

측정 출력곡선과 기상자료를 이용한 소형 풍력발전기 연간 발전량 비교평가

Measured AEP Evaluations of a Small Wind Turbine using Measured Power Curve & Wind Data

김석우*
Kim Seokwoo*

(Submit date : 2013. 9. 27., Judgement date : 2013. 10. 5., Publication decide date : 2013. 12. 13.)

Abstract : In an efforts to encourage renewable energy deployment, the government has initiated so called 1 million green homes program but the accumulated installation capacity of small wind turbine has been about 70kW. It can be explained in several ways such that current subsidy program does not meet public expectations, economic feasibility of wind energy is in doubt or acoustic emission is significant etc. The author investigated annual energy production of Skystream 3.7 wind turbine using measured power curve and wind resource data. The measured power curve of the small wind turbine was obtained through power performance tests at Wol-Ryoung test site. AEP(Annual Energy Production) and CF(Capacity Factor) were evaluated at selected locations with the measured power curve.

Key Words : 연간 발전량(Annual energy production), 설비 이용률(Capacity factor), 측정 출력곡선(Measured power curve), 정격풍속(Rated wind speed), 자료군(Data bin), 측정 연간발전량(Measured annual energy production)

기 호 설 명

A	: 풍력발전기 회전자 회전면적(m^2)	N_h	: 시간으로 환산한 1년(8,760시간, hr)
$C_{p,i}$: i 번째 자료군에서의 출력계수(무차원)	P_i	: i 번째 자료군에서의 평균 출력(W)
$F(V)$: Rayleigh 확률분포함수	V_i	: i 번째 자료군에서의 평균 풍속(m/s)
N	: 전체 측정 자료군 수	V_{ave}	: 허브 높이에서의 평균 풍속(m/s)
		ρ_o	: 표준 공기밀도($1.225kg/m^3$)

*김석우 : 한국에너지기술연구원 책임연구원
E-mail : wemins@kier.re.kr, Tel : 042-860-3568

*Kim Seokwoo : Korea Institute of Energy Research, Principal Researcher
E-mail : wemins@kier.re.kr, Tel : 042-860-3568

1. 서 론

정부는 2020년까지 신재생에너지주택(Green home) 100만호 보급을 목표로 태양광, 태양열, 지열, 풍력 및 연료전지 등의 신재생에너지 지원 주택 설치를 지원하는 사업을 수행 중이다. 그러나 2012년 현재 보급된 풍력발전기의 경우 총 설비용량이 70kW로서 매우 저조한 상황이며, 이를 개선하기 위한 노력이 필요하다. 본 연구에서는 측정 출력곡선을 이용하여 국내 내륙 및 해안, 도서 지역에서의 연간발전량(Annual energy production) 및 설비 이용률(Capacity factor)을 비교 평가함으로써 소형 풍력발전기의 보다 적합한 설치환경을 분석하였다.

2. 출력곡선과 출력계수

측정 출력곡선은 미국 Southwest사의 소형 풍력발전기인 Skystream 3.7을 대상으로 평가되었다. Skystream 3.7의 정격출력은 2.4kW로서 상세 사양은 다음의 Table 1과 같다.

Table. 1 Skystream 3.7 specifications

Design class	IIA
Rated power	2.4kW
Rotor diameter	3.72m
Cut in wind speed	3.5m/s
Rated wind speed	13m/s
Survival wind speed	63m/s
Rotor speed	50~325 rpm
Swept area	10.87m ²
Rotor position	Downwind
Overspeed protection	Electrical relay switch
Weight (Except tower)	77kg



Fig. 1 Installed Skystream 3.7 with 10m high met mast

2.1 출력 측정 데이터

측정 출력곡선 평가를 위해 2009년 12월 21일 12시 5분부터 2010년 1월 28일 11시 4분까지 측정된 총 17,730개의 자료군을 각 풍속구간 별로 분류하여 평균 출력곡선을 구하고자 시도하였다. 측정 기간을 고려한다면 총 54,660개의 1분 평균 측정 자료군이 확보되어야 하나, 풍속 1m/s 이하에서의 측정자료군 및 천이 풍속구간에서의 측정 자료군을 배제하고 또한 난류강도 30% 이상의 측정자료군을 제외한 결과 약 32.5%의 유효자료 획득율을 기록하였다. 다음의 Table 2와 Fig. 2는 각 풍속구간에 대한 유효자료군의 분포를 보여주고 있으며, 동절기의 영향으로 인해 8m/s 이상부터 정격풍속까지의 고풍속 자료군 수가 총 7,283개 측정되었다.

