

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 26, No. 4, 2006

1.5MW 풍력발전시스템 출력 성능시험 및 불확도 분석

김건훈*, 주영철*, 김대호**

*한국에너지기술연구원(kkh4417@kier.re.kr / ycju@kier.re.kr)

**한국남부발전(주)(kepler77@kospo.co.kr)

Power Performance Testing and Uncertainty Analysis for a 1.5MW Wind turbine

Kim, Keon-Hoon *, Ju, Young-Chul*, Kim, Dae-Ho **

*Korea Institute of Energy Research(kkh4417@kier.re.kr / ycju@kier.re.kr)

**KOSPO(kepler77@kospo.co.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 1.5MW 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 4.7~22.0% of uncertainty but, in the dominant wind speed region as 7~8m/s, the uncertainty are stably decreased to 7~8%.

Keywords : 풍력발전기(wind turbine), 풍력발전기의 전기적 출력(power performance)

1. 서론

현재 국내에서도 풍력발전에 대한 관심증대와 정부지원의 확대로 많은 풍력발전시스템이 설치운전 중에 있다. 따라서, 설치운전 중에 있는 풍력발

전 시스템의 성능시험 및 성능시험에 대한 불확도에 대한 관심도 함께 늘어나고 있다. 그러나, 성능시험에 대해서는 몇 차례의 현장에서의 시험이 진행되어 이의 결과가 부분적으로 발표되기도 하였으나, 아직도 많은 경험과 기술축적도 필요한 것도

접수일자:2006년 10월 10일, 심사완료일자:2006년 12월 10일

사실이다. 그밖에도, 성능시험 자체도 중요하지만 성능시험에 대한 결과에 대한 불확도의 해석도 매우 중요하게 인식되고 있어, 여러 시험 분야에서의 불확도 분석은 이루어진바 있으나, 풍력발전 성능시험 분야에서의 불확도 해석은 아직 시작단계라 할 수 있다. 본 논문에서는 제주 한경의 1.5MW 풍력발전시스템에 대한 현장에서의 성능시험의 결과와 이의 불확도 해석의 내용을 다루었으며, 이의 결과로서 시험 성능곡선을 얻어 설계곡선과의 비교를 통해 측정된 성능곡선상의 불확도를 분석하였다. 즉, 본 논문은 제주도 북군 한경면 신창리 해안 지역에 설치되어 운전중인 1.5MW급 풍력발전시스템인 NM72C/1500(3호기, WTG ID:17799)를 대상으로 2004년 6월 7일 0:00부터 2005년 6월 30일 23:50 까지 약 1년여의 기간 동안 현장에서의 성능시험과 이의 분석결과에 대해 논하고자 한다. 특히, 성능시험에서 소홀히 다루기 쉬우나, 측정 자료의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표인 불확도에 대한 해석도 함께 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 아직 불확도에 대한 해석을 풍력분야에 적용하는 사례는 많지 않아, 시작단계로서 그 의미가 크다고 할 수 있다. 그리고, 최근의 풍력분야 성능시험의 KOLAS 인증시스템 도입등과 어울려져서 측정 자료에 대한 불확도의 해석은 매우 중요하며 성능시험 시에 반드시 분석되어야 하는 지표로서 인식되고 있고, 본 논문은 현장에서의 풍력발전시스템에 대한 출력곡선 시험과 이의 신뢰도 평가를 위한 불확도 해석을 주요내용으로 하고 있으며, 향후의 풍력발전시스템의 성능시험 기술의 한 부분으로서 자리 잡아야 할 것이다.

2. 풍력발전 기기 사양

현장에서의 성능시험에 적용한 국제규격은 다음과 같다.

IEC61400-12 Wind Turbine Power

Performance Testing, 1998 MEASNET Power Performance measurement Procedure, Version 3 Nov. 2000

이상의 성능시험에 대한 규격을 적용하여, 풍력발전시스템의 성능평가를 위해 가장 중요한 출력곡선의 측정과 정해진 풍속분포(Rayleigh 분포)에 대한, 연간 발전량을 산정하고 시험자료에 의해 발생한 측정 불확도 및 이의 연간발전량에 대한 영향요소인 발전량의 불확도 등을 해석하였다. 이러한 시험과 해석을 진행하기위한 풍력발전시스템에 대한 사양과 시험부지에 대한 내용은 다음과 같다.

2.1 시험대상 풍력발전시스템 전경

제주 한경 풍력발전단지내의 3호기 전경과 성능시험을 위해 건설된 60m 높이의 met-mast 전경을 다음의 그림 1에 표시하고 있다.



그림 1. 시험대상 풍력발전시스템 전경

2.2 시험대상 풍력발전시스템 사양

다음 표 1에서는 시험대상 풍력발전시스템의 기본 사양을 보이고 있다. 시험대상 기기는 전형적인 덴마크형의 풍력기기인 VESTAS(NEG-MICON)사의 1.5MW 풍력발전시스템으로서 특이한 점은

active stall 방식으로 출력제어를 하고 있는 것으로서, IEC의 규격에 의해 출력이 아닌 풍속을 표준화하여 표준 대기상태로 표준화하게 된다.

표 1. 시험대상 풍력발전시스템 사양

Wind turbine	제작사	VESTAS
	형식	NM72C/1500kW
	시동풍속	4m/s
	정지풍속	25m/s
Rotor	출력제어	Active Stall
	회전자직경	72m
	허브높이	62m
	RPM	17.3
Blade	형식	AL35
	Air brake	Full Blade
	Twist	10°
	기어비	1:70.2
Gear Box	형식	planet/helical
	정격출력	1500kW
	극수	6
	전압	3X600V/60Hz
Generator	정격전류	1607A
	형식	Ball bearing
Yawing system	형식	Com./Thyristers
Controller	형식	Steel Plate
Tower	형식	

방향에서의 바람을 기대할 수 있는 지형적으로 우수한 지역이다. 다음의 그림 3에서와 같이 측정지점 주변은 동서남북 비교적 평활한 지형적 모습을 보이고 있으며, 주변의 1, 2, 4호 풍력기기의 위치를 보이고 있다.

