

6kW 풍력발전기의 출력곡선 측정

Power Curve Measurements on the 6kW Wind Turbine

유 능 수* 남 윤 수** 이 정 완** 조 주 석***
Yoo, Neung-Soo Nam, Yoon-Su Lee, Jung-Wan Cho, Joo-Suk

Abstract

The power performance monitoring system for a small class of wind turbine is established. The wind turbine power performance characteristics are determined by measured power curve and the estimated annual energy production (AEP). The measured power curve is determined by collecting simultaneous measurements of wind speed and power output at the test site under varying wind conditions. In order to determine the power performance characteristics of the wind turbine accurately, the data are of sufficient quantity and quality shall be corrected according to defined criteria. In this study, the 6kW wind turbine made by Germany Inventus GmbH is examined.

키워드 : 풍력발전기, 출력곡선, 연간발전량, 계측의 불확실성
Keywords : Wind Turbine, Power Curve, AEP, Uncertainty in Measurement

1. 서론

풍력 발전기(Wind Turbine ; WT)는 지난 20년 동안 전 세계적으로 꾸준히 증가해 왔다. 또한 풍력발전기의 성능을 개선시키기 위해 꾸준한 연구와 개발이 계속되고 있다[1].

풍력이 대체에너지 중 가장 경제성이 우수한 청정에너지원임이 전 세계적으로 입증됨에 따라 국

내에서도 다양한 사업이 추진되고 있다[2]. 특히 강원도의 경우, 태백준령을 중심으로 풍부한 풍력 자원을 확보하고 있는 것으로 확인됨에 따라 청정 대체 에너지원으로서의 풍력발전에 대한 투자가 활발히 이루어지고 있다[3].

국내 풍력발전사업의 활성화를 위해 WT의 국산화개발이 수행 중이다. 그러나 WT의 국산화 개발을 촉진하고 보급을 위하여서나, 외국산 WT의 보급을 위하여서는 국가가 인증하는 WT성능 평가가 절대적으로 필요하다. 이는 또한 소비자 보호 측면에서 더욱 그러하다. 현재 국내에서는 실증연구와 더불어 소형 WT(1~10kW)에 대한 성능평가 사업이 진행 중이다[2].

본 연구는 현재 대관령 시험사이트(Test Site)에서 가동 중인 독일 INVENTUS GmbH사의 INVENTUS 6 독립형(Stand-Alone) WT의 출력

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 부교수, 공학박사

*** 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과 대학원 석사과정

곡선(Power Curve)과 연간발전량(Annual Energy Production ; AEP)을 측정하여 출력 성능을 평가하는 것을 목적으로 한다. 이 연구는 전 세계적으로 통일된 기준 규격서인 IEC61400-12의 규정에 준하여 수행하였다[4].

2. 풍력발전기와 풍황계 측타워

2.1 6kW 풍력발전기

Figure 1은 대관령 풍력실증단지에 설치된 INVENTUS GmbH사의 6kW급 INVENTUS 6 WT 설치 사진이다. INVENTUS 6 WT는 시동풍속(Cut-In)이 3m/s로 강풍의 빈도가 비교적 낮은 우리나라의 풍황에 적합하다. 이 WT의 특성 등은 Table 1, 2와 같다. 이 WT는 수동피치제어(Passive Pitch Regulation) 방식을 사용하므로 출력(Power)이나 회전속도(rpm)의 제어를 간소화하였으며 강풍에서도 작동 가능 하게 하였다. 또한 타워 설치 시 콘크리트나 복잡한 구조물을 사용하지 않아 경량이며 설치가 간단하여 설치비 절감은 물론 설치장소의 제한성으로 부터 자유로울 수 있는 장점을 갖고 있다.



