

# Site calibration이 풍력발전시스템 성능시험 불확도에 미치는 영향 연구

김건훈\*, 현승건\*\*

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

## A Study for the Effect on the Uncertainty of Power Performance Testing of Windturbine by a Site Calibration

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

A comparison study between two performance testing results, one is on the site calibration not needed and the other is needed, was proceeded for the understanding on the effect of site calibration on the complex terrain. As a result, it is revealed that all of uncertainty components is effected by the topographical features dramatically. And the maximum difference of uncertainty reached at around 8% of rated capacity of wind turbine. So, the site calibration is an effective method to remove the variable wind effect by the ground complexity and must be proceeded before the power performance testing of a wind turbine.

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

### 1. 서론

풍력발전에 대한 관심증대와 정부지원의 확대로 많은 풍력발전시스템이 설치운전 중에 있다. 또한 풍력기술의 비약적인 발전은 풍력기술 공급자 확대를 불러오게 되었으며,

풍력기술에 대한 최종 소비자들은 다양한 기술 개발품에 대해서 소비자 측면에서의 성능, 품질, 안전성 등에 대한 객관적 검증을 원하게 된다. 따라서, 설치운전 중에 있는 풍력발전시스템의 성능시험 대한 관심도 함께 늘어나고 있다. 또한, 성능시험 자체도 중요하지만

투고일자 : 2011년 2월 24일, 심사일자 : 2011년 3월 10일, 게재확정일자 : 2011년 4월 15일  
교신저자 : 김건훈(kkh4417@kier.re.kr)

성능시험 결과에 대한 불확도의 해석도 매우 중요하게 인식되고 있다. 특히, 우리나라의 지형은 산악 지형의 복잡성을 띄고 있어 성능시험 시 site calibration과 성능시험 결과 및 불확도와와의 관계에 대한 객관적, 과학적인 분석이 매우 중요하다.

본 논문은 제주시 한경면 신창리 해안지역에 설치되어 운전 중인 3.0MW급 풍력발전시스템과 부산시 기장군 장안읍 한국수력원자력(주)의 신고리 원자력 부지 내에서 운전 중인 750kW급 풍력시스템을 대상으로 현장에서의 성능시험과 이의 분석결과에 대해 성능시험에서 소홀히 다루기 쉬우나, 측정 자료의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표인 불확도에 site calibration이 미치는 영향에 대해 논하고자한다.

## 2. 시험대상 풍력발전시스템 사양

시험대상 기기는 국외 V사의 3.0MW 풍력발전시스템과 국내 U사의 750kW 풍력발전시스템으로서 다음 [표 1]에서는 시험대상 풍력발전시스템의 기본 사양을 보이고 있다.

표 1. 시험대상 풍력발전시스템 사양

Wind turbine	제작사	국외 V사	국내 U사
	형식	V90-3.0MW	U54-750kW
	시동풍속	4m/s	3m/s
	중단풍속	25m/s	25m/s
Rotor	회전자 직경	90m	54m
	허브높이	80m	60m
Gear Box	형식	2 P / 1 H	Gearless
	기어비	1 : 109.01	
Generator	정격출력	3.0MW	750kW

## 3. 시험부지 현황

### 3.1 시험부지의 위치

제주 한경 지역은 제주시로부터 약 60km 정도 서쪽으로 떨어져 있고, 고리 지역은 부산시로부터 약 26km 정도 떨어져 있는 지점

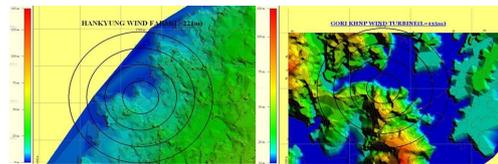
으로서, 동해바다와 인접한 위치에 있다. 다음의 [그림 1]에 한경 및 고리원자력 본부 시험 부지의 위치를 보이고 있다.



그림 1. 한경 및 고리원전 시험부지 위치

### 3.2 시험기기의 위치 및 지형변화도

IEC 61400-12-1 Annex B의 Table B.1 - Test site requirements : topographical variations의 정해진 조건을 의하여 한경지역은 지형 경사도가 완만하여 site calibration이 부가적으로 필요치 않은 지형적 특성을 지니고 있다. 반면에 신고리원자력 부지내 시험 부지의 주변에 시험지역보다 조금 지표고도가 높은 야산이 연결되어 있고 지형 경사도가 심하여 별도의 site calibration이 필요한 지형으로는 판단되고 있다. 다음의 [그림 2]는 각 시험지역의 지형 고도 및 경사도를 보여주고 있다.



(a) 한경 시험 부지 (b) 고리원전 시험부지

그림 2. 시험 부지의 지형 고도 및 경사도 분포

### 3.3 유효방위각

IEC61400-12-1 Annex A에 의거하여 시험기기에 대한 풍향의 유효방위각을 설정 하였다. 시험 대상 풍력발전시스템과 met. mast에 대한 다른 지형 및 지물의 상대적인 위치(거리 및 각도)에 의해 결정되게 된다.