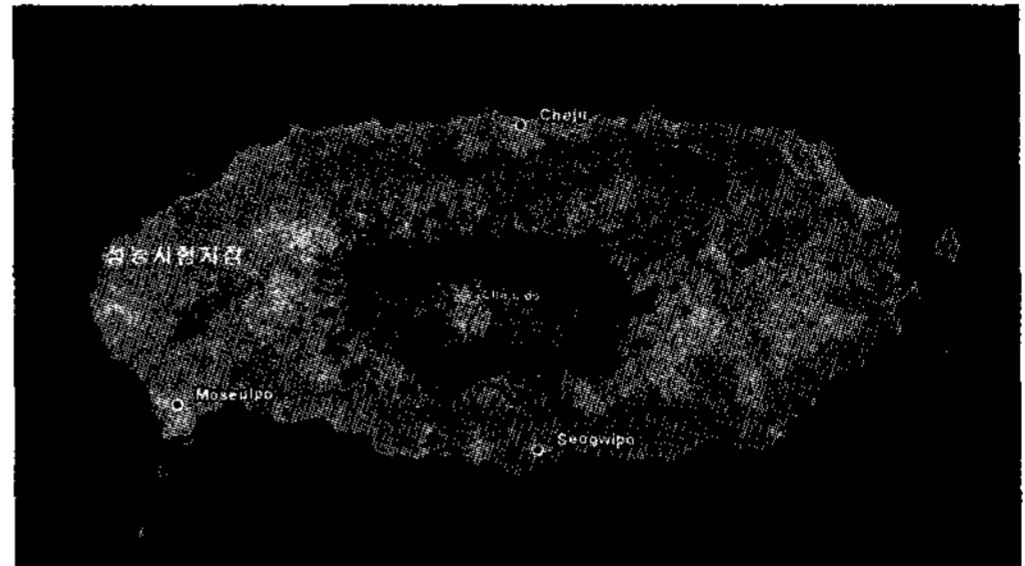


그림 2. 제주도내 시험대상 부지의 위치

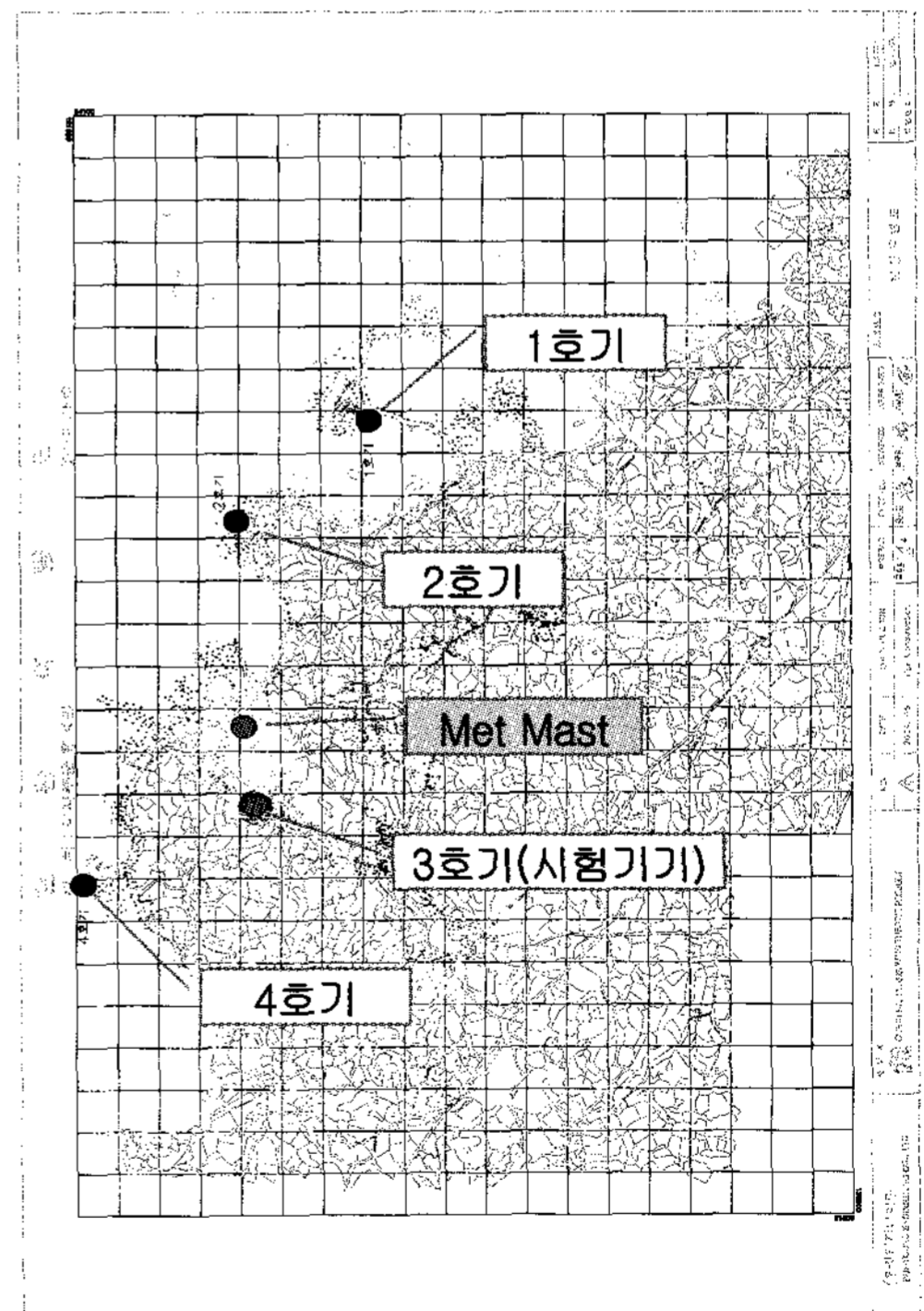


그림 3. 시험기기 및 Met Mast위치도

3. 시험부지 현황

3.1 시험부지 및 시험기기의 위치

제주 한경 지역은 제주시로부터 약 60km 정도 한림방향으로 떨어져 있는 지점으로서, 한라산을 중심으로 제주도 서북서쪽에 위치하고 있다. 다음의 그림 2에 제주도내 한경 풍력발전 단지의 위치를 보이고 있다. 전체적으로는 한경지역은 남서방향에서 북서방향으로 바다와 인접한 지형이며 동쪽으로는 점차 지표고도가 높아지는 한라산 지역으로 연결되어 있다. 그리고, 한경지역은 다소 먼 동쪽으로는 지형에 의한 영향을 제외한다면 거의 모든

다음의 표 2에서는 각 풍력기기 및 Met Mast의 TM좌표(WGS84)를 보이고 있다.

표 2. <시험기기 및 풍력기기의 위치좌표>
*제주 원점 TM좌표(WGS84)

호기	X(E)	Y(N)	표고	기종
1호기	122610.9	33370.3	3.6	NM72C-1500
2호기	122295.0	33139.8	3.6	NM72C-1500
3호기 (시험 기기)	122337.4	32468.0	2.4	NM72C-1500
4호기	121910.2	32290.6	3.6	NM72C-1500
Met Mast	122247.4	32623.9	5.0	-

3.2 시험부지의 지형변화도

시험부지의 지형변화도는 IEC61400-12 Annex A의 Table A.1-test site requirements : topographical variations의 정해진 조건을 만족하여 별도의 site calibration이 필요 없는 지형이다. Annex A에 의해 시험기기와 Met Mast 간의 거리 L은 180.0m이고, NM72C-1500 기종의 회전자 직경 D는 72.0m 이며, Met mast는 시험기기인 3호기로부터 330° 방위에 위치하고 있다.

3.3 유효방위각

