

3MW 풍력발전시스템 출력성능평가에 관한 연구

고석환*, 장문석**, 박종포***, 이윤섭****

*한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(korea19@kier.re.kr),
**한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(msjang@kier.re.kr),
***두산중공업(주) 풍력기술개발사업팀(jongpo.park@doosan.com),
****공주대학교 전기전자제어공학과(yslee@kongju.ac.kr)

The Power Performance Testing for 3MW Wind turbine System

Ko, Suk-Whan* Jang, Moon-Seok** Park, Jong-Po*** Lee, Yoon-Sub****

*Wind Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(korea19@kier.re.kr),
**Wind Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(msjang@kier.re.kr),
***Wind turbine Development Part, Doo-San Heavy industry(jongpo.park@doosan.com),
****Division of Electrical Electronic & control Engineering, Kongju national university(yslee@kongju.ac.kr)

Abstract

We are carried out power performance testing for 3MW wind turbine system at Je-ju wind turbine testing Site and analyzed measured data which was stored through monitoring system. In this paper, we described the power performance testing results and analyzed an uncertainty of measured data sets. The power curve with measured power data is closely coincide with designed power curve except for the low wind speed sections(4m/s ~ 7m/s) and the annual energy production which is given Rayleigh distribution was included with 1.5 ~ 5.9% of uncertainty in the wind speed region as 4 ~ 11m/s. Although the deviation of curve between measured power and designed power is high, the difference of annual energy production is low in the low wind speed region.

Keywords : 출력 곡선(power curve), 성능 평가(power performance testing), 불확도(Uncertainty), 풍속(wind speed), 풍력발전기(wind turbine)

기 호 설 명

$V_{10\min}$: 10분 평균 풍속(m/s)	I_h : 장애물 너비(m)
V_n : 정규화된 10분 평균 풍속(m/s)	$\rho_{10\min}$: 10분 평균 공기밀도(kg/m ³)
L_e : 장애물과 풍력발전기간 이격거리(m)	AEP : 연간에너지생산량(Wh)
l_w : 장애물 높이(m)	$F(V)$: 풍속에 따른 레일리분포함수
	C_p : 출력 계수

투고일자 : 2011년 6월 3일, 심사일자 : 2011년 6월 8일, 게재확정일자 : 2011년 7월 21일
교신저자 : 고석환(korea19@kier.re.kr)

1. 서 론

현재 국내에서는 중대형 풍력발전시스템의 국산화 연구개발 시제품에 대하여 성능평가가 활발히 수행 중에 있다. 2009년 6월에 제주도 김녕리에 조성된 육상풍력발전실증단지에서는 현재까지 3MW 국산 풍력발전시스템과 2MW 풍력발전시스템에 대하여 성능평가를 수행 중에 있다. 국내의 경우 풍력발전 실증단지가 부족하여 개발업체별로 단지를 조성하고 성능시험을 수행중인 곳도 있으나, 단지의 지형적 여건 등으로 성능시험을 수행함에 있어 애로사항이 발생되고 있다.

풍력발전기의 보급이 활발해 지면서 풍력발전기의 성능평가에 대한 중요성도 커지고 있으며, 성능평가 자체가 시스템의 성능향상에 중요한 연구 분야가 되어가고 있다. 성능평가 단지의 지형적 요인에 따라서 계측된 풍속값에 대한 지형적 불확실성을 고려하여 출력성능에 반영하여야 하며, 불확도 분석 결과 값은 평탄지형보다 높은 값이 나오게 된다. 1)2) 본 논문에서는 육상풍력발전실증연구단지의 모니터링 시스템에 계측된 데이터를 활용하여 풍력발전기 출력성능시험에 대한 분석을 실시하였으며, 측정 자료에 대한 불확도 분석을 통한 연간 에너지 생산량에 대한 영향 분석을 수행하였다.

성능평가를 실시한 풍력발전시스템 및 전력측정기의 사양은 아래의 표 1, 표 2와 같다.

