

- Sampling rate : 1 Hz or higher
- Average time : 10 min
- Wind direction bin : 10°

○ Required data

- 4 ~ 8 m/s : Min. 2 hours
- 8 ~ 16 m/s : Min. 2 hours
- 4 ~ 16 m/s : Min. 24 hours

본 연구에서는 2005년 7월부터 약 2개월간에 걸쳐서 site calibration을 수행하였으며, 방위각 250° ~ 280° 구간에 대하여 보정계수를 확보하였다. 계측데이터 분석결과, permanent mast와 temporary mast간의 풍속비가 2%를 초과하는 것으로 나타나 MEASNET guideline에 따라서 5° 간격으로 보정계수를 산출하였다²⁾.

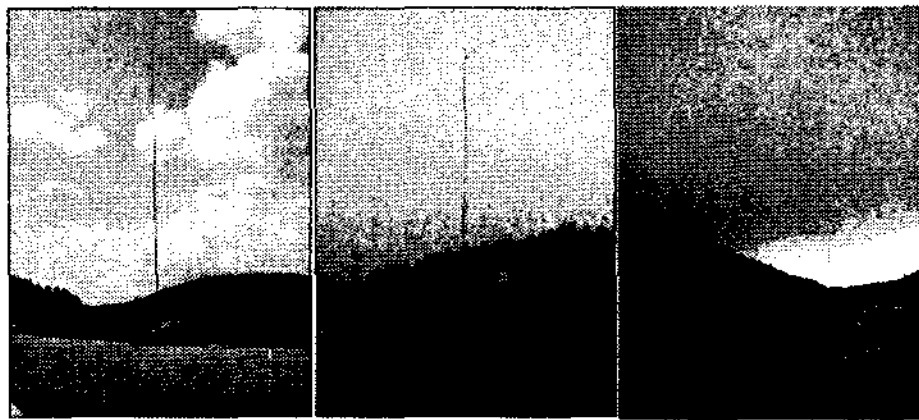


Fig. 3 Permanent and temporary mast

Table 2 Result of Site Calibration

Bin	Data(4~8/8~16)	Correction factor
250° - 255°	270(107/163)	0.9681
255° - 260°	521(197/324)	0.9791
260° - 265°	688(273/415)	0.9725
265° - 270°	637(280/357)	1.0035
270° - 275°	367(265/102)	1.0220
275° - 280°	203(195/8)	1.0287

3.4 출력성능 측정 및 평가

3.4.1 계측시스템 구축

출력성능을 측정하기 위한 물리량은 풍속, 풍향, 공기밀도, 압력 및 강수 등 환경적인 정보와 출력, 가동상태 등 풍력발전기의 상태정보가 있다. 풍속을 측정하기 위하여 풍속계는 허브 높이의 2.5% 이내에 설치되어야 하며, 풍향계는 풍속계와 최소 1.5m 간격을 유지하면서 허브 높이의 10% 이내에 설치되어야 한다. 또한 온도계는 허브 높이의 10m 내에 설치되어야 한다. 표 3은 출력성능 측정을 위하여 선정한 측정물리량 및 센서를 보여주고 있다.

Table 3 Selection of Measurement Data

Item	Sensor	Requirement
wind speed 1	Anemometer	Up to 2.5% of H _h
Wind speed 2	Anemometer	Up to 2.5% of H _h
Wind direction	Wind vane	Up to 10% of H _h
Air temp.	Air pressure sensor	Up to 10m from H _h
Air pressure	Temperature sensor	-
Precipitation	Rain sensor	-
Current	Current transformer	0.5 Class or better
Voltage	Voltage transformer	0.5 Class or better
Electric power	Power transducer	0.5 Class or better
availability	Nacelle controller	-

본 연구에서는 풍속 측정을 위하여 50.8m 높이에 풍속계를 설치하였으며, MEASNET 절차에 따라서 4 - 16m/s까지 교정을 실시하였다. 또한 풍향 측정을 위하여 potentiometer 풍향계를 47m 높이에 설치하였고, 0.2 Class급 CT와 0.5 Class급 PT를 이용하여 출력을 측정하였다. 이 밖에도 공기밀도 보정 및 기상관측을 위하여 온도센서, 압력계 및 rain sensor를 설치하였으며, 나셀제어기로부터 가동상태 신호를 입력받도록 구성하였다. 그림 4는 본 연구를 위하여 구축한 계측시스템 구성도를 보여주고 있다.