IEC61400-12 Annex A에 의거하여 시험기기에 대한 풍향의 유효방위각을 설정하여야 하는데, 주변의 풍력기기로부터 영향을 받는 풍향은 3호기와 Met mast에 대한 다른 기기의 상대적인 위치(거리 및 각도)에 의해 결정된다. 주변의 장애물 또는 다른 풍력발전시스템에 의해 영향을 받는 영향 각도는 거리와 크기에 의해 다음의 (식 1)에 의해 결정된다.

$$\text{disturbed sector } \alpha = 2\text{Arctan}(2D_n/L_n + 0.25) - (\text{식 1})$$

다음의 표 3에 주변의 풍력기기에 의한 유효각의 설정과정을 보이고 있다. 즉, 영향 각 분석에 의해 측정시험시의 유효방위각은 55°~100° 및

280°~330°으로 결정되었다.

표 3. <영향 각 및 유효 각 산정>
*제주 원점 TM좌표(WGS84),(°)

호기	X(E)	Y(N)	D _n	위치	L _n	L _n /D _n	α
1호기	122610.9	33370.3	72.0	17	942.8	13.1	44
2호기	122295.0	33139.8	72.0	356	673.1	9.3	50
3호기 (*)	122337.4	32468.0	72.0	-	0	0	-
4호기	121910.2	32290.6	72.0	247	462.6	6.4	59

호기	X(E)	Y(N)	D _n	위치	L _n	L _n /D _n	α
1호기	122610.9	33370.3	72.0	26	830.2	11.5	46
2호기	122295.0	33139.8	72.0	5	518.1	7.2	56
3호기	122337.4	32468.0	72.0	150	180.0	2.5	93
4호기	121910.2	32290.6	72.0	45	474.1	6.6	58
Met Mast	122247.4	32623.9	72.0	-	0	0	-

4. 시험장비

4.1 측정변수 및 시험센서

본 시험측정의 측정 변수와 시험에 이용된 각 측정변수에 대한 센서의 종류와 위치 및 교정결과는 다음의 표 4에 표시하고 있다. 다음의 그림 4에 Met Mast의 각종 센서의 설치 위치를 보이고 있다.