2. 풍력발전시스템의 사양 및 자료의 수집

표 1. 풍력발전시스템 사양

Wind turbine	형식	PMSG 3MW
	시동풍속	3 m/s
	중단풍속	25 m/s
	정격풍속	13 m/s
	IEC Class	IA
Blade	Length	44 m
	Swept Area	6,539 m ²
Rotor	출력 제어	Pitch regulated
	로터 직경	91.3 m
	RPM	15.7 rpm
Tower	높이	80m
Drive-train	Gearbox	2Planetary + 1Parallel
	Converter type	Full power converter

표 2. 측정센서 및 측정위치

측정 변수	센서 사양	설치 위치
전력 측정	Current transformer 150/5A, 0.5 class, WE7R (kyongbo electric), #A990503, #A990504, #A990506	계통 변전실
	Voltage transformer 13,200/110V, 0.5 class, #B99212, #B99213, #B99214	
	Transducer for active power SINEAX P530 (110V, 5A), 0.5class	

본 논문에서는 2010년 1월 2일 ~ 2011년 2월 27일 약 1년 2개월 동안 모니터링 시스템에 계측된 풍황 및 풍력발전기 유효 발전량 데이터 중 유효 데이터 9,708 data set을 활용하여 분석을 실시하였으며, 측정·기록된 데이터 값은 1Hz 이상의 샘플링 율을 가지고 연속적으로 저장이 된다. 전력측정은 정격출력의 200%에서 0.5 Class 급의 오차율을 갖는 장비로 계측을 하였으며, 본 성능시험에 사용된 풍황 센서는 해외 검교정기관으로부터 검교정을 실시한 후 설치를 하였다. 풍황 자료 수집을 위한 기상 측정탑에 설치하는 IEC 61400-12-1의 기준에 따라서 설치 운영을 하여 자료를 수집하였다.3)4)

1) Nam Yoonsu 외, Site calibration for the wind measurements and performance evaluation, KSME International journal. Vol 18, 2004, 2250-2257page
2) Inamura,H, Study on the wind measurements and performance evaluation of WTGS in complex terrain(2nd report, influence of wind characteristics and turbulent intensity), Nippon Kikai Gakkai Ronvunshu, Bhen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, PartB70(693), 1223-1229page

3. 성능평가를 위한 단지 평가

3.1 시험부지의 위치

제주시 구좌 김녕 지구에 위치한 육상풍력 실증연구단지는 그림 1과 같이 제주도 북동쪽에 위치하고 있으며, 지형은 완만하고, 해안가에 연접하여 있다. 단지의 동쪽 약 2km 지점에는 한국에너지기술연구원 연구기지 내에 1.5MW 풍력발전기가 위치하고 있다. 이것은 성능평가 시 측정 유효구간에 있는

장애물(기상탑과 풍력발전기)간 거리의 8배 거리 이내 위치)로서 고려가 되어야 한다. 단지의 주위 지형은 완만하며, 주 풍속 방향에 어떠한 장애물도 존재하지 않는다. 단지의 남서쪽에는 마을과 1개의 오름이 위치하고 있으나, 남서방위는 주풍향이 아니므로 성능평가 데이터 획득에 있어 어떠한 문제가 발생하지 않는다.



그림 1. 육상실증단지 위치도

3.2 풍력발전기 및 기상탑의 배치

단지 내에 설치된 풍력발전기 및 기상 측정탑의 위치는 표 3과 같다. 본 논문에서는 IEC 61400-12-1 Annex B의 Table B.1 - Test site

requirements : Topographical variations of 정해진 요건에 부합하는 단지이므로 추가적인 지형분석을 생략하였다. [4]의 보고서에서는 풍력발전기 설치위치에 따른 지형적 영향에 따른 보정이 필요하지 않은 단지임을 증명하고 있다.

표 3. 기상탑 및 풍력발전기의 UTM 좌표

시스템 명	East	North
3MW 두산 풍력발전기	52292896	3715921
Hanjin 1.5MW W.T	52294130	3715914
Met Mast	52292769	3716111

풍력발전기와 기상탑까지의 거리는 로터직경의 2.5배 떨어진 거리에 위치하고 있으며, 단지 내부에 상세 설치 현황은 그림 2와 같다.



그림 2. 단지 내부 배치도(풍력발전기, 기상탑)

3.3 출력성능평가 유효 방위각의 선정

출력성능평가의 유효각 선정은 IEC 61400-12-1 Annex A에 의해 정해진다. 즉, 주변의 지형 및 장애물의 영향으로 성능평가 기기 및 기상 측정탑에 영향을 주는 방위는 배제되어야 한다. 배제각은 식(1)에 의해서 결정되게 된다.³⁾

성능평가단지에서 유효방위각은 표 4와 같다.

$$\text{배제각} = 1.3 \text{Arctan}\left(\frac{2D_c}{L_e + 0.15}\right) + 10 \quad (1)$$

$$\text{where, } D_c : \frac{2I_h l_w}{I_h + l_w}$$

3) IEC(International Electro technical Commission), IEC Standard 61400-12-1, Wind turbines-part 12-1:Power performance measurements of electricity producing wind turbines, 1rd Ed.2005

