

3MW 풍력발전시스템 출력 성능시험 및 불확도 분석

김건훈*, 현승건**

*한국에너지기술연구원(kkh4417@kier.re.kr),
**제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정(wind4072@jejunu.ac.kr)

Power Performance Testing and Uncertainty Analysis for a 3MW Wind Turbine

Kim, Keon-hoon* Hyun, Seung-gun**

*Korea Institute of Energy Research(kkh4417@kier.re.kr),
**Multidisciplinary Graduate School of Wind Energy, Jeju National University(wind4072@jejunu.ac.kr)

Abstract

The installed capacity of wind turbines in KOREA are growing and enlarging by the central government's support program. Thus, the importance of power performance verification and its uncertainty analysis are recognizing rapidly. This paper described the power testing results of a 3MW wind turbine and analysed an uncertainty level of measurements. The measured power curves are very closely coincide with the calculated one and the annual power production under the given Rayleigh wind speed distribution are estimated with the 3.6~12.7% of uncertainty but, in the dominant wind speed region as 7~8m/s, the uncertainty are stably decreased to 6.3~5.3%

Keywords : 풍력발전기(wind turbine), 풍력발전기의 전기적 출력(power performance), 불확도(uncertainty), 공기밀도(air density), 정규화(normalization), 기상측정마스트(Met. Mast)

1. 서 론

현재 국내에서도 풍력발전에 대한 관심증대와 정부지원의 확대로 많은 풍력발전시스템이 설치운전 중에 있다. 따라서, 설치운전 중에 있는 풍력발전시스템의 성능시험 및 성능시험에 대한 불확도에 대한 관심도 함께 늘어나고 있다. 그러나, 성능시험에 대해서는

몇 차례의 부분적 결과가 발표되기도 하였으나, 아직도 많은 경험과 기술축적도 필요한 것도 사실이다. 성능시험 자체도 중요하지만 성능시험에 대한 결과에 대한 불확도의 해석도 매우 중요하게 인식되고 있으나, 풍력발전 성능시험 분야에서의 불확도 해석은 아직 시작단계라 할 수 있다. 본 논문은 제주도 한경면 신창리 해안지역에 설치되어 운전 중인 3.0MW급 풍력발전

투고일자 : 2010년 8월 6일, 심사일자 : 2010년 8월 18일, 게재확정일자 : 2010년 11월 25일
교신저자 : 김건훈(kkh4417@kier.re.kr)

시스템인 한경풍력 6호기를 대상으로 2009년 9월 17일 0:00부터 2010년 2월 17일 02:40까지 약 5개월여의 기간 동안 현장에서의 성능시험과 이의 분석결과에 대해 논하고자 한다. 특히, 성능시험에서 소홀히 다루기 쉬우나, 측정자료의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표인 불확도에 대한 해석도 함께 하였다.

2. 시험대상 풍력발전시스템 사양

시험대상 기기는 전형적인 덴마크형의 풍력발전시스템인 VESTAS사의 3.0MW 풍력발전시스템으로서 다음 표 1에서는 시험대상 풍력발전시스템의 기본 사양을 보이고 있다.

표 1. 시험대상 풍력발전시스템 사양

Wind turbine	제작사	VESTAS
	형식	V90-3.0MW
	시동풍속	4m/s
Rotor	중단풍속	25m/s
	출력제어	Pitch
	회전자 직경	90m
	허브높이	80m
Blade	RPM	16.1rpm
	형식	Airfoil shells bonded to supporting beam
Gear Box	형식	2 planet / 1 helical
	기어비	1 : 109.01
Generator	정격출력	3.0MW
	전압	1000V
Tower	형식	Tubular

3. 시험부지 현황

3.1 시험부지의 위치

제주 한경 지역은 제주시로부터 약 60km 정도 서쪽으로 떨어져 있는 지점으로 다음의 그림 1에 제주도내 한경 풍력발전 단지의 위치를 보이고 있다. 전체적으로는 한경지역은 남서방향에서 북서방향으로 바다와 인접한 지형이며 동쪽으로는 점차 지표고도가 높아지는 한라산 지역으로 연결되어 있다. 그리고, 한경지

역은 다소 먼 동쪽에서의 지형에 의한 영향을 제외한다면 거의 모든 방향에서의 바람을 기대할 수 있는 지형적으로 우수한 지역이다.