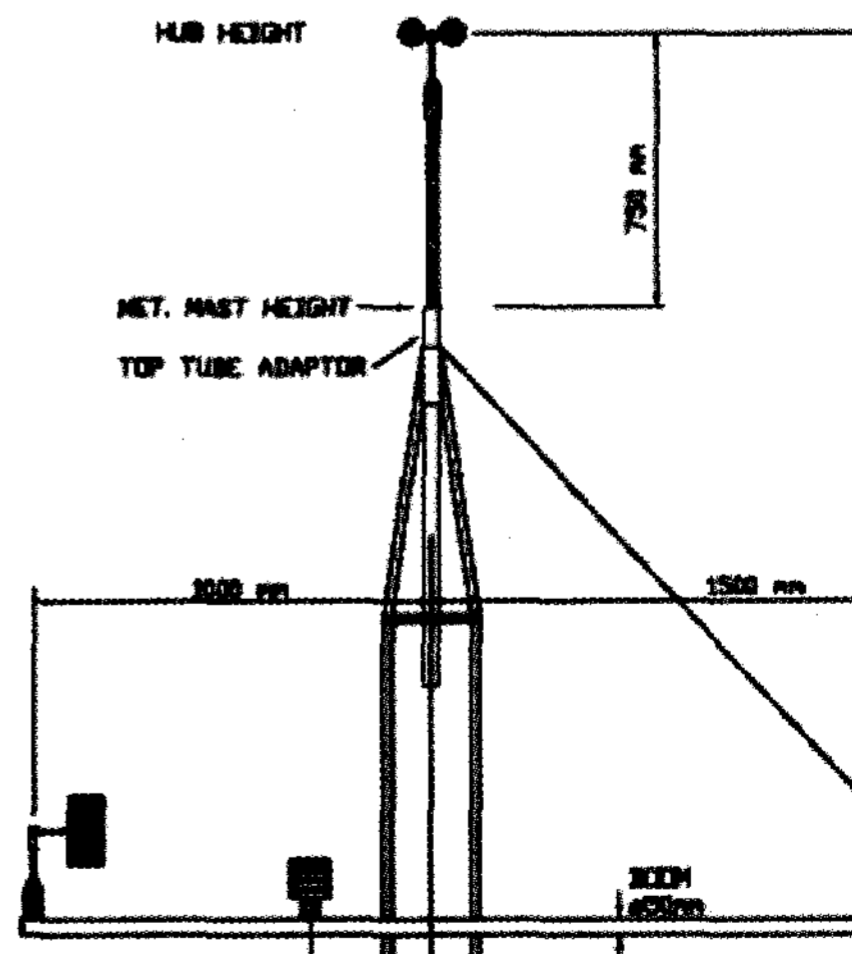


그림 4. Met Mast 각종 센서의 설치도

표 4. 측정변수 및 측정센서의 형식

측정변수	센서 및 변환기	위치
허브높이 의 풍속	컵형 풍속계 2546a 일련번호 : 827	지상 61m met mast
기준 풍속	컵형 풍속계 2546a 일련번호 : 828	지상 59.5m met mast
풍향	Potentiometer campbell Vector W200P 일련번호 : 12202	지상 59.5m met mast
온도계	Vaisala HMP 45A 일련번호 : Y2450022	지상 59.5m met mast
대기압계	Vaisala PTB100B 일련번호 : R5030001	지상 2m met mast
강우량계	Rain-O-Matic P1117 일련번호 : 97121502	지상 2m met mast
전력	CT (1500/1A/04/011798) (1500/1A/04/011799) (1500/1A/04/011800) Watt TD No.130/178015/10/1 NLB578 Camille Bauer Type : 5 0 2 - 3 4 F 1 Z291009061	계통연계 지점
기기상태 신호	Bit on/off control	제어반
제어반 풍속	Signal from control system	제어반

4.2 교정

시험에 이용된 각종 센서의 교정결과는 다음의 표 5와 같다.

표 5. 센서 교정 결과

측정변수	Gain	단위	Offset	단위
허브높이 풍속	0.62293	Hz/(m/s)	0.261	m/s
기준 풍속	0.62364	Hz/(m/s)	0.255	m/s
풍향	1		180	deg
온도	0.101	mV/°C	-40.6	°C
대기압	0.092	mV/°C	600	hPa
강우량	0.1	count	0	Dig
전력	0.6	mV/°C	0	kW
기기상태신 호	1	Dig.	0	Dig
제어반 풍속	0.56665	Hz/(m/s)	0.9274	m/s

5. 시험자료 분석

5.1 시험자료 선택

모든 측정절차와 방법은 IEC61400-12와 MEASNET의 규격을 따랐으며, 모든 자료는 10분 평균, 표준편차, 최대치, 최소치가 측정되어 분석되었고, 측정 자료는 다음과 같은 기준에 의해 분석에 사용될 시험 자료로서 취사선택되었다.

- 시험기간 : 2004년 6월 7일0시0분-2005년 6월30일 23시50분
- 풍향은 유효각 이내의 범위에 있을 것
- 측정 평균시간이 600초가 되어야 함.(10분평균)
- STATUS 신호가 1이어야 함.
- 시험기기가 정상작동 중에 있어야 함.
- 풍속이 5.25m/sec이상이면서도 출력이 30kW 이하인 자료는 이상 자료로서 간주하여 제거함.

5.2 시험자료 보정

모든 측정절차와 방법은 IEC61400-12와 MEASNET의 규격을 따라 시행하며, 표준대기상태 [공기밀도 1.225kg/m³, 15°C(dry air), 1013hPa] 로의 보정은 다음과 같은 방법으로 수행되었다.

○ 측정자료는 표준 공기밀도 (1.225kg/m³)상태로 보정함.

→ 공기 밀도 : 측정된 대기 온도와 대기압에 의해 결정

$$\rho_{10\min} = \frac{B_{10\min}}{R \cdot T_{10\min}} \quad \text{--- (식 2)}$$

→ 능동피치제어 방식 풍력기기에 대한 풍속의 보정

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

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

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

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

○ 연 에너지 생산량(AEP)은 측정된 출력곡선과 Rayleigh 분포의 풍속 확률 밀도 함수로써 산정됨
 -> 연간 발전량 산정 기준 평균풍속 : 연 평균 풍속 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11m/s

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

(식 6)

→ 풍속에 대한 Rayleigh 누적 확률 분포 함수

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

(식 7)

○ 출력계수는 측정된 출력곡선에 의해 산정됨

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

5.3 시험자료군 및 결과

시험자료군(Database)는 Bin방법에 의해 정리되고, IEC61400-12에 의해 최소한의 요구조건을 모두 만족하고 있다. 다음의 그림 5에는 보정후의 모든 측정 자료를 함께 표시하고 있다.