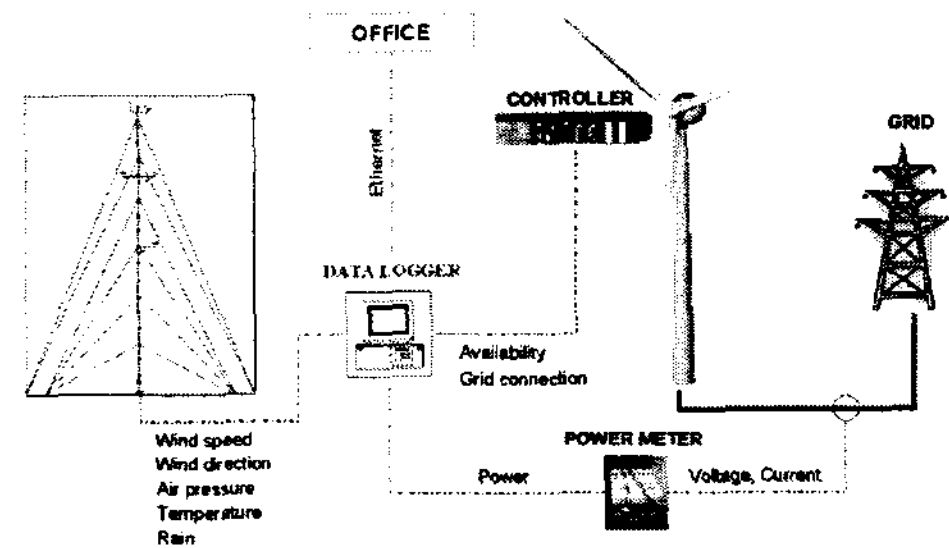


Fig. 4 Configuration of measurement system

3.4.2 데이터 계측 및 보정

본 연구에서는 약 3개월간에 걸쳐서 데이터 계측을 수행하였으며, 난류강도, 강수, 발전기 정지상태, 방해각도 조건에서의 운전데이터 등을 제외한 총 1,438개의 10분 평균 데이터를 수집하였다.

계측된 데이터는 우선적으로 풍향 bin별 보정계수에 의한 풍속보정을 적용하였다. 공기밀도는 식(3)을 이용하여 ISO 표준공기밀도인 1.225 kg/m³로 일반화하여 적용하였고, 식(4)를 이용하여 풍속보정을 수행하였다. 그림 5는 이러한 절차에 의하여 보정된 데이터의 풍속대비 출력 그래프를 보여주고 있다.

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{R_0 \cdot T_{10min}} \quad (3)$$