그림 1. 제주도내 시험대상 부지의 위치

3.2 시험기기의 위치 및 지형변화도

시험부지의 지형변화도는 IEC61400-12-1 Annex B의 Table B.1 - Test site requirements : topographical variations의 정해진 조건을 만족하는 지형이다. Annex A에 의해 시험기기와 Met. Mast 간의 거리 L은 221.0m이고, V90 3MW 기종의 회전자 직경 D는 90.0m 이므로 이격 거리는 2.46D 이격되어 있다. Met. Mast 및 성능 시험대상 풍력기기 주변의 장애물에 대한 평면도상의 배치현황은 그림 2와 같다.



그림 2. Met Mast에서 본 각 방위별 장애물 분포도

한경 1-2단계와 제주도청의 그린빌리지 사업에 의한 2개 기종이외에는 측정이나 풍속 등에 영향을 줄 수 있는 장애물은 없는 상태

로서, site calibration이 부가적으로 필요치 않은 지형적 특성을 지니고 있다.

3.3 유효 방위각

IEC61400-12-1 Annex A에 의거하여 시험 기기에 대한 풍향의 유효방위각을 설정하여야하므로, 주변의 지형 및 지물로부터 영향을 받는 풍향은 시험기와 met. mast에 대한 다른 지형 및 지물의 상대적인 위치(거리 및 각도)에 의해 결정되게 된다.

$$\text{disturbed sector } \alpha = 1.3 \text{Arctan} \left(\frac{2D_n}{L_n + 0.15} \right) + 10 \quad (1)$$

환경 풍력발전 단지 주변에 대해 Met. Mast 및 시험기기인 HK 6호기에 대해서 상대적인 영향 각을 조사 및 분석한 결과 표 2와 같은 유효 방위각을 얻을 수 있었다. 따라서, 현지에서의 분석에 의해 측정시험시의 유효방위각은 252°~47°로서 결정 되었다.

표 2. 유효 방위각

기준	장애물	Dn (m)	Ln (m)	방위각 (°)	α (°)	Up.sec (°)	Lo.sec (°)
Met. mast	HK1	72	184.0	162.0	73.0	125	198
	HK2	72	486.2	214.0	45.7	213	259
	HK3	72	1093.8	192.4	32.7	241	274
	HK4	72	1411.3	208.4	30.2	227	257
	HK5	90	386.7	121.2	57.1	93	150
	HK6	90	221.0	84.5	74.3	47	122
	HK7	90	757.5	249.6	41.3	229	270
	HK8	90	1139.0	179.7	34.9	162	197
	HK9	90	1041.7	239.6	36.1	222	258
Gr	Gr1	52	910.1	111.5	31.2	96	127
	Gr2	52	567.1	166.8	37.0	148	185
HK 6	HK1	72	254.9	219.7	62.8	188	251
	HK2	72	649.5	229.2	40.1	209	249
	HK3	72	1180.6	202.7	31.9	187	219
	HK4	72	1545.4	215.2	29.4	201	230
	HK5	90	247.3	153.4	70.7	118	189
	HK7	90	876.7	213.5	38.8	194	233
	HK8	90	1179.6	190.4	34.5	173	208
	HK9	90	1184.9	219.1	34.4	202	236
	Gr	Gr1	52	720.0	119.5	33.8	103
Gr2	52	580.0	188.9	36.7	171	207	

4. 측정변수 및 시험센서

본 시험측정의 측정 변수와 시험에 이용된 각 측정변수에 대한 센서의 종류와 위치는 다음의 표 3에 표시하고 있다.

표 3. 측정센서의 형식, 위치 및 측정변수

측정 변수	센서 및 변환기	위치
풍속	컵형 풍속계(primary) Risoer P2546A:WT010054907, #3763	80m met. mast
풍속	컵형 풍속계(control) Risoer 2546A:WT010054207, #3755	80m met. mast
풍향	Potentiometer Friedrichs 4121.1000:WT020018707, #0657	77m met. mast
대기 압계	Vaisala PTB100A 일련번호:WT090035407, #C4040004	1m tower내
온도 계	Thies 2.1280.00.141 일련번호 : WT090034407, #63396	77m met. mast
전력	CURRENT TRANSFORMER MBS EASK 123.3(3000A/5A) 0.2class (#33744, #33743 and #33739) Ritz EKS 160-12(1500/5A) 0.2class (#381259, #381258 and #381257) VOLTAGE TRANSFORMER 1000V : Ritz KSZR 104(1000V/100V) 0.2class(#451195 and #451196) Watt TD 1000V : EMH ELMU-AHW4BB-174 (100V, 5A) 0.5class(#385404) 400V : EMH ELMU-AHW4BB-774 (400V, 5A) 0.5class(#413778)	1000V/ 400V (Stator/Rotor)
계통 접속	gen 1 or gen 2	낮셀 제어기

5. 시험자료 분석

5.1 시험 자료 선택

모든 측정절차와 방법은 IEC61400-12-1과 MEASNET의 규격을 따랐으며, 측정 자료는 다음과 같은 기준에 의해 선택되었다.