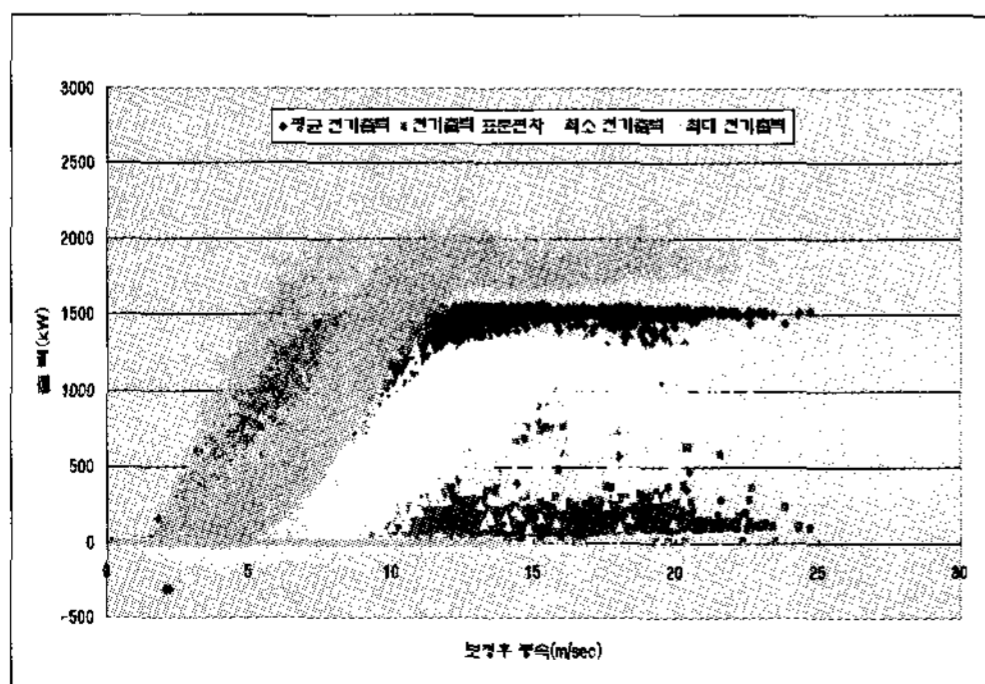


그림 5. 풍속에 대한 출력 측정 자료군

다음의 그림 6에서는 모든 측정된 난류강도를 보이고 있으며, 그림 7에서는 유효 풍향각내 풍속의 분포를 보이고 있고, 그림 8에서는 유효 풍향각내 난류강도를 보이고 있다.