측정 출력곡선은 IEC 61400-12-1이 정한 바에 따라 아래의 관계식에 의해 계산되었다.

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

Table. 2 Measured data bin numbers

풍속 (m/s)	자료군 수	풍속	자료군 수
$1.0 \leq V < 1.5$	64	$10.0 \leq V < 10.5$	1,020
$1.5 \leq V < 2.0$	171	$10.5 \leq V < 11.0$	946
$2.0 \leq V < 2.5$	208	$11.0 \leq V < 11.5$	765
$2.5 \leq V < 3.0$	342	$11.5 \leq V < 12.0$	657
$3.0 \leq V < 3.5$	507	$12.0 \leq V < 12.5$	464
$3.5 \leq V < 4.0$	645	$12.5 \leq V < 13.0$	378
$4.0 \leq V < 4.5$	690	$13.0 \leq V < 13.5$	268
$4.5 \leq V < 5.0$	679	$13.5 \leq V < 14.0$	145
$5.0 \leq V < 5.5$	815	$14.0 \leq V < 14.5$	109
$5.5 \leq V < 6.0$	827	$14.5 \leq V < 15.0$	64
$6.0 \leq V < 6.5$	885	$15.0 \leq V < 15.5$	55
$6.5 \leq V < 7.0$	900	$15.5 \leq V < 16.0$	27
$7.0 \leq V < 7.5$	905	$16.0 \leq V < 16.5$	18
$7.5 \leq V < 8.0$	1,014	$16.5 \leq V < 17.0$	16
$8.0 \leq V < 8.5$	948	$17.0 \leq V < 17.5$	12
$8.5 \leq V < 9.0$	1,060	$17.5 \leq V < 18.0$	6
$9.0 \leq V < 9.5$	1,062	$18.0 \leq V < 18.5$	3
$9.5 \leq V < 10.0$	1,045		

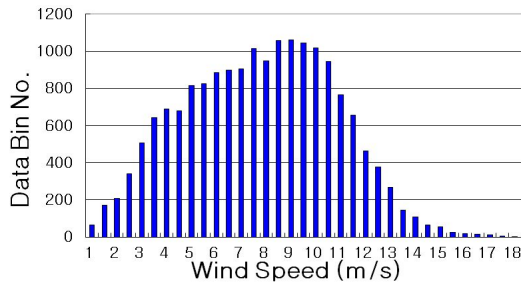


Fig. 2 Measured data bin distributions

2.2 측정 출력곡선

Fig. 3의 제작사가 제시하고 있는 출력곡선을 대신하여, 직접 측정한 출력값의 각 자료군에 대한 평균 출력이 Fig. 4에 표시되었다. 제작사 제시 출력곡선은 미국 텍사스에 소재하고 있는 USDA-ARS Research lab에서 측정한 결과로서 풍속 15m/s 이상에서 실속으로 인한 출력 저감이 나타남을 확인할 수 있다.

그러나 제주 월령에 위치한 한국에너지기술

연구원 성능평가지에서 측정한 Fig. 4의 출력곡선은 풍속 14m/s 이상에서 출력 저감이 발생함을 확인할 수 있으나, 측정기간 중 풍속 19m/s 이상에서의 충분한 측정 자료군을 확보하지 못하여 보다 정확한 실속에 의한 출력 저감 현상을 관찰할 수 없었다. 측정 출력곡선에 의하면 풍속이 14m/s를 초과하면서 실속 현상이 나타나기 시작하면서 풍속 17m/s까지는 불안정한 출력생산 현상을 보여주고 있다. 따라서 제작사 출력곡선과 측정 출력곡선을 종합하면 풍속 17m/s 이상에서 실속에 의한 출력저하 현상이 본격화되는 것으로 판단된다. 제작사 사양에 따르면 정격 출력은 풍속 13m/s에서 생산되는 것으로 되어 있으며, 이는 측정 출력곡선에서도 확인할 수 있었다. 측정 출력곡선에 의하면 정격출력은 풍속 12.7 ~ 13.7m/s에서 발생하는 것으로 측정되었다.