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

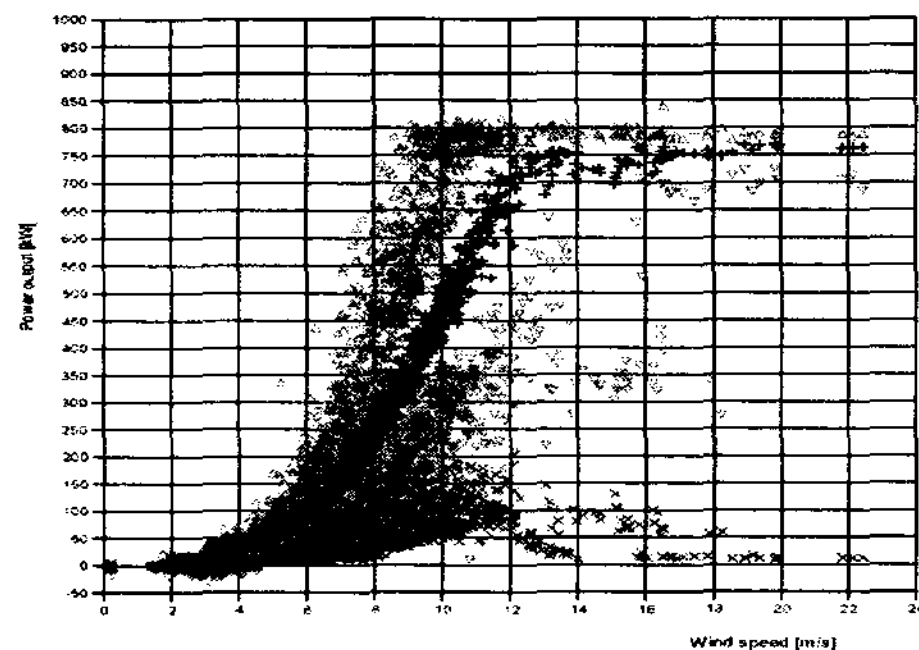


Fig. 5 Normalized V vs. P data plot

3.4.3 출력곡선 및 출력계수 계산

보정이 적용된 일반화된 데이터는 0.5m/s의 풍속 bin block으로 분류하여, 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 각각의 풍속 bin에 대한 평균 풍속 및 평균 출력을 계산하였다. 또한 계산된 평균 풍속 및 평균 출력을 이용하여 식 (7)에 따라서 각각의 풍속 bin에 대한 Cp를 산출하였다. 그림 6은 이러한 과정을 통하여 도출된 출력곡선 및 출력계수 곡선을 보여주고 있다.

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (5)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (6)$$

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (7)$$

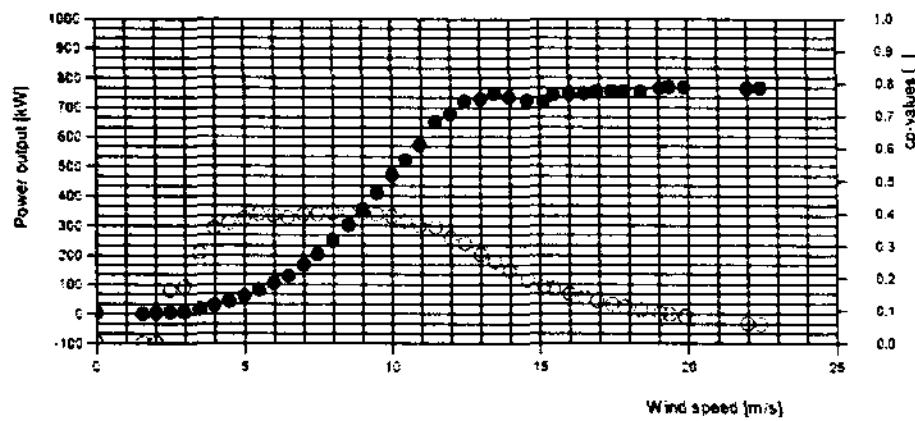


Fig. 6 Power curve and Cp curve

3.4.4 연간 에너지 생산량 계산

계산된 출력곡선을 이용하여 연간 에너지 생산량을 계산하기 위해서는 풍속 빈도분포가 요구되어 진다. IEC 기준에서는 평균 풍속 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 m/s에 대한 연간 에너지 생산량을 계산하도록 요구하고 있으며, 풍속 빈도분포는 Rayleigh distribution을 적용하도록 규정하고 있다. 이에 따라서 본 연구에서는 각각의 평균 풍속에 대하여 식 (8)을 이용하여 풍속 빈도분포를 계산한 후 식 (9)를 이용하여 연간 에너지 생산량을 계산하였다. 그림 7은 이러한 계산에 의하여 도출된 연간 에너지 생산량 결과를 보여주고 있다.