Fig. 1 6kW Wind turbine test model

Table 1 The specification of the 6kW wind turbine

| Wind turbine model | | INVENTUS 6 |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Rotor | Diameter | 6.0 (m) |
| | Number of Blade | 4 |
| | Arrangement | Windward |
| | Speed | 80-145 (rpm) |
| | Blade Mass | 4*12 (kg) |
| Wind speed | Rated power | 6 (kW) |
| | Cut-in speed | 3.0 (m/s) |
| | Rated speed | 10.5 (m/s) |
| | Cut-out speed | 30 (m/s) |
| | Limit speed | 60 (m/s) |
| Tower | Material | Hot-Galvanied Steel Tube |
| | Height | 13/19 (m) |
| Control system | Aerodynamic Power Control | Passive Blade Pitch |
| | Electric Power Control | Pole Change, Load Resistors |
| | Aerodynamic Safe System | Blade Pitch |
| | Mechanical Safe System | Disk Break |
| | Yaw Control | Wind Vane |

Table 2 The features of the 6kW wind turbine

| | |
|-----------|---|
| Blade | <ul style="list-style-type: none"> - Steel/ Fiber-Glass Composite Structure - Hub : Rigid, Solid Steel |
| Generator | <ul style="list-style-type: none"> - Generator Type : Synchronous, Self-Contained - Electrical 8.0kW/10kVA - Speed : 0-1500 rpm - Rated Voltage : 400V, 3-Phase, 50Hz |

2.2 풍황계 측타워 (Meteorological Mast ; MM)

WT의 성능을 평가하기 위하여 WT 허브(Hub) 높이의 풍속, 풍향, 대기 압력, 온도 등을 정확히 측정하여야 한다[5]. 따라서 타워에 부착된 센서(Sensor)들이 지지대나 다른 센서들에 의하여 영향을 받지 않도록 설치하고, WT의 풍황을 측정하기 위하여 실증단지의 적당한 장소에 MM을 설치하

여야 한다[6]. Figure 2는 본 연구에서 풍력 발전 시스템의 성능평가를 위한 MM의 구성도와 실제 모습이다. 이 6kW급 WT용 풍황계측타워(MM)는 2004년 2월 시험 풍력 터빈인 IVENTUS 6와 함께 설치되어, 출력 성능평가를 위해 사용되었다. 여기에는 13m의 위치에 풍속계, 풍향계, 10m 위치에 풍속계, 지상 2m 정도 높이에 온도계, 압력계 그리고 데이터 수집박스(Data Logger)가 있다. 풍황 측정용 장비는 모두 NRG사 제품을 사용하였다.

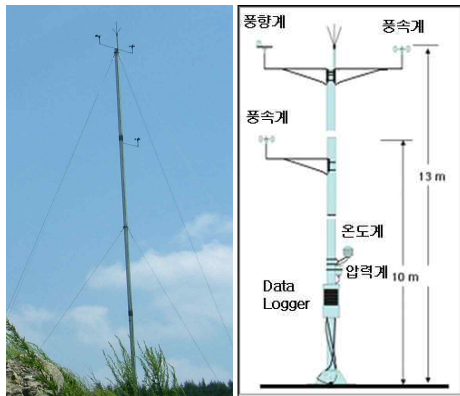


Fig. 2 The 6kW meteorological mast

3. 시험 사이트(Test Site)

3.1 시험 사이트

Figure 3의 시험 사이트는 강원도 평창군 도암면 횡계리 영동고속도로 구 대관령 휴게소(북위 37°40'55.3", 동경128°45'33.4')에 위치하고 있으며, 해발고도는 838m이다. 시험 사이트는 남쪽으로 해발고도 1,123m의 능정봉과 북쪽으로 1,157m의 선자령봉이 가로막고 있어서 서풍과 동풍계열의 바람이 주 바람 방향이며, 남풍과 북풍은 거의 없다. 시험 사이트가 위치한 대관령지역은 바람이 많고, 안개, 기온 등이 고산 기후특성을 지니고 있다.

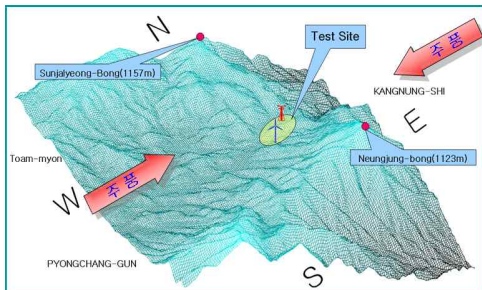


Fig. 3 3-D Map of the Daegwallyeong test site

3.2 측정방위 산정

시험 WT와 MM은 이웃하여 있는 WT와 장애물에 의해 영향을 받아서는 안 된다. 만약 출력 성능 시험(Power Performance Test)기간 동안 이웃 WT가 작동하였다면, 그 후류(Wake)영역이 계산되어야 한다. 또한 WT가 출력 성능 시험기간 동안 항상 정지되어 있다면, 그것은 장애물(Obstacle)로서 고려되어 계산하여야 한다.