- 시험기간 : 2009년 9월 17일 0시0분- 2010년 2월 17일 02시40분
- 풍향은 유효각 이내의 범위에 있을 것(252°~ 48°)
- 측정 평균시간이 600초가 되어야 함.(10분 평균)
- gen 1 또는 gen 2가 "connected" 신호이어야 함.
- 시험기기가 정상작동 중에 있어야 함.
- 2m/sec 이하이면서 일정 출력 이하인 자료는 제거
- 시험자료군과 특이하게 상이한 자료 제거.

5.2 시험 자료 보정

모든 측정절차와 방법은 IEC61400-12-1과 MEASNET의 규격에 따라 시행하며, 표준대기상태[공기밀도 1.225kg/m³, 15°C(dry air), 1013hPa]로의 보정은 다음과 같다.

(1) 표준 공기밀도 (1.225kg/m³)상태로 보정.

$$\rightarrow \text{공기 밀도} : \rho_{10\text{min}} = \frac{B_{10\text{min}}}{R \cdot T_{10\text{min}}} \quad (2)$$

\(\rightarrow\) 피치제어 방식 풍력기기의 풍속의 보정

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

(2) 측정 출력 곡선은 0.5m/s 간격 bin을 사용하여 보정된 풍속과 출력의 평균값의 산정으로 결정

$$\rightarrow \text{풍속의 산정} : V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (4)$$

$$\rightarrow \text{출력의 산정} : P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (5)$$

(3) 연 에너지 생산량(AEP)은 측정된 출력 곡선과 Rayleigh 분포의 풍속 확률 밀도 함수로써 산정됨

\(\rightarrow\) 연간 발전량 산정 기준 평균풍속

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N \left[F(V_i) - F(V_{i-1}) \right] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (6)$$

\(\rightarrow\) 풍속의 Rayleigh 누적 확률 분포 함수

$$F(V) = 1 - \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

(4) 출력계수는 측정된 출력곡선에 의해 산정됨

$$\rightarrow \text{출력계수} : C_{p,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (8)$$

5.3 시험자료군 및 결과

시험자료군(Database)은 bin방법에 의해 정리되었고, 표 4에서와 같이 제시된 정격출력 85% 발생 풍속의 1.5배의 풍속인 18.0m/sec 이상의 최소한의 요구조건을 만족하고 있다. 다음의 그림 3에는 보정후의 모든 측정 자료를 함께 표시하고 있다. 그림 4에서는 유효 풍향각내 풍속의 분포를 보이고 있다.

표 4. 시험 자료군의 요구조건 및 현황

변 수	요구사항	시험자료군 (Database)
Bin 구간당 최소 자료수(개) (3m/s~18.0m/s)	3	최소 3
Bin 구간당 최소 자료수(개) (18.0m/s 이상)	3	최소 2
풍력기기 운전시간(시간) (3m/s~16.2m/s)	180	2,201

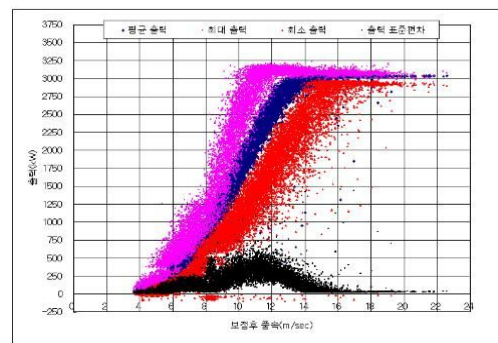


그림 3. 풍속에 대한 출력 측정 자료군

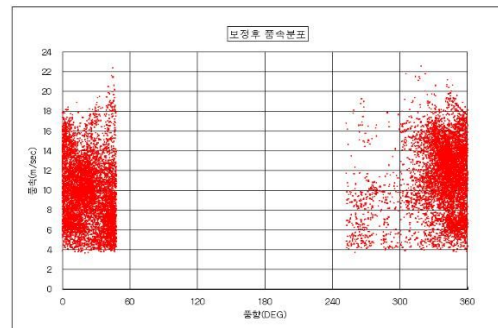


그림 4. 풍향에 대한 유효각내 풍속

6. 시험 결과 및 고찰

6.1 측정 출력곡선

본 시험을 통해 측정된 풍속을 보정한 bin 구간별 출력곡선과 설계출력과의 비교는 다음의 그림 5과 같은데, 설계 치와 시험치 간의 차이가 거의 보이지 않아 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