4) 한국에너지기술연구원, 육상풍력실증연구단지조성연구사업 보고서, 지식경제부 신재생에너지기술개발, 2009

표 4. 유효 방위각

대상	X	Y	D	거리	방향	Wake	
	[m]	[m]	[m]	[D]	[degree]	[degree]	[degree]
Met mast sheltered							
3MW WG	0	0	91.3	2.5	146	109	184
Other WG	1234	-7	70	19.6	98	83	114
Met mast undisturbed						185	82
WTGS sheltered							
Other WG	1234	-7	70	17.6	90	74	106
WTGS undisturbed						107	73
최대 측정 유효 구간						185	73

(X, Y) = Windturbine의 2D좌표기준점

4. 측정 자료의 정규화

4.1 시험 자료의 선정

본 논문에서 측정 자료는 육상실증연구단의 모니터링 시스템에 의하여 계측이 되었으며, 본 시스템에서는 풍력발전기의 상태 정보 값이 저장되지가 않으므로, 측정 자료의 선택에 있어서 다음과 같은 기준으로 선택하였으며, 이로 인하여 저 풍속 상태에서 계측 불확실성이 증가되거나, 오차율이 발생할 수 있다.

- 측정기간 : 2009년 1월 2일 14:10 ~ 2010년 2월 27일 16시 50분
- 유효 방위각 이내 구간의 Data Set(185° ~ 73°)
- 2m/s 이하의 풍속이면서 일정 출력 이하의 자료는 제거

4.2 시험 자료의 정규화

선택된 Data의 자료 정규화 방법은 표준대 기압상태(공기밀도 1.225kg/m³, 15°C(dry air), 1013hPa)로의 보정을 하여야 한다.

표준 공기밀도 상태의 풍속 보정은 [3]의 문헌을 참고하였으며, 아래의 (2)와 (3)식에 의해서 정규화 한다.¹⁾

$$\rho_{10\min} = \frac{B_{10\min}}{R_0 T_{10\min}} \quad (2)$$

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

측정 출력 곡선의 결정은 0.5m/s 풍속구간 bin을 사용하여 보정된 풍속과 출력의 평균 값의 식(4)와 (5)를 사용하여 결정한다.³⁾

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

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

연 에너지 생산량은 측정 출력곡선을 다양한 기준 풍속 분포에 적용하여 평가를 실시한다. 기준 풍속 분포는 형상계수가 2인 Weibull 분포와 동일한 Rayleigh 분포를 사용하여 기준 풍속이 4m/s에서 11m/s의 허브높이에서 식(6) 및 (7)을 사용하여 계산한다.³⁾

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

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

또한, 풍력발전기 출력계수 C_p 는 측정 출력 곡선으로부터 식(8)을 이용하여 계산한다.³⁾

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

시험자료군은 IEC 61400-12-1에서 제시된 정격출력 풍속 85%의 1.6배 풍속구간인 18m/s 이상의 데이터 bin을 확보 기준을 만족하고 풍력발전기 가동시간이 180hour 이상이어야 한다. 본 시험에서는 규정에서 정한 데이터 확보 기준을 만족하고 있음을 표 5에서 확인할 수가 있다.

표 5. 시험자료군의 요구조건 및 측정 현황

변수	요구사항	측정자료군
Bin 구간당 최소 자료수(개) (3m/s ~ 18m/s)	최소 3개 이상	최소 3개 이상
Bin 구간당 최소 자료수(개) (18m/s 이상)	최소 3개 이상	최소 3개 이상
풍력시스템 운전시간(시간) (3m/s ~ 18m/s)	180시간 이상	2,721시간