시험 WT에서 이웃하여 작동하는 WT까지의 거리는 이웃 WT 로터 직경의 최소 2배가 되어야 하고, 20배가 넘을 때에는 교란영역으로서 고려되지 않는다. 이웃 WT의 후류로 인해 제외되는 교란영역은 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서, L_n (m)은 이웃 WT와 시험 WT 사이의 거리이고, D_n (m)은 이웃 WT의 로터의 직경이다. 그리고 α (deg)는 이웃한 WT의 영향을 받게 되는 교란영역이다.

$$\alpha = 1.3 \times \text{Arctan}(2.5D_n/L_n + 0.15) + 10 \quad (1)$$

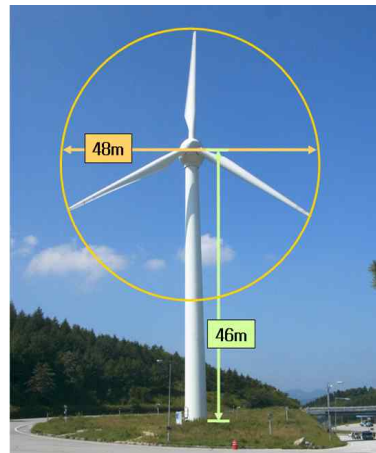


Fig. 5 750kW J-48 wind turbine

시험 WT인 6kW급 WT는 남쪽 방향에 위치하여 있는 Figure 5의 750kW급 J-48 WT의 영향을 받게 된다. 식 (1)에 의하여 시험 WT에 이웃하여 운행하고 있는 J-48 WT의 로터 직경 D_n (=48m)과 두 WT 사이의 거리 L_n (=138m)으로 계산된 α 값은 62°이고, 이는 이웃한 WT(J-48) 방향을 중심으로 한 α 값의 범위를 말한다. 그리고 시험 사이트의 서쪽에 있는 1kW WT, 남쪽에 있는 연구단지 건물 그리고 6kW급 WT 근처에 있는 MM은 기준에 따라 중요하지 않은 장애물로 풍속에 거의

영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 교란영역은 북쪽 0°를 기준으로 할 때 시계방향으로 177° ~ 239°가 된다. Figure 6은 이웃하여 작동하는 모든 WT들과 장애물에 의한 교란영역과 측정 방위 구분을 보여주고 있다.

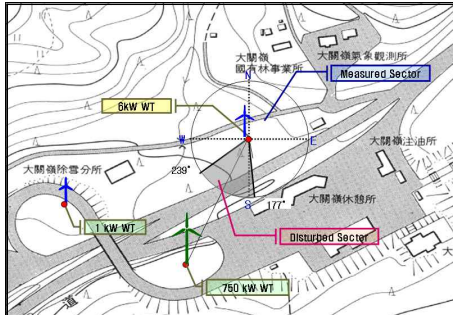


Fig. 6 Disturbed sector due to neighboring WT

3.3 실증단지의 풍황

시험 사이트에서 2004년 1월부터 2004년 12월까지 측정된 월별 평균 풍속 등의 풍황 자료를 분석한 결과가 다음의 그림들에 나타나 있다. Figure 7에서는 허브높이에서 측정된 월별 평균 풍속을 보이고 있고, Figure 8은 월별 최대풍속을 보여주고 있다. 풍력터빈의 허브높이에서의 연 평균풍속은