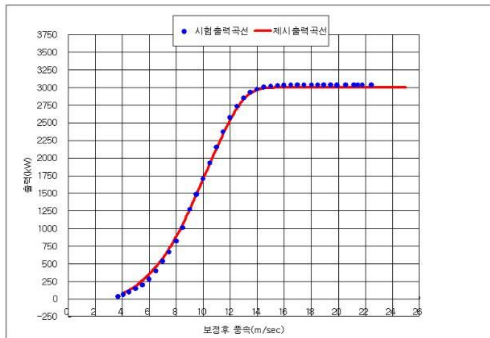


그림 5. 풍속에 대한 bin 구간 출력곡선

6.2 측정된 출력계수 곡선

풍속을 보정한 이후 분석된 출력계수 곡선과 제시된 출력계수 곡선의 비교를 그림 6에서 보이고 있는데, 풍속이 강해질수록 일치성이 더욱 높아지고 있음을 알 수 있다.

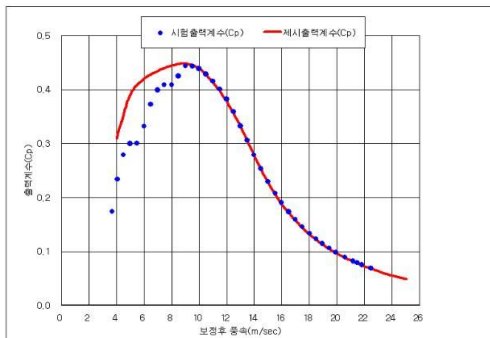


그림 6. 설계 및 성능시험

6.3 측정된 출력곡선의 불확도 분석

본 시험을 통해 측정된 출력곡선에 대한 A형, B형 및 합성 표준 불확도를 표 6에 나타내고 있다. 합성 표준 불확도는 비교적 강한 풍속과 정격 출력 약간 미만의 출력상태에서 약 120~130kW 정도를 보이나, 출력이 커지면서 상대적으로는 작아져서 20~30kW 정도의 표준 불확도를 보이고 있다. 제시 출력에 대한 측정 출력의 비율이 저출력상태에서는 약 70~80% 정도로 낮은 출력이 발생하고 있으나, 풍속이 강해지면서 이 비율이 100% 이상으로 향상되어, 제시된 출력과의 일치성이 향상되고 있다.

표 6. 측정 출력곡선의 불확도 분석(표준대기 상태)

Bin no.	풍속 m/s	출력 (kW)	자료 수	제시 출력 (kW)	A형 표준 불확도 (kW)	B형 표준 불확도 (kW)	합성 표준 불확도 (kW)	편차비 (%)
1	3.70	34.38	3		2.386	8.762	9.081	
2	4.09	62.23	105	77	2.226	13.561	13.743	80.8
3	4.50	99.01	311		1.357	16.100	16.157	
4	5.00	145.95	345	190	1.408	17.414	17.471	76.8
5	5.50	194.99	408		1.924	18.677	18.776	
6	6.01	280.63	511	353	2.786	31.439	31.562	79.5
7	6.50	397.91	607		3.067	24.942	25.130	
8	7.00	533.48	588	581	3.407	58.066	58.166	91.8
9	7.49	667.39	532		3.884	54.543	54.681	
10	8.03	822.07	423	886	5.190	75.949	76.126	92.8
11	8.49	1012.30	565		5.863	84.630	84.833	
12	9.02	1269.35	583	1273	5.140	131.642	131.742	99.7
13	9.51	1481.88	692		5.375	112.022	112.151	
14	9.99	1705.63	700	1710	5.268	120.511	120.626	99.7
15	10.49	1927.45	645		5.366	123.097	123.214	
16	11.00	2149.97	657	2145	5.457	130.025	130.140	100.2
17	11.49	2370.76	659		5.139	130.871	130.971	
18	12.00	2572.28	650	2544	4.961	126.282	126.379	101.1
19	12.50	2728.86	596		4.569	101.952	102.055	
20	13.00	2847.85	523	2837	3.851	82.373	82.463	100.4
21	13.50	2931.81	555		2.603	62.804	62.858	
22	13.99	2975.94	511	2965	1.922	39.138	39.185	100.4
23	14.49	3004.33	399		1.661	31.460	31.504	
24	15.00	3018.90	368	2995	1.067	26.461	26.483	100.8
25	15.52	3025.36	336		0.902	24.900	24.916	
26	15.99	3029.76	259	3000	0.489	24.612	24.616	101.0
27	16.50	3031.88	222		0.435	24.452	24.456	
28	16.98	3033.25	165	3000	0.433	24.424	24.428	101.1
29	17.49	3033.51	91		0.421	24.400	24.404	
30	18.01	3033.52	65	3000	0.426	24.399	24.403	101.1
31	18.48	3032.93	52		0.472	24.402	24.407	
32	18.94	3032.37	36	3000	0.719	24.397	24.407	101.1
33	19.44	3031.85	20		1.248	24.393	24.425	
34	19.91	3030.85	9	3000	0.885	24.392	24.408	101.0
35	20.56	3031.56	7		1.025	24.393	24.414	
36	21.15	3031.65	2	3000	1.375	24.387	24.425	101.1
37	21.46	3033.68	5		2.660	24.608	24.752	
38	21.78	3035.77	2	3000	1.189	24.470	24.498	101.2
39	22.46	3033.34	2		4.066	24.518	24.853	