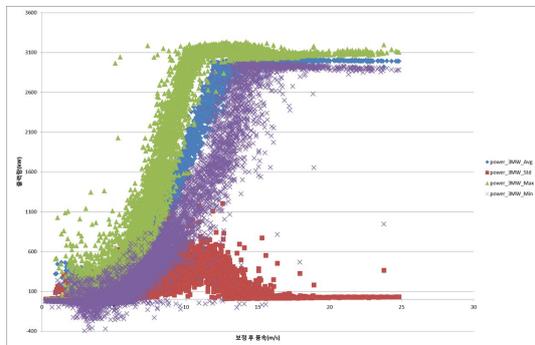


그림 3. 보정 풍속에 대한 출력 측정시험자료군

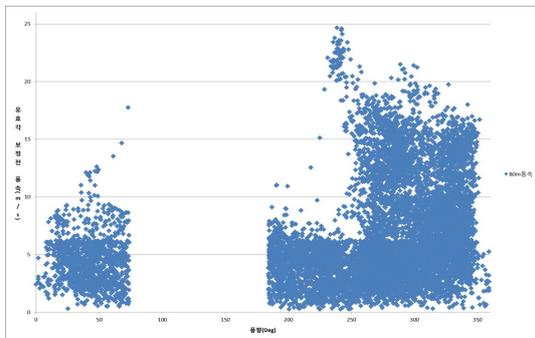


그림 4. 풍향에 대한 유효각내 풍속 분포

그림 3은 풍속 정규화에 따른 출력에 대한 시험 자료군을 나타내며, 그림 4는 측정유효 방위각에 대한 풍속 bin의 유효 개수를 그림으로 나타낸 것이며, 본 시험을 실시한 단지에서는 고풍속의 유효 데이터가 북서방위인 $270^\circ \sim 360^\circ$ 사이에서 계속되고 있음을 확인

할 수가 있다. 그림 5는 풍속에 대한 난류강도 측정 자료군을 나타내고 있다. 15m/s 구간에서 난류 값은 약 14% 이내로 분석이 되었다.

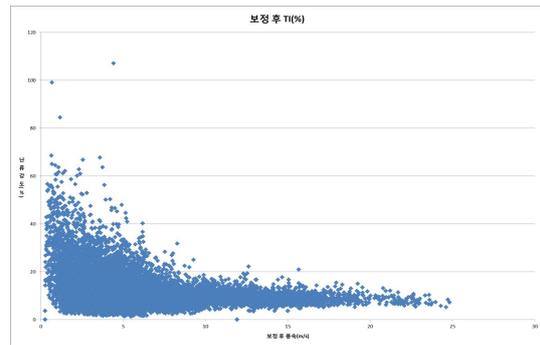


그림 5. 풍속에 대한 난류강도 측정 자료군

5. 측정자료 분석 및 결과 고찰

5.1 측정 출력곡선의 비교 분석

시험자료군의 정규화를 통하여 표준대기압 상태의 값으로 보정한 풍속 값으로 출력곡선을 표시하고, 설계 출력 값과 비교를 하면 그림 6과 같다.

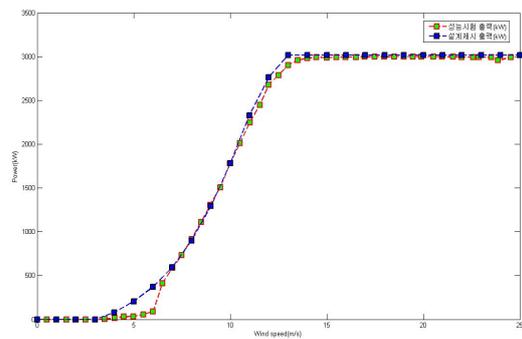


그림 6. 설계 및 시험 출력곡선의 비교

설계 제시 출력곡선과 성능시험 출력곡선은 7m/s 이상에서는 일치하고 있음을 확인하였다. 그러나, 4m/s ~ 7m/s의 구간에서는 다소 차이가 발생하는 이것은 성능측정 데이터 Set 선정에 있어, 풍력발전기의 상태 정보 값

의 부재로 인하여 데이터 선정에 오차가 발생한 것이다.

5.2 측정 출력계수의 비교

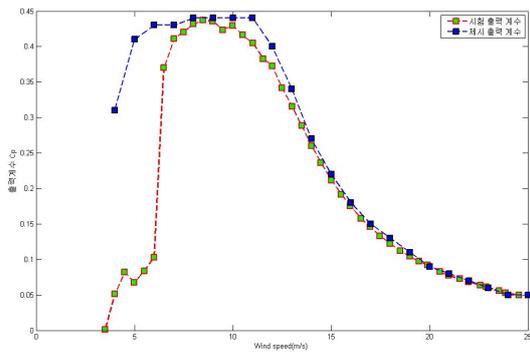


그림 7. 제시 및 성능시험 출력계수의 비교

측정된 출력곡선에 대해 풍속을 보정한 이후 표준대기압상태조건에서의 제시된 출력계수 곡선과 시험에서 분석된 출력계수 곡선을 비교하여 보면 그림 7과 같다. 풍속이 7m/s 이상의 풍속에서는 제시된 출력계수와 일치되고 있음을 확인할 수가 있었으며, 4~7m/s 구간에서는 선정된 데이터 Set의 오류로 제시된 값과 차이가 발생된 것으로 판단된다.