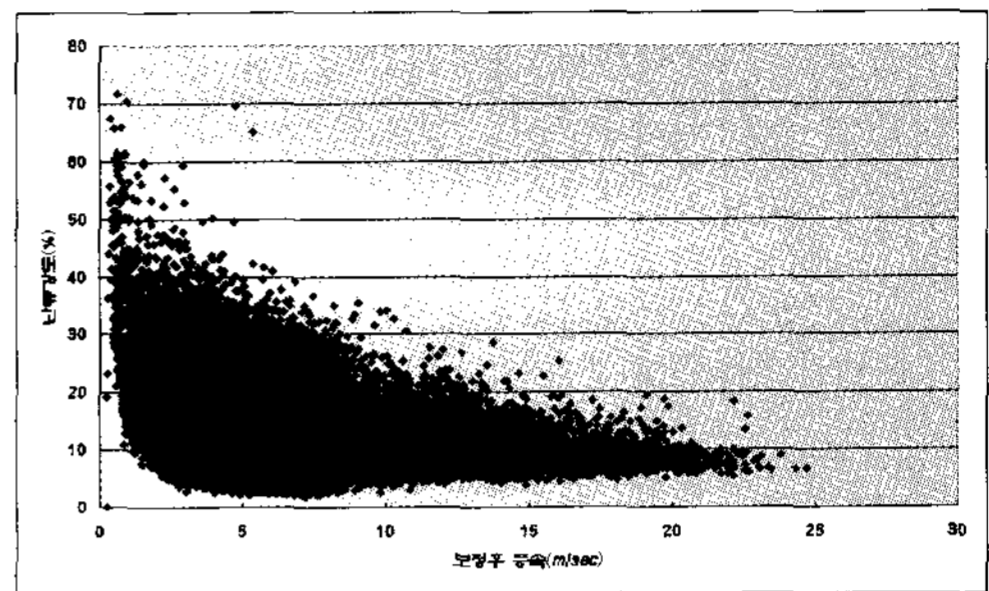


그림 6. 풍속에 대한 난류강도 측정 자료군

6. 시험 결과

6.1 측정 출력곡선

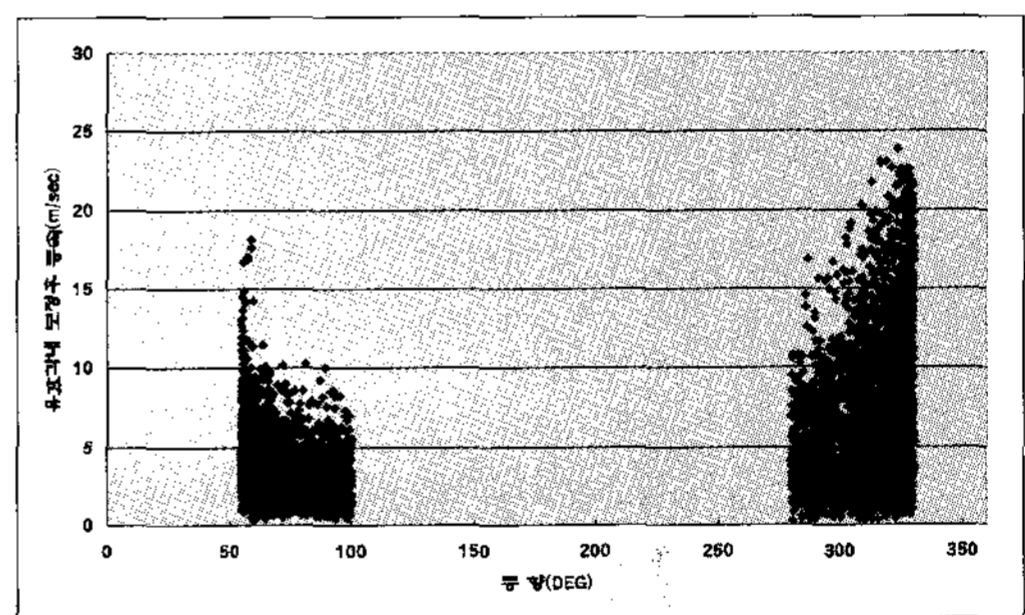


그림 7. 풍향에 대한 유효각내 풍속

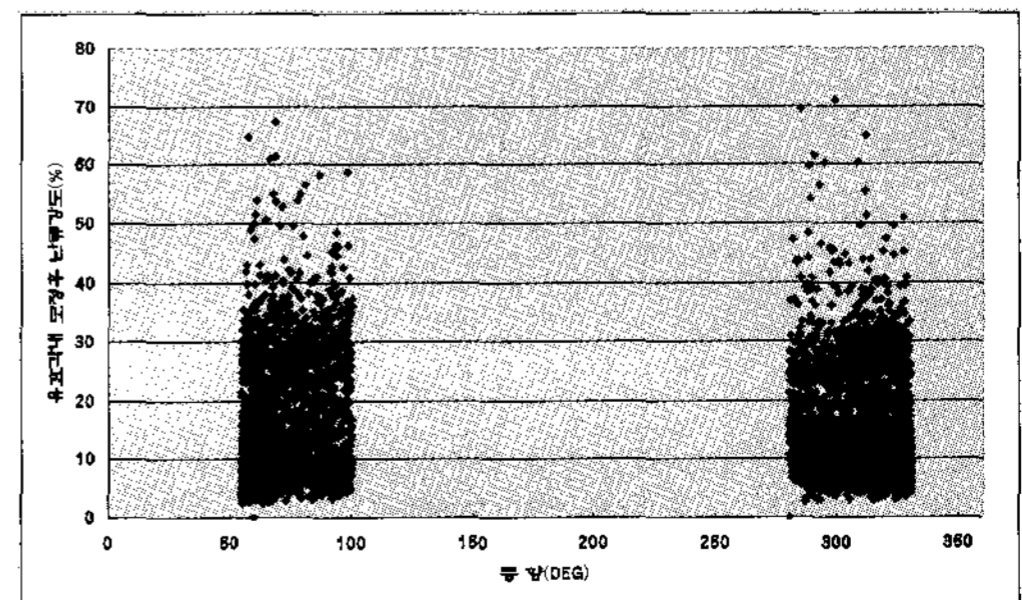


그림 8. 풍향에 대한 유효각내 난류강도

본 시험을 통해 측정된 풍속을 보정한 출력곡선은 다음의 **그림 9**와 같고, bin 구간별 정리된 출력곡선과 설계출력과 비교는 다음의 **그림 10**과 같은데, 설계 치와 시험치 간의 차이가 거의 보이지 않아 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

6.2 측정된 출력계수 곡선

본 시험을 통해 측정된 출력곡선에 대해 풍속을 보정한 이후 표준 대기 상태에서의 제시된 출력계수 곡선과 시험에서 분석된 출력계수 곡선의 비교를 **그림 11**에서 보이고 있는데, 출력곡선과 마찬가지로 일치하고 있으며, 풍속이 강해질 수록 일치성이 더욱 높아지고 있음을 알 수 있다.