6.4 연간 에너지 생산량

시험을 통해 측정된 출력곡선에 대해 풍속을 Rayleigh 분포로 가정하고, 시험 대상 풍력발전시스템의 가동률을 100%로 가정하고, 앞의 식(6)에 명시된 누적 연산 식을 이용하여 분석한 연간 에너지 생산량 분석 결과를 다음의 표 7에 보이고 있다.

표 7. 연간 에너지 생산량의 비교(표준대기 상태)

풍속 m/s	Measured AEP (MWh)	AEP 불확도 (MWh)	AEP 불확도 (%)	Extrapolated AEP (MWh)	제시 AEP (MWh)	Extrapolated AEP/제시 AEP (%)
4	1,500	190	12.7	1,500	1,596	94.0
5	3,086	297	9.6	3,086	3,258	94.7
6	5,135	396	7.7	5,136	5,329	96.4
7	7,362	466	6.3	7,369	7,550	97.6
8	9,508	504	5.3	9,546	9,703	98.4
9	11,383	517	4.5	11,504	11,639	98.8
10	12,872	512	4.0	13,140	13,252	99.2
11	13,936	497	3.6	14,402	14,523	99.2

7. 결 론

환경 HK IL_6호기인 VESTAS V90-3.0MW 풍력발전 설비를 대상으로 성능시험 평가한 결과는 다음과 같다.

제시된 출력곡선과 비교해서 아주 일치한 시험 결과를 보이고 있다. 비록 정지풍속인 25m/sec까지의 풍속 자료는 아니더라도 기준에서 요구하는 풍속 조건까지 충분히 만족스러운 풍속 조건 하에서 시험한 결과로서 출력곡선의 비교 시에 출력특성과의 일치성에서 만족할 만한 성능을 보이고 있다.

제시된 출력계수 곡선과 측정된 출력계수 곡선과의 비교에서는 비교적 낮은 풍속 상태에서는 다소의 차이를 보이고 있으나, 약 9m/sec 이상의 높은 풍속 상태에서는 일치성이 현격히 높아지고 있다. 낮은 풍속 상태에서의 출력계수 자체는 매우 미세한 수치로서 전체적인 발전량과 같은 풍력발전시스템의 성능에

직접적인 영향을 준다고 할 수는 없다.

측정된 출력곡선의 합성 표준 불확도는 낮은 풍속 상태인 저출력 상태에서는 상대적으로 약 10% 정도인 약 20~50kW 정도를 보이고, 출력이 커지면 상대적으로 작아져서 약 5% 정도인 120~130kW 정도의 표준 불확도를 보이고 있다.

제작사측에서 제시한 성능곡선을 이용하여 Rayleigh 분포시의 제시 AEP를 산정하고, 이를 시험에서 얻어진 extrapolated AEP와 비교하면, 4m/sec에서 94.0% 및 5m/sec에서 94.7%를 제외하면, 연평균 풍속 6m/sec 이상의 모든 환경에서 extrapolated AEP/제시 AEP가 95%를 넘고 있다.

또한, 기준 기상조건에서의 AEP의 표준불확도는 각각 6.3% 및 5.3%로서 분석되었다.

후 기

본 연구는 한국남부발전(주)의 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

1. IEC 61400-12(1st) Wind turbine generator systems - Part 12 : Wind turbine power performance testing, Feb. 1998.
2. IEC 61400-12-1 Wind turbines(1st ed.) - Part 12-1-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines, Dec. 2005.
3. IEC 61400-1(3rd.) Wind turbines - Part 1 : Design requirements, Aug. 2005.
4. MEASNET Power Performance measurement Procedure, Version 3 Nov. 2000.