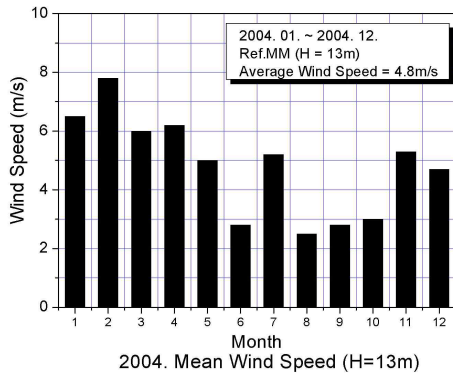


Fig. 7 Monthly mean wind speed at 13m

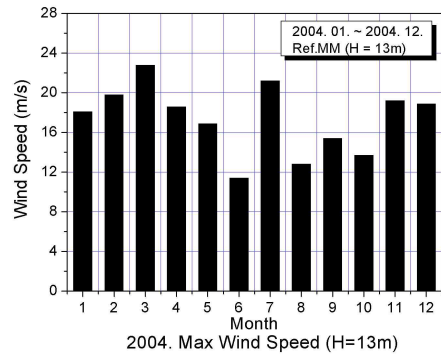


Fig. 8 Monthly maximum wind speed at 13m 4.8m/s로 측정 되었다. 측정된 데이터를 보면 대관령 시험 사이트는 주로 겨울철에 풍속이 높게 나타난다. 보통 7월은 일상 풍속이 강하지 않으나, 태풍으로 인해 크게 나타났다.

Figures 9부터 13까지는 1년간 측정된 WT 허브높이의 풍황 자료를 바람장미형으로 그려본 것이다. Figure 9는 바람이 불어온 방향의 빈도수를 백분율(%)로 나타낸 것이다. 서남서(WSW)방향으로 약 55%의 빈도수를 보여주고 있고, 약 70% 정도가 서풍계열인 것을 알 수 있다. Figure 10은 각 방향에서 풍속의 평균을 나타내고 있다. Figure 11은 풍속과 풍향의 빈도수의 곱을 나타낸다. Figure 12는 풍속의 세제곱과 풍향의 빈도수의 곱을 나타낸다. 서남서방향에서 151(m/s)³를 나타내고 있다. Figure 13은 각 풍향별 풍력에너지 밀도 (Wind Power Density)를 보여주고 있다. 서남서 방향에서 177W/m²를 나타내고 있다. 이는 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 제시한 풍력에너지밀도의 등급에서 3등급에 해당하며, 풍력발전을 하기위한 적합한 지역이라 할 수 있다[7]. 이들 바람장미로부터 대관령 풍력단지는 주풍(Main Wind)이 서풍계열과 동풍계열이지만 동풍계열의 풍속은 그다지 크지가 않기 때문에 대부분의 에너지는 서풍계열일 때 생산된다는 것을 알 수 있다.

Figures 14와 15는 대관령 시험 사이트에서 2004년 1월부터 2004년 12월까지 풍력터빈의 허브높이에서 측정된 난류강도(Turbulence Intensity)를 나타낸 것이다. 난류강도는 식 (2)와 같이 풍속의 표준편차와 평균풍속에 대한 비로 결정된다. 여기서, $\sigma_{10 \text{ min}}$ 은 10분 동안 표준편차이고, $V_{10 \text{ min}}$ 은 10분동안 측정된 평균풍속이다.

$$\text{Turbulence Intensity} = \frac{\sigma_{10 \text{ min}}}{V_{10 \text{ min}}} \quad (2)$$