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

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

ESTIMATED ANNUAL ENERGY PRODUCTION (AEP)				
Extrapolation of power curve between the highest measured wind speed and the cut-out wind speed considering the same power output as the measured at the highest measured wind speed		WT type	U50 750kW	
		Cut-out wind speed	25 m/s	
		Reference air density	1.225 kg/m ³	
		Rotor swept area	1063.5 m ²	
annual average wind speed at hub height (Rayleigh)	AEP measured (measured power curve)	uncertainty of measured power in terms of standard deviation of AEP		AEP-extrapolated (extrapolated power curve)
[m/s]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]
4.0	495.0	51.2	12.6	495.0
5.0	929.7	91.0	9.8	930.6
6.0	1461.0	119.5	8.2	1473.7
7.0	1978.9	141.1	7.1	2043.2
8.0	2392.1	154.6	6.5	2584.6
9.0	2670.3	161.2	6.0	3004.3
10.0	2816.8	162.9	5.8	3462.3
11.0	2857.2	161.3	5.6	3769.1

Fig. 7 Calculated Annual Energy Production

3.4.5 출력성능 인증서 확보

본 연구는 출력성능의 객관성을 확보하기 위하여 국제 공인 형식시험기관인 WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH와 공동으로 수행하였으며, 최종적인 연구결과로 출력성능 인증서를 확보하였다. 그림 8은 본 연구를 통하여 획득한 형식시험 인증서를 보여주고 있다³⁾.

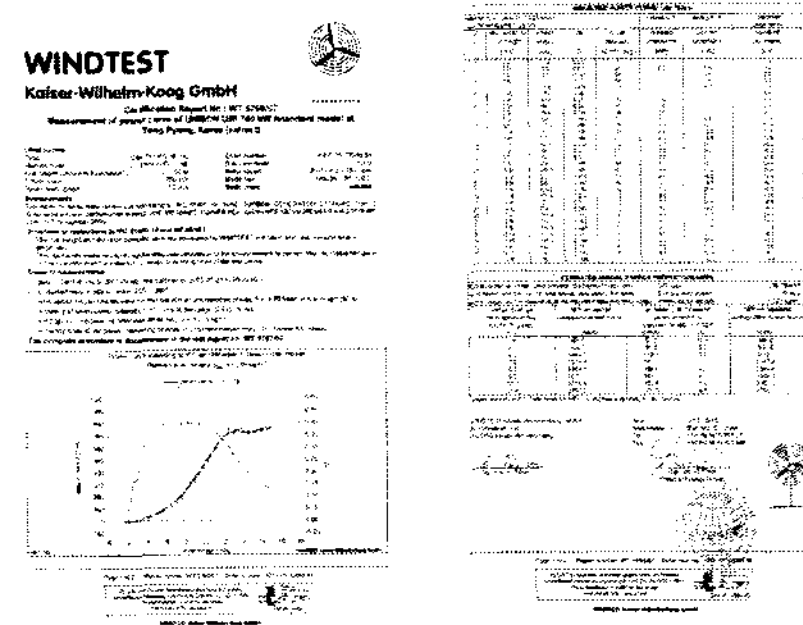


Fig. 7 Certificate for power curve measurement

4. 결론

본 연구에서는 출력성능에 대한 국제기준인 IEC 61400-12-1에 따른 풍력발전기 출력성능 평가 절차에 대하여 제시하였고, 국산화 개발된 750kW 풍력발전기에 적용하여 출력성능을 측정 및 평가하였다. 또한 국제 공인 시험기관으로부터 출력성능 형식시험 인증서를 확보하였다. 본 연구성과를 바탕으로 향후에는 발전기 제어 알고리즘 및 피치제어 알고리즘이 출력성능에 미치는 영향을 지속적으로 연구할 예정이다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지·자원 기술개발사업(과제명: 750kW Gearless형 국산화 풍력발전시스템 실증연구)의 일환으로 수행되었으며, 에너지관리공단의 지원에 감사드립니다.

References

- [1] IEC 61400-12-1 Power performance measurement of electricity producing wind turbines, First edition, Dec. 2005
- [2] MEASNET Power performance measurement procedure, version 3, Nov. 2000
- [3] WINDTEST, Power performance measurement on the UNISON U50 750kW at Yong Pyong, Korea, according to IEC 61400-12 and MEASNET, WT5767/07, June 2007