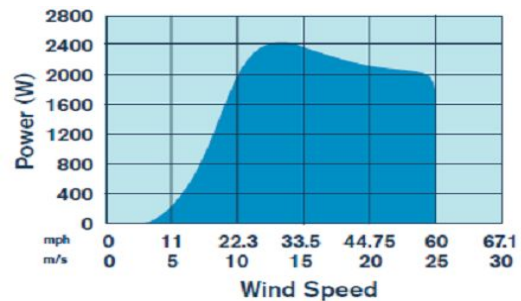


Fig. 3 Power curve by the manufacturer

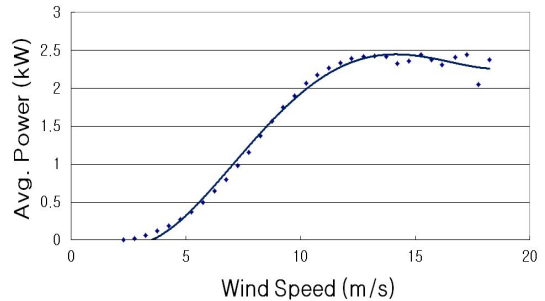


Fig. 4 Measured power curve by KIER

2.3 출력계수

출력계수는 평균 풍속 6.25m/s에서 최대 출력 계수 0.39를 가짐을 알 수 있다. 즉, Skystream 3.7은 제작사 사양에 따르면 IEC 61400-2 기준 Class II(평균 풍속 $V_{ave} = 8.5\text{m/s}$)로 제시되어 있으나, 최대 출력계수는 평균 풍속 5.25~7.25m/s 구간에 발생하고 있다. 출력계수가 해당 풍속이 지닌 이론적 전력생산 잠재량 대비 실제 생산 전력량의 비라는 점을 고려한다면 Skystream 3.7은 IEC 61400-2의 분류 기준 상 Class III 또는 IV 지역(평균 풍속 $V_{ave} = 6\sim 7.5\text{m/s}$)에서 가장 효율적인 운전이 가능할 것으로 분석된다.

또한 풍력발전기의 출력효율에 관한 Betz limit에 의하면 풍력발전기가 이론상 달성 가능한 최대 출력계수는 0.593이다. 따라서 Skystream 3.7의 최대 출력계수 0.39는 Betz limit의 약 65.8%에 해당하며, 대부분의 풍력발전기 출력계수가 0.2~0.35%^[1] 내외인 점을 고려한다면 비교적 우수한 효율을 지니고 있다. 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 수행한 Mariah Windspire 1kW 풍력발전기의^[2] 최대 출력계수는 0.2(풍속 9.5m/s)이다. Fig. 5와 Table 3은 측정 출력곡선으로부터 계산된 출력계수이다.

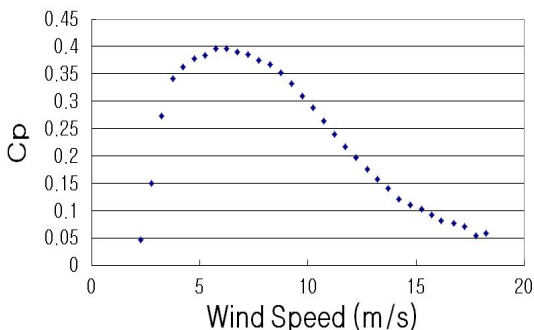


Fig. 5 Power coefficient distributions of Skystream 3.7

Table. 3 Calculated Cp from measured power output

풍속 (m/s)	출력 (W)	출력계수, Cp
1.34	-2.44	-0.15
2.27	3.71	0.04
3.24	62.27	0.27
4.24	184.15	0.36
5.25	369.62	0.38
6.25	644.17	0.39
7.25	978.04	0.38
8.24	1,373.01	0.36
9.24	1,748.35	0.33
10.24	2,065.24	0.28
11.23	2,263.78	0.23
12.22	2,396.93	0.19
13.23	2,427.65	0.15
14.21	2,323.69	0.12
15.26	2,440.89	0.10
16.16	2,305.97	0.08
17.25	2,447.43	0.07
18.23	2,375.86	0.05

3. 연간 발전량 계산 및 설비 이용률

3.1 연간 발전량(Annual energy production)

풍력발전기의 연간 발전량은 식 (2)와 (3)과 같이 IEC 61400-12-1에 규정된 AEP 평가방법에 따라 계산되었다. AEP는 측정 출력곡선을 이용하여 산출된 Measured AEP이다.

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

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right] \quad (3)$$

일반적으로 연간 발전량을 산출할 경우 풍력발전기의 고장 및 이상 등으로 인한 유지보

수 시간을 8,760시간/년에서 제외하고 계산한다. 그러나 소형 풍력발전기의 경우에는 제작사 또는 운전자 측으로부터 별도의 요구가 없을 경우 연간 총 운전시간인 8,760 시간을 100% 반영하게 된다.