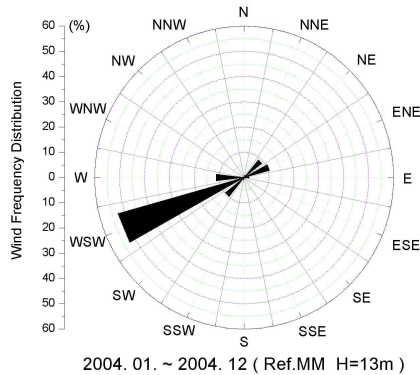


Fig. 9 Wind rose of wind frequency distribution

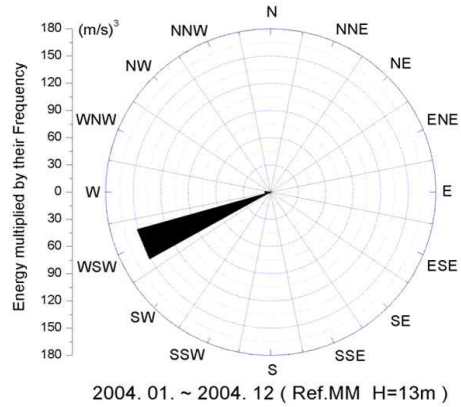


Fig. 12 Wind rose of energy multiplied by their frequency

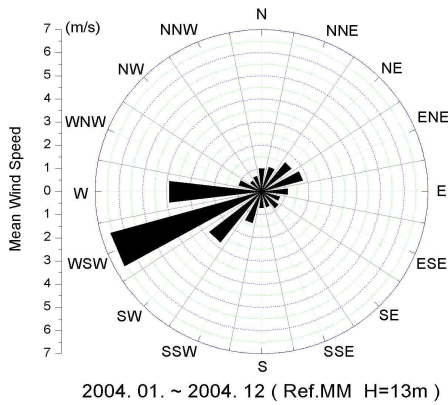


Fig. 10 Wind rose of mean wind speed

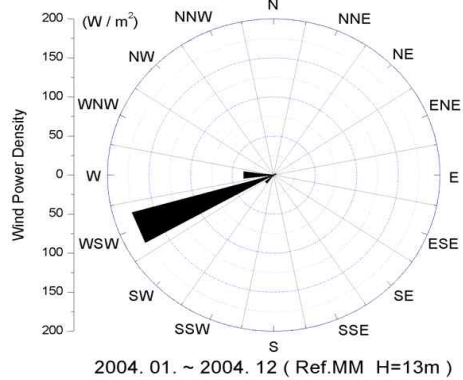


Fig. 13 Wind rose of wind power density

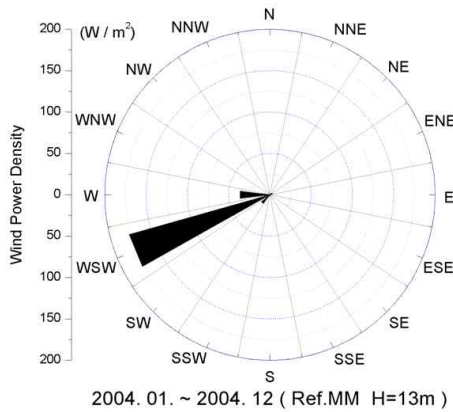


Fig. 11 Wind rose of wind speed times their frequency

Figure 14는 풍속별 난류강도의 측정 자료(Raw Data)와 1m/s씩 나눈 Bin(Bin)내에서 평균한 난류강도를 나타내고 있다. 난류강도는 복잡한 지형(Complex Terrain)일수록 크게 나타나고 또한 낮은 풍속일수록 크게 나타난다. 대관령 시험 사이트는 복잡한 지형이기 때문에 난류강도가 비교적 큰 편이다. Figure 15는 풍향별 난류강도이며, 서풍계열은 높은 풍속이어서 비교적 난류강도가 작고, 동풍계열은 낮은 풍속이므로 난류강도가 보다 큰 것을 알 수 있다.

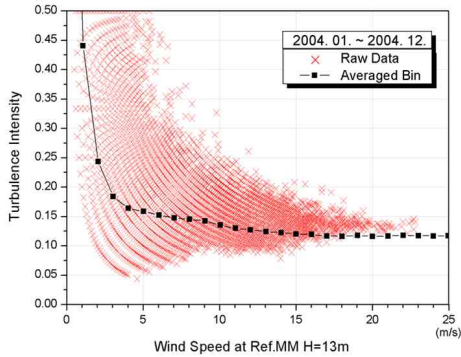


Fig. 14 Turbulence intensity for wind speed

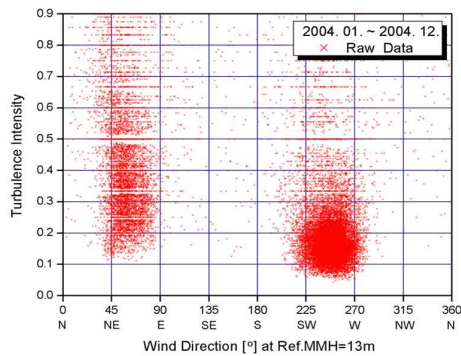


Fig. 15 Turbulence intensity for wind direction

4. 출력곡선(Power Curve)

WT의 출력성능특성은 측정된 출력곡선과 산출된 연에너지 생산량(AEP)에 의해서 결정된다. IEC61400-12에 따르면 풍속과 출력을 동시에 측정된 자료로 출력곡선과 연에너지 생산량을 계산할 것을 규정하고 있다. 풍력발전 시스템의 정확한 출력 성능을 평가하기 위해서는 정의된 규정들을 만족하는 충분한 양의 자료가 확보되었는지 확인하고, 수집해야 한다[8]. 또한, 측정의 정밀도는 측정 불확실성의 향으로 표현되며, 측정기간 동안 자료가 반복적(repeatability)이고 신뢰할 수 있는지를 주기적으로 확인해야 한다[9].