5.3 출력곡선의 불확도 분석

측정된 출력곡선에 대한 측정 불확도의 계산은 참고문헌 [3]에 정한 계산식에 의하여 분석을 실시하였으며, 측정 자료의 A형, B형 및 합성 불확도는 표 6과 같다. 합성 표준 불확도는 풍속이 낮은 저출력 상태에서 약 12~20kW 정도이고, 풍력발전시스템이 피치 제어를 시작하는 시점까지 그림 8에서와 같이 출력이 증가할수록 합성 불확도는 증가를 하다가 정격출력상태에 도달하면 합성 불확도는 안정화되고 있음을 확인할 수 있다. 풍속이 6.5m/s에서는 합성 불확도가 158kW 정도 분석이 된 것은 데이터 선정의 오류임을 추측할 수 있으며, 출력제어 부근에서 합성 불확도는 200kW정도까지 증가됨을 확인할 수 있었다.

표 6. 측정 출력곡선의 불확도 분석

Bin no.	자료 수	풍속 (m/s)	출력(kW)	제시 출력 (KW)	A형 불확도	B형 불확도	합성 불확도	편차율 (측정/제시) %
4	448	2.01	-1.81		3.2	12.2	12.7	-
5	541	2.5	-7.1		2.2	12.1	12.2	-
6	543	3	-6.32		2	12	12.1	-
7	570	3.51	0.2		2.1	12.1	12.3	-
8	725	4.01	13.33	78.9	2.1	12.8	13	16.9
9	815	4.5	30.31		2.9	13.6	13.9	-
10	744	5	33.8	203.7	3.6	12.1	12.6	16.59
11	658	5.5	56.27		4.9	15.3	16	-
12	684	6	90.46	368.4	6.7	19.3	20.5	24.55
13	247	6.49	412.06		11.2	157.9	158.3	-
14	260	7.02	585.98	596.6	7.3	84.9	85.2	98.22
15	254	7.5	730.38		7.9	82.4	82.8	-
16	272	8	916.27	900.8	7.4	105.3	105.6	101.72
17	259	8.5	1112.19		7.6	118.8	119	-
18	220	8.98	1307.29	1292.7	9.4	128	128.3	101.13
19	163	9.49	1507.05		10.9	128.2	128.6	-
20	174	9.99	1781.7	1781.2	13	190.4	190.8	100.03
21	122	10.5	2009.57		15.2	160.5	161.2	-
22	128	11.02	2246.89	2392.2	16.5	174.9	175.7	93.93
23	134	11.54	2449.51		14	152.4	153.1	-
24	160	12	2678.51	2764.6	13	205.2	205.6	96.89
25	159	12.5	2787.4		10.2	95.4	95.9	-
26	164	13.01	2901.69	3015.8	6.3	102.6	102.8	96.22
27	177	13.5	2959.91		3.7	61.3	61.4	-
28	165	14.01	2978.16	3015.8	2.7	34.1	34.2	98.75
29	147	14.48	2989.88		0.9	32.1	32.1	-
30	138	15.02	2988.48	3015.8	1.5	29.8	29.8	99.09
31	116	15.51	2990.57		2.3	29.9	30	-
32	126	15.97	2993.49	3015.8	0.7	30	30	99.26
33	98	16.53	2994.75		1.1	29.8	29.9	-
34	65	16.97	2995.67	3015.8	0.5	29.9	29.9	99.33
35	41	17.48	2998.07		0.6	30	30	-
36	33	17.99	2996.74	3015.8	1.9	29.9	29.9	99.37
37	22	18.51	2999.6		0.6	30	30.1	-
38	30	19	2998.29	3015.8	1.1	29.9	29.9	99.42
39	16	19.46	2999.14		1.1	29.9	29.9	-
40	7	19.9	2996.73	3015.8	1.3	30	30.1	99.37
41	12	20.52	2999.31		1.4	30	30	-
42	9	20.97	2998.45	3015.8	1.7	29.9	29.9	99.42
43	14	21.54	2995.92		1	30	30	-
44	14	21.98	2994.96	3015.8	1.1	29.9	29.9	99.31
45	12	22.58	2994.63		1.3	29.8	29.9	-
46	11	22.89	2992.62	3015.8	0.5	30.2	30.2	99.23
47	6	23.53	2992.14		0.3	29.8	29.8	-
48	3	23.87	2956.62	3015.8	37.2	87	94.6	98.04
49	3	24.55	2991.53		0.3	50.9	50.9	-