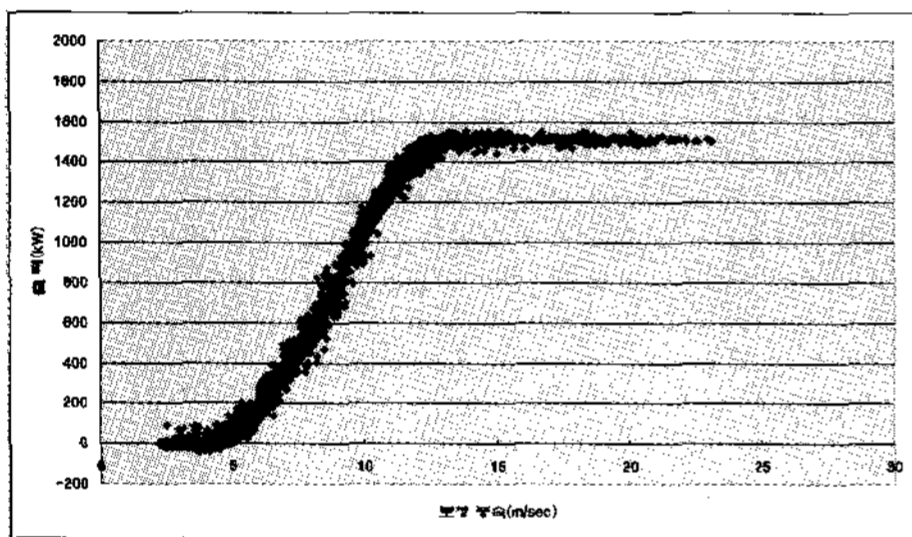


그림 9. 풍속에 대한 출력곡선

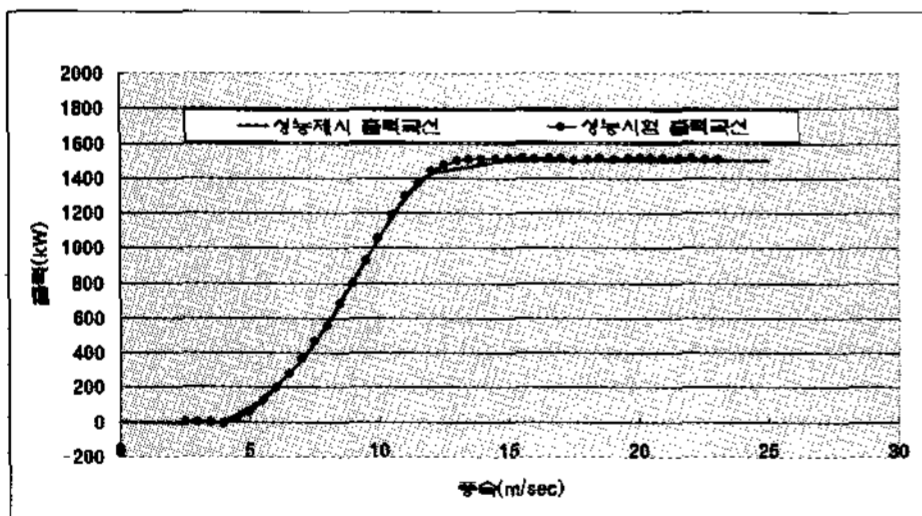


그림 10. 풍속에 대한 bin 구간 출력곡선

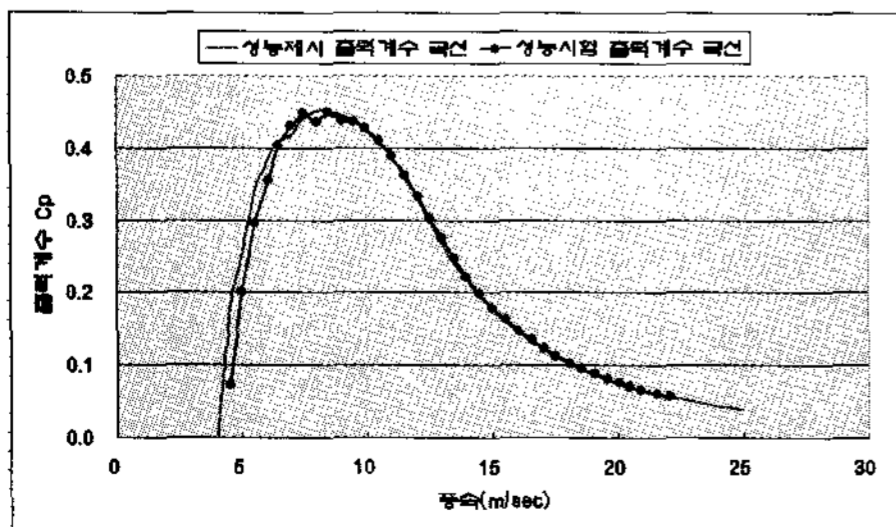


그림 11. 설계 및 성능시험 출력계수의 비교

6.3 측정된 출력곡선의 불확도 분석

본 시험을 통해 측정된 출력곡선에 대한 A형, B형 및 합성 표준 불확도를 다음의 **표 6**에 분석하였다. 측정된 출력곡선과 설계(제시) 출력곡선과의 비율은 Bin 7(4.48m/s)에서 최저수준인 41.1%에서 부터 대부분의 풍속구간에서 99%~101%이 내로서 설계치인 출력곡선과 시험 출력곡선간의 차이는 거의 나타나지 않아 우선적으로 시험자료의 신뢰성과 설계 출력곡선과 시험 곡선과의 일치성을 잘 보이고 있다. 아울러, 출력곡선의 표준 불확도는 A형과 B형으로서 구분되며 이의 합성치인 표준 합성 불확도는 낮은 풍속범위에서는 낮은 수치를 보이고 있으나, 점차 풍속과 출력이 증가하면서 불확도도 점차 커지다가 정격출력 직전인 9.97m/s (1056.23kW)에서 100.1kW로서 가장 큰 수치를 보이고 있다. 이는 실제 풍력발전시스템이 정격 풍속에 도달하기 직전에서부터 출력제어에 돌입하여 이 부분에서의 출력의 변동성이 가장 큰 이유와 연관이 있게 된다. 그러나, 이 구간을 지나게 되면 오히려 표준 합성 불확도가 급격하게 줄어들어 안정적인 출력발생이 이루어지고 있음을 보이고 있다. 이러한 현상은 1500kW에 다다른 12.98m/s 이후에서 부터 나타나고 있다.

6.4 연간 에너지 생산량

본 시험을 통해 측정된 출력곡선에 대해 풍속을 Rayleigh 분포로 가정하고, 풍력기기의 가동률은 100%이며, 앞의 (식 6)에 명시된 누적 연산 식을 이용하여 분석한 결과를 **표 7**에 보이고 있다.

7. 결론

1.5MW 풍력발전시스템을 대상으로 현장에서 성능시험을 수행하여, 측정 출력곡선과 이의 주어진 풍속분포에 대해 연간발전량을 산정 하였다. 아울러, 출력곡선의 측정과 연간 발전량의 산정에 따른 불확도를 분석하였다. 모든 시험과 분석은 국

제 규격을 따라 수행되었으며, 이에 따라 대용량 풍력발전시스템에 대한 안정적인 성능시험 및 이의 신뢰도를 나타내는 불확도 분석에 대한 기술의 정립을 이루게 되었다.

낮은 풍속에서의 성능곡선은 상대적으로 높은 불확도를 갖게 되며 이는 정격 풍속의 직전에서 가장 최대 불확도를 가지게 되며, 정격출력이 발생하는 정격풍속 이후에서는 안정적인 출력과 낮은 불확도가 유지되고 있다.

표 6. 측정 출력곡선의 불확도 분석(표준대기상태)

Bin no.	풍속 (m/s)	출력 (kW)	자료 수	Cp	A형 표준 불확도 (kW)	B형 표준 불확도 (kW)	합성 표준 불확도 (kW)
3	2.50	-2.85	499	-0.073	0.206	5.850	5.853
4	2.99	-2.54	502	-0.038	0.329	5.775	5.785
5	3.49	-4.60	386	-0.043	0.563	5.849	5.876
6	3.99	-6.65	335	-0.042	0.811	5.858	5.914
7	4.48	16.23	318	0.072	1.253	12.74 ₃	12.804
8	4.99	62.01	228	0.200	2.165	23.83 ₉	23.937
9	5.48	121.50	197	0.295	2.480	32.65 ₆	32.750
10	6.02	192.98	177	0.355	3.374	37.48 ₅	37.637
11	6.50	276.44	194	0.404	3.395	50.81 ₃	50.926
12	6.99	366.00	133	0.430	4.516	55.41 ₇	55.601
13	7.50	470.32	119	0.448	5.186	64.61 ₅	64.823
14	8.00	556.73	147	0.436	5.336	56.44 ₂	56.694
15	8.47	680.97	131	0.450	6.387	89.73 ₇	89.964
16	9.00	794.88	90	0.438	7.223	76.22 ₁	76.563
17	9.50	930.46	80	0.436	7.024	99.36 ₈	99.616
18	9.97	1056.2 ₃	102	0.427	6.406	99.97 ₉	100.18 ₄