4.1 출력곡선

측정된 출력곡선은 1m/s bin들을 사용하는 표준 자료군(Normalized Data Set)에 대하여 bin방법(Method of Bin)을 적용하여 구한다. 각 풍속 bin에 대하여 표준화된 풍속과 출력의 평균값의 계산은 식 (3)과 식 (4)로 결정 된다.

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^N V_{n,i,j} \quad (3)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^N P_{n,i,j} \quad (4)$$

- V_i : bin i의 표준 평균 풍속
- $V_{n,i,j}$: bin i에서 데이터세트 j의 표준 풍속
- P_i : bin i에서의 표준 평균 출력
- $P_{n,i,j}$: bin i에서 데이터세트 j의 표준 출력
- N_i : bin i에서 10분 데이터세트의 수

Figure 16은 풍속에 따른 INVENTUS 6 풍력발전 시스템의 출력 평균값과 표준편차, 최대값, 최소값을 나타낸 것이다.

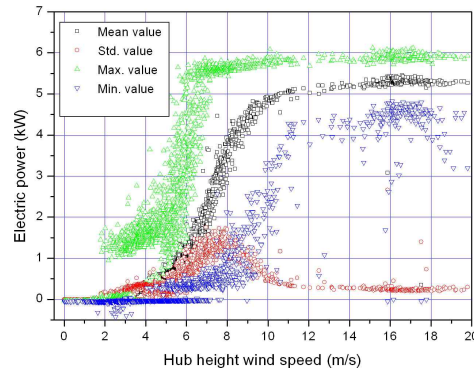


Fig. 16 Scatter plot of power raw data

Figure 17은 측정된 출력곡선과 INVENTUS에서 제공한 출력곡선을 보여주고 있다. 측정된 출력곡선이 INVENTUS에서 제공한 출력곡선보다 낮게 나온 것은 대관령 시험사이트가 복잡지형에 있기 때문에 난류에 의한 영향으로 낮게 나온 것으로 추정된다.

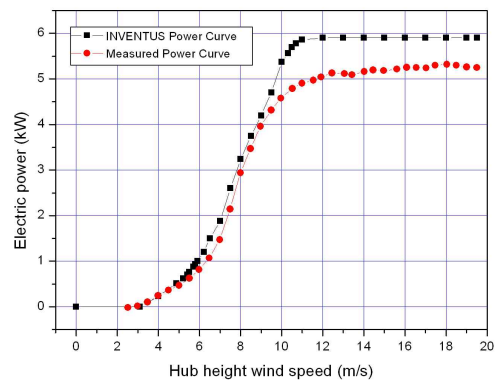


Fig. 17 Comparison between measured and INVENTUS power curve

Figure 18은 빈 방법을 이용한 출력곡선과 출력측정에 따른 불확실성을 나타내고 있다.

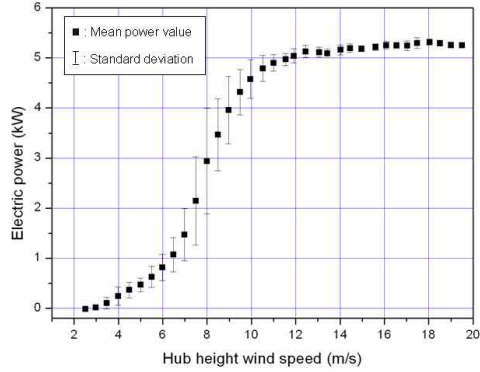


Fig. 18 Estimated power curve and uncertainty

4.2 출력계수 (Power Coefficient ; C_p)

출력계수는 풍력발전기가 얼마나 효율적으로 바람이 갖고 에너지를 전기로 전환 할 수 있는지를 알려준다. 출력계수 C_p 는 식 (5)로 얻을 수 있다. Figure 19는 각 빈에서의 풍속에 따른 출력계수를 나타내고 있다. 제작사가 제공한 자료에 의한 최대 출력계수는 0.37정도 인데 반하여 측정 최대값은 0.33 정도다. 그러나 최대출력계수에 해당되는 풍속은 8m/s로 동일하였다.