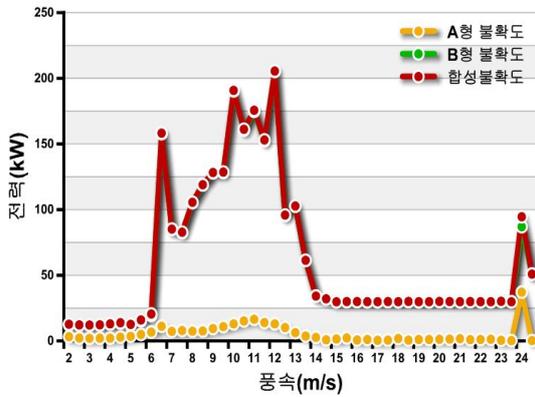


그림 8. 출력곡선에 따른 불확도 분석곡선

5.4 연간 에너지 생산량 분석

풍력발전시스템의 연간에너지 산출은 식(6)에 의해서 계산을 하였으며³⁾, 이때, 풍력발전시스템의 가동률은 100%로 가정하여 분석하였다. 측정된 출력곡선에 대해 풍속을 Rayleigh 분포로 가정하고 식(7)에 의한 함수를 이용하여 제시된 연간 에너지 생산량을 비교분석하였다. 분석결과는 표 7과 같다. 외삽 AEP와 제시 AEP의 편차율이 저 풍속 구간에서 차이가 발생하고 있는데, 풍력발전기 상태 정보 값의 부재에 따른 데이터 선정의 오류로 발생된 것이다.

표 7. 연간에너지 생산량의 분석

풍속 (m/s)	측정 AEP (MWh)	AEP 불확도 (MWh)	AEP 불확도 (%)	외삽 AEP (MWh)	제시 AEP (MWh)	편차율 (외삽/제시) (%)
4	1,216	236	19.41	1,216	1,759	69.15
5	2,880	380	13.21	2,880	3,484	82.65
6	5,023	512	10.20	5,023	5,643	89.00
7	7,326	606	8.28	7,326	7,947	92.19
8	9,547	660	6.91	9,547	10,157	93.99
9	11,532	681	5.91	11,684	12,124	96.37
10	13,193	679	5.15	13,293	13,760	96.61
11	14,484	663	4.58	14,555	15,022	96.89

6. 결 론

중대형 풍력발전기의 성능평가단계에서 풍력발전시스템의 출력성능시험을 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 측정 풍속을 표준대기압상태의 보정된 값으로 출력성능곡선을 비교분석한 결과, 풍력발전기 상태 정보 값의 부재로 인한 데이터 Set 선정의 오류 값으로 기인되는 저 풍속 구간의 값을 제외한 기타 구간에서는 설계 제시된 출력곡선과 매우 유사한 시험 결과를 도출하였다.
- (2) 측정 출력계수 값 및 측정 출력곡선이 제시된 값과 비교하여 데이터 Set의 오류로 인하여 저 풍속 구간에서 많은 차이가 발생되고 있지만, 연간 에너지산출을 계산하여 보면 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 보아, 저 풍속 구간의 에너지 생산량이 풍력발전시스템의 전체 에너지 생산 성능에 미치는 영향은 작다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 피치제어방식의 풍력발전기 경우 출력제어를 실시하는 풍속구간 인근까지 합성 불확도가 지속적으로 증가를 하다가 정격출력을 유지하는 고 풍속 상태에서는 안정된 합성 불확도를 유지하고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(신재생에너지기술개발사업)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(과제번호 : NP2009-0045)

참 고 문 헌

1. Nam Yoonsu, Site calibration for the wind turbine performance evaluation, KSME

- International Journal, Vol 18, 2004, 2250
-2257page
2. Imamura,H, Study on the wind measurements and performance evaluation of a WTGS in complex terrain(2nd report, influence of wind characteristics and turbulent intensity), Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, BHen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, PartB 70(693), 1223-1229page
 3. IEC(International Electrotechnical Commission), IEC Standard 61400-12-1, Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, 1rd Ed., 2005
 4. 한국에너지기술연구원, 육상풍력실증연구단지조성 연구사업 보고서, 지식경제부 신재생에너지기술개발, 2009
 5. 김건훈 외, 3MW 풍력발전시스템 출력 성능시험 및 불확도 분석, 한국태양에너지학회논문집, 2010 Vol 30, No. 6, 10~15page