Bin no.	풍속 (m/s)	출력 (kW)	자료 수	Cp	A형 표준 불확도 (kW)	B형 표준 불확도 (kW)	합성 표준 불확도 (kW)
19	10.52	1189.4 ₃	74	0.410	7.275	96.78 ₁	97.054
20	11.01	1298.1 ₁	86	0.390	5.579	90.32 ₃	90.496
21	11.50	1369.4 ₆	84	0.361	5.609	63.57 ₆	63.823
22	12.01	1436.7 ₇	65	0.333	5.153	59.91 ₅	60.137
23	12.50	1472.8 ₃	52	0.303	5.114	37.16 ₃	37.513
24	12.98	1500.3 ₀	54	0.275	3.144	31.35 ₂	31.509
25	13.48	1506.8 ₉	54	0.247	2.914	18.59 ₄	18.821
26	13.97	1510.0 ₅	51	0.222	2.715	17.78 ₇	17.993
27	14.49	1511.2 ₄	46	0.199	2.957	17.56 ₃	17.810
28	15.02	1512.8 ₆	40	0.179	2.676	17.61 ₀	17.812
29	15.53	1514.7 ₂	30	0.162	2.350	17.67 ₀	17.826
30	16.02	1509.1 ₆	22	0.147	3.069	18.59 ₉	18.820
31	16.54	1514.0 ₄	15	0.134	3.589	18.32 ₃	18.671
32	17.02	1514.0 ₅	22	0.123	1.135	17.55 ₃	17.589
33	17.50	1503.8 ₃	24	0.113	3.147	21.52 ₈	21.757
34	18.06	1511.1 ₂	17	0.103	3.356	19.26 ₀	19.550
35	18.50	1514.1 ₇	21	0.096	4.154	18.06 ₈	18.540
36	19.04	1505.6 ₅	12	0.088	2.854	20.24 ₄	20.444
37	19.57	1514.6 ₃	8	0.081	3.997	20.74 ₈	21.130
38	20.04	1516.5 ₀	12	0.076	4.087	17.78 ₅	18.248
39	20.44	1513.2 ₆	11	0.071	4.142	18.37 ₃	18.834
40	20.91	1511.6 ₃	8	0.066	2.818	17.70 ₀	17.923
41	21.54	1516.3 ₅	8	0.061	2.237	18.29 ₂	18.428
42	22.03	1512.6 ₈	8	0.057	2.196	18.32 ₅	18.456
43	22.54	1505.2 ₀	3	0.053	1.608	20.38 ₈	20.452
44	23.05	1508.8 ₀	3	0.049	1.819	18.32 ₈	18.418

표 7 <연간 발전량 비교(표준대기상태)>

풍속 m/s	Meas AEP MWh	AEP 불확도 MWh	AEP 불확도 %	Extra p. AEP MWh	제시 AEP MWh	Extrap. AEP /제시AEP P %
4	849	187	22.0	849	904	93.9
5	1859	276	14.8	1859	1910	97.3
6	3071	342	11.1	3071	3106	98.9
7	4306	379	8.8	4307	4321	99.7
8	5440	393	7.2	5447	5446	100.0
9	6401	391	6.1	6425	6424	100.0
10	7151	379	5.3	7205	7224	99.7
11	7679	363	4.7	7775	7835	99.2

이는 낮은 풍속 하에서는 높은 난류강도를 보임으로서 이로 인한 공력계수의 변동성 증대에 따른 출력의 변동성 증가와 저 출력의 발전기에 의한 출력 변동성 등의 종합적인 영향으로 해석할 수 있다. 그러나, 이러한 현상도 9.97m/s(1056.23kW)이후 부터는 안정적인 방향으로 전환되어 불확도가 점차 줄어드는 것을 보이고 있다. 역시 풍속이 증가함에 따라 풍속 자체의 난류강도의 감소 및 이에 따른 날개의 안정적 기계출력과 발전기의 고출력 따른 안정화 등의 영향으로서 역시 해석할 수 있다.

출력곡선의 불확도는 결국 연간 발전량의 불확도에도 직접적으로 영향을 미치게 되어 낮은 연간 평균풍속에서의 예상 발전량의 높은 불확도를 유발하고 있다. 즉, 낮은 연 평균 풍속에서는 연간 발전량의 불확도가 10~20%이상의 불확도를 보이고

있어 상당히 큰 불확실성을 보이고 있다. 이러한 이유도 결과적으로 앞서와 같이 풍속의 불확실성 및 저출력 상태의 기기 및 측정센서 등을 이유로 해석할 수 있게 된다.

본 시험에 있어서는 연 평균 풍속 4m/s에서 11m/s 구간까지 연간발전량 예측에서 약 22%에서 4.7% 정도의 불확도를 보이고 있으며, 제주의 현지 풍속조건을 감안 하였을때, 즉 연 평균 풍속 7~8m/s의 범위에서는 7~8% 정도의 불확도를 갖는 것으로 분석 되었다.

참고 문헌

1. IEC 61400-12 Wind Turbine Performance Testing, 1998
2. MEASNET Power Performance Measurement Procedure, Version 3 Nov. 2000
3. 김건훈, "제주 한경 1.5MW 풍력발전시스템 성능시험", 한국에너지기술연구원, 2005.
4. 김건훈외, "제주도내 풍력발전 단지 성능 모니터링 및 평가(총괄)", 제주도, 2004. 6.
5. IEA, "IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation Power Performance Testing, 2nd Ed.", 1990
6. Germanischer Lloyd, "testing of Wind Turbines", 1994.