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (5)$$

$C_{P,i}$: 빈 i에서의 출력계수

V_i : 빈 i에서의 표준화된 평균 풍속

P_i : 빈 i에서의 표준화된 평균 출력

A : 풍력터빈 로터의 회전면적(Swept Area)

ρ_0 : 표준 대기밀도

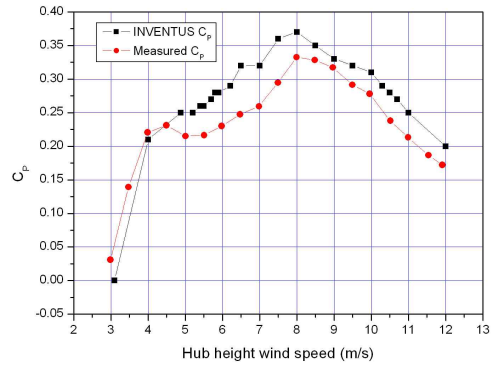


Fig. 19 Comparison between measured and INVENTUS power coefficient

4.3 연간 발전량 (AEP)

AEP는 풍속 확률밀도함수에 측정된 출력곡선을 적용함으로써 예측된다. 풍속 확률밀도 함수로는 와이불(Weibull)함수의 형상계수 (Shape Factor : k)가 2인 와이불분포, 즉 레일레이(Rayleigh) 분포가 사용된다. 아래의 식 (6)은 와이불 분포함수를 나타내는 식이고, 식 (7)은 와이불함수의 척도계수 (Scale Factor : c)를 나타내는 식이다[10].

$$P_w(V) = 1 - \exp[-(V/c)^k] \quad (6)$$

$$c = \frac{V_{ave}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (7)$$

대관령 풍력실증단지에서 2004년1월~2004년12월까지 1년간 풍력발전기의 허브높이에서 풍속자료를 와이불 파라미터로 표현하면 최대 분포점을 나타내는 형상계수 k는 1.336이고, 평균점을 나타내는 척도계수 c는 5.74이다. 그리고 형상계수가 2인 와이불분포, 즉 레일레이분포의 척도계수 c는 5.721이다. Figure 20은 대관령 풍력실증단지의 풍속을 두 가지 분포형태로 나타낸 것이다.

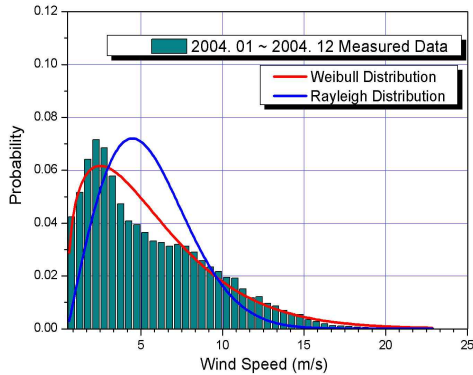


Fig. 20 Wind speed distribution

연에너지 생산량(AEP)은 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 계산될 수 있다. 계산은 IEC 규정에 따라 연 평균풍속이 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11m/s일 때에 대하여 수행하여야 한다.

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - (V_{i-1})] \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{2} \right) \quad (8)$$

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right) \quad (9)$$

- AEP : 연간발전량
- N_h : 연 시간 = 8760
- N : 빈의 수
- V_i : 빈 i 에서 표준화된 평균 풍속
- P_i : 빈 i 에서 표준화된 평균 출력
- $F(V)$: 풍속에 대한 레일리(Rayleigh)누적 확률 분포
- V_{ave} : 허브 높이에서의 연평균풍속