측정 AEP 평가 대상지역은 한국에너지기술연구원 신재생에너지데이터센터의 풍력자원지도^[3]에서 Table 4의 지역을 선정하였으며, 각각의 실제 측정높이는 10m 및 15m로 상이하나 비교평가를 위해 15m 높이에서의 보정풍속으로 표기하였다. 표에 나타난 바와 같이 선정된 평가 대상지역의 풍황자원은 우수한 지역과 빈곤한 지역을 다 포함하고 있으며, 서울 및 경주 지역을 제외하고는 해안, 도서지역들이 선정되었다. 이는 국내 해안 지역의 풍황자원이 내륙보다 양호하기 때문이다.

Table. 4 Sites for measured AEP evaluation

지역	높이	연 평균풍속
제주 월령	15m	5.7m/s
서울 난지도	15m	3.9m/s
경기 대부도	15m	2.8m/s
전북 새만금	15m	4.24m/s
경북 경주	15m	4.06m/s
경남 거제도	15m	3.25m/s
강원 정동진	15m	3.07m/s

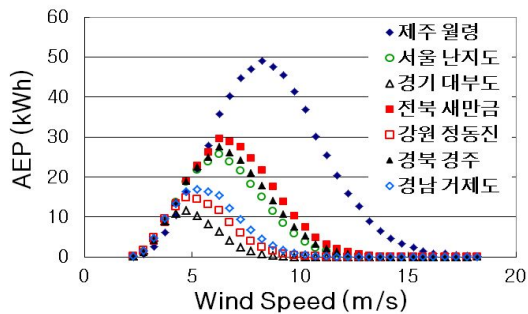


Fig. 6 Measured AEP distributions

Fig. 6의 지역별 측정 연간발전량의 분포를 보면 제주 월령 지역이 가장 우수하고 연 평균 풍속이 가장 낮은 대부도가 측정 AEP 역시 가장 낮은 경향을 보여주고 있다. 아래의 Table 5는 IEC 61400-12-1에 정의된 바에 따라 4~11m/s의 풍속 구간에서 각 정수 풍속에 대한 측정 AEP값이다. 대부도와 정동진의 경우 10m/s 및 11m/s 풍속의 발생빈도가 매우 낮아 각각의 해당 풍속에서 측정 AEP값이 0.03Wh 미만의 전력을 생산하는 것으로 분석되었다. 또한 위 Table 4의 각 지역별 평균 풍속에서의 AEP를 비교하여도 월령 지역을 제외한 나머지 지역에서는 13.6Wh 이하의 발전량을 보여준다. 특이한 점은 난지도의 경우로서 도심 지역의 특성상 가장 낮은 AEP를 가질 것으로 예상되었으나 해안가 지역인 정동진 및 대부도 보다 높은 AEP를 보여준다.

Table. 5 AEP variations in terms of wind speed (unit : Wh)

지역 \ 풍속	4	5	6	7	8	9	10	11
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
월령	10.4	21.8	35.8	44.6	49.0	45.4	36.8	25.4
난지도	13.6	21.7	25.6	21.4	14.9	8.3	2.7	1.3
대부도	10.8	10.2	6.3	2.4	0.7	0.1	-	-
새만금	13.3	22.9	29.4	27.5	21.7	13.8	7.3	3.2
정동진	12.5	14.4	11.4	6.0	2.4	0.7	0.1	-
경주	13.5	22.3	27.4	24.1	17.8	10.5	5.1	2.0
거제도	13.2	16.9	15.2	9.3	4.5	1.6	0.4	0.1

Table. 6는 7개 분석 대상 지역에 대한 연간 발전량 결과이다. 가장 풍황이 우수한 월령이 연간 5,330kWh의 전력을 생산하는 것으로 측정되었으며, 대부도가 연간 631kWh로 가장 낮은 생산량을 보여준다. 위 Table 5의 결과와 동일하게 난지도가 연간 2,023kWh의 비교적 양호한 발전량을 가진 것으로 분석되었다.

풍력발전은 허브 높이가 증가할수록 출력 역시 증가하게 된다. 본 연구에 적용된 Skystream 3.7의 허브 높이가 10m였으므로 AEP 분석에 적용된 풍황자료 역시 10m 높이 풍황자료로 전환되어 적용한 결과가 Table 6이다. 따라서 실제 설치 풍력발전기의 허브 높이가 10m 이상으로 높아질수록 AEP는 증가하게 된다.

Table 6. Measured AEP

지역	Measured AEP (kWh)
월령	5,330.5
난지도	2,023.2
대부도	631.0
새만금	2,533.5
정동진	928.9
경주	2,238.5
거제도	1,162.6

3.2 설비 이용률(Capacity Factor)

설비 이용률은 평가 대상 풍력발전기의 정격용량 대비 실제 발전량을 평가하는 항목으로서 다음의 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$CF = \frac{\text{실제 발전량}(kWh)}{\text{정격출력}(kW) \times \text{시간}(h)} \quad (4)$$

일반적으로 설비 이용률이 높을수록 경제성이 향상되어 투자비 회수에 소요되는 기간이 단축된다. 풍력발전에서 선진국인 유럽의 경우 설비 이용률이 30~35%에 달하는 것으로 알려져 왔으나 실제로는 21%를 하회한다는 연구결과^[4]도 발표되었다.