연간발전량의 계산을 시작할 때 즉 $i=1$ 일 때 $V_0 = V_1 - 0.5m/s$ 로, P_0 는 $0.0kW$ 로 가정한다. 연간발전량은 두 가지로 나타내는데, 하나는 "AEP-측정(Measured)"이고 다른 하나는 "AEP-외삽(Extrapolated)"이다. 만약, 측정된 출력 곡선이 중단(Cut-out)풍속까지 포함되지 않는다면, 출력곡선은 측정된 최고 풍속으로부터 중단풍속까지 외삽한다. 모든 연에너지 생산량의 계산에 있어서 풍력 발전시스템의 가동률은 100%로 가정해서, 주어진 연 평균 풍속에 대하여 AEP-측정(Measured)값이 AEP-외삽의 95% 이하일 때는 "불완전(Incomplete)"이라고 표시되어야 한다. Table 3은

연평균풍속이 4~11m/s 일 때의 연간발전량을 AEP-측정, AEP-외삽 그리고 그에 따른 불확실성을 함께 나타내었다. 풍력발전시스템이 정상 작동을 하게 된다면 풍력 사이트의 연평균 풍속이 4.8m/s일 때 연간발전량이 7.8MWh가 될 것으로 예측된다.

Table 3 Estimated annual energy production

| Estimated annual energy production Cut-out wind speed : 30 m/s (extrapolated by constant power from last bin) | | | | |
|--|---|---|-------|---|
| Hub height annual average wind speed (Rayleigh) m/s | AEP-measured (measured power curve) MWh | Uncertainty of measured power curve in terms of standard deviation of AEP | | AEP-extrapolated (extrapolated power curve) MWh |
| | | MWh | % | |
| 4 | 4.47 | 1.61 | 36.06 | 4.47 |
| 5 | 8.26 | 2.06 | 25.43 | 8.26 |
| 6 | 12.83 | 2.44 | 19.04 | 13.13 |
| 7 | 16.91 | 2.53 | 15.18 | 17.40 |
| 8 | 19.50 | 2.32 | 12.67 | 20.08 |
| 9 | 21.53 incomplete | 2.15 | 10.95 | 24.41 |
| 10 | 22.63 incomplete | 2.21 | 9.80 | 25.94 |
| 11 | 23.01 incomplete | 2.04 | 8.99 | 27.31 |

5.결 론

본 연구에서는 대관령 풍력실증단지에서 운용되는 6kW급 INVENTUS 6 풍력발전기의 대한 성능평가를 위하여 출력곡선, 연간 발전량 그리고 불확실성을 계산하였다.

실증대상 풍력발전기인 INVENTUS 6의 정격출력은 제작사가 제시한 6kW보다 약 10% 정도 낮게 측정되었다. 이것은 대관령 시험사이트가 복잡 지형으로 난류에 의한 영향으로 추정된다. 연구 기간인 2004년 연평균 풍속이 4.8m/s로 이를 기준으로 하면 연간발전량은 7.8MWh이었다. 그리고 최대출력계수는 0.33 이었다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 실용화평가사업인 "6kW급 소형풍력발전기의 실증연구"로 수행된 결과물의 일환이므로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Brain Keith Parsons, Yih-huei Wan. and Brendan Kirby, "Wind farm power fluctuations and system operating impact analysis activities in the united states", EWEC VI, pp.1146-1149, 2001.
- [2] 백남춘, "풍력발전성능평가 기지화 사업", 최종보고서, pp.3-6, 2003.
- [3] 김석현, 남윤수, 유능수, 이정완 "6kW 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 분석", 산업기술 연구소 논문집, 2005.
- [4] 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, "LabVIEW를 이용한 Wind Turbine 모니터링 시스템", 대한기계학회 강원지부 학술대회 논문집, pp.2, 2002.
- [5] AWS Scientific, "Wind Resource Assessment Handbook", pp.6-6. 1997.
- [6] "Wind Turbine Generator Systems. Part 12: Wind Turbine Power Performance Testing," 1st Ed., IEC 61400-12, 1988.
- [7] Renewable Resource Data Cente, <http://rredc.nrel.gov>
- [8] "Power Performance Measurement Procedure", Measnet, Version3, 5-6. 2000.
- [9] Roskilde, Riso National Laboratory, "Task1:Measurement Method to Verify Wind Turbine Performance Characteristics", European Wind Turbine Testing Procedure Developments, pp.12-13, 2001.
- [10] WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH, "Measurement of Power curve measurements on Jeumont J48/750 ", 2002.