설비 이용률은 풍력발전기의 성능과 운영능력을 직접적으로 평가할 수 있는 요소로서, 이를 기반으로 특정 지역에 특정 풍력발전기를 설치 및 운전할 경우의 경제성을 평가할 수

있는 자료이다. 그러나 본 연구에서는 1년간의 출력 측정을 통해 1년, 총 8,760시간 중 실제 발전량을 평가하는 방식이 아닌 3개월 단기간의 측정을 통해 설비 이용률을 분석하는 방식을 취하였다. 따라서 풍력발전기의 이상 또는 계통 이상으로 인한 운전정지 시간은 없는 것으로 가정하고 설비 이용률을 분석하였다.

아래의 Table. 7은 7개 분석 대상지역에 대한 설비 이용률 계산 결과이다. 월령이 25.3%로 가장 높은 설비 이용률을 보여주고 있으며, 다음으로 새만금, 경주 및 난지도 등이 10% 내외의 설비 이용률을 갖는다. 이는 일반적으로 알려진 소형 풍력발전기의 경제성 판별 기준인 15~30%^[5]에 미달하는 결과로서 제주 월령만이 약 25%의 설비 이용률을 보여준다.

Table 7. Capacity factors

지역	설비 이용률 (%)
월령	25.3
난지도	9.6
대부도	3.0
새만금	12.0
정동진	4.4
경주	10.6
거제도	5.5

4. 결 론

Skystream 3.7에 대한 출력 측정을 통해 확보한 측정 출력곡선을 활용하여 연간 발전량 및 설비 이용률에 대한 분석하였다. 평가 대상 지역은 내륙 지역 대비 양호한 풍황을 지닌 해안 및 도서 지역 위주로 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 측정 출력곡선은 풍속 14m/s까지는 제작사 제시 출력곡선과 일치하는 경향을 보

여주고 있으나, 그 이상에서는 실속의 영향으로 인한 출력 저감이 측정되었다.

- (2) 제작사 제시 출력곡선은 풍속 25m/s까지 급속한 출력 감소를 보여 주고 있으나, 출력 측정기간 중 19m/s 이상 풍속에서의 측정 자료군 수 부족으로 인해 이를 확인할 수 없었다. 다만 KIER 측정 출력곡선에서 풍속 17m/s까지의 출력감소 경향은 제작사 출력곡선과 일치한다.
- (3) 최대 출력계수 0.39는 5.25~7.25m/s 구간에서 발생하고 있으며, 이에 따라 Skystream 3.7은 평균 풍속 기준으로 IEC Class III 또는 IV 지역에서 가장 효율적인 운전이 가능할 것으로 평가된다.
- (4) 측정 AEP는 국내 7개 지역을 대상으로 평가되었으며, 월령, 새만금, 경주 및 난지도 지역이 2,000kWh 이상의 전력 생산이 가능한 것으로 분석되었으며, 그 이외의 지역은 매우 낮은 측정 AEP 결과를 보여주었다.
- (5) 설비 이용률 역시 측정 AEP와 동일한 경향을 보여 주고 있으며, 일반적으로 알려진 소형 풍력발전기의 경제성 확보 이용률인 15~30% 범위에 속하는 지역은 월령 1곳인 것으로 평가되었다.
- (6) 설비 이용률과 경제성은 평가 대상 풍력발전기의 성능과 운영 능력 및 정부, 지자체의 신재생에너지 보급지원제도에 의해 영향을 받게 되며, 본 연구결과는 기술적 측면에서의 평가결과이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 : 2012-N-WD16-P-01)

참 고 문 헌

1. Emerging Small Wind Technology, Applied Research Institute for Prospective Technologies, Working Paper No. 7, 2008.
2. A. Huskey, A. Brown, and D. Jager, Wind Turbine Generator System Power Performance Test Report for the Mariah Windspire 1-kW Wind Turbine, Technical Report NREL/TP-500-46192, December 2009.
3. kredc.kier.re.kr
4. Nicholas Boccard, Capacity Factor of Wind Power Realized Values vs. Estimates, Energy Policy, Vol. 37, Issue 7, July 2009, pp.2679~2688
5. Small Wind, U.S. Department of Agriculture Rural Development, 2009