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

환경 시험 대상 시험기기와 Met. Mast 간 거리 L은 221.0m이고, 시험기기의 회전자 직경 D는 90.0m 이므로 이격 거리는 2.46D 이격되어 있다. 측정시험시의 유효방위각은 252° ~ 47°로서 결정 되었다.

고리원전 시험대상 시험기기와 met. mast 간의 거리 L은 135.0m이고, 시험기기의 회전자 직경 D는 54.0m이므로 이격 거리는 2.5D 이격되어 있다. 현지에서의 분석에 의해 측정 시험시의 유효방위각은 260°~10° 및 185°~190°로서 결정 되었다.

Met. Mast 및 성능 시험대상 풍력기기 주변의 장애물에 대한 평면도상의 배치현황은 [그림 3]와 [그림 4]과 같다.

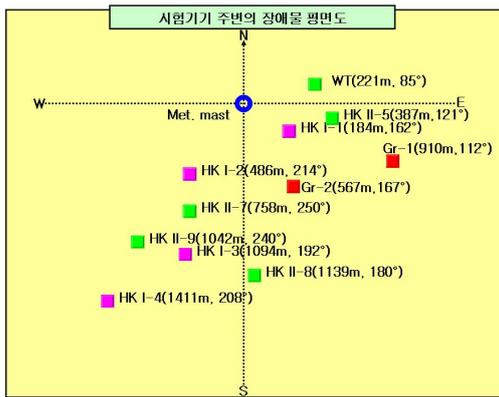


그림 3. 한경지역 각 방위별 장애물 분포도

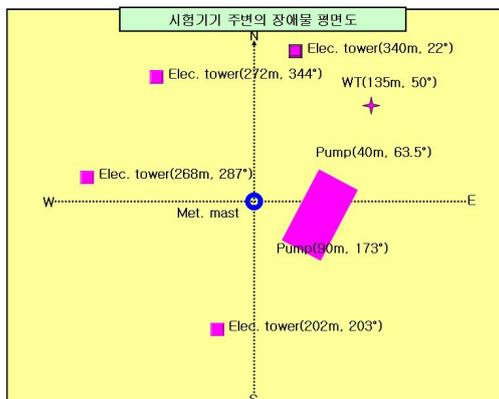


그림 4. 고리원전 각 방위별 장애물 분포도

#### 4. 시험자료분석

모든 측정절차와 방법은 IEC61400-12-1과 MEASNET의 규격에 따라 시행하며, 표준대기상태[공기밀도 1.225kg/m<sup>3</sup>, 15°C(dry air), 1013hPa]로 보정했다.

##### 4.1 불확도 분석 요소

IEC61400-12-1 Annex D : Evaluation of uncertainty in measurement에서 요구하는 불확도 요소를 다음의 [표 2]에 나타냈다.

표 2. List of uncertainty components

Measured parameter	Uncertainty components	Uncertainty category
Electric power	전류 변환기	B
	전압 변환기	B
	전력변환기 혹은 출력 측정 장치	B
	데이터 획득 시스템	B
Wind speed	전력 변동성	A
	풍속계 보정	B
	작동 특성	B
	설치 영향	B
	데이터 획득 시스템	B
Air temperature	지형에 따른 유동변형	B
	온도센서	B
	복사차폐	B
	설치영향	B
Air pressure	데이터 획득 시스템	B
	압력센서	B
	설치영향	B
Data acquisition system	데이터 획득 시스템	B
	신호전달	B
	시스템 정확도	B
	신호처리	B

##### 4.2 각 측정변수의 Category A 불확도

- 각 bin에서의 정규화된 출력 분포의 표준편차

1) Category A 불확도 :

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2}$$

2) Precision index :  $S_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}}$

**4.3 각 측정변수의 Category B 불확도**  
 - 자동자료처리장치의 Category B 불확도  
 Category B 불확도 :

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d1,i}^2 + u_{d2,i}^2 + u_{d3,i}^2}$$

- 출력측정상의 Category B 불확도  
 Category B 불확도 :

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P1,i}^2 + u_{P2,i}^2 + u_{P3,i}^2 + u_{dP,i}^2}$$

- 풍속측정상의 Category B 불확도  
 Category B 불확도 :

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + u_{V3,i}^2 + u_{V4,i}^2 + u_{dV,i}^2}$$

- 대기온도 측정상의 Category B 불확도  
 Category B 불확도 :

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T1,i}^2 + u_{T2,i}^2 + u_{T3,i}^2 + u_{dT,i}^2}$$

- 대기압 측정상의 Category B 불확도  
 Category B 불확도 :

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B1,i}^2 + u_{B2,i}^2 + u_{dB,i}^2}$$

**4.4 조합 Category B 불확도**  
 - 출력곡선상의 합성 표준불확도  
 (Combined standard uncertainty)  
 합성 표준불확도 :

$$u_{c,i} = \sqrt{s_{p,j}^2 + u_{p,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2}$$

- 연간발전량산정의 합성 표준불확도  
 (Combined standard uncertainty)  
 합성 표준 불확도 :

$$u_{c,i} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + \left( \sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2}$$

**5 시험결과 및 고찰**

**5.1 측정 출력곡선**

본 시험을 통해 측정된 풍속을 보정한 bin 구간별 출력곡선과 설계출력과 비교는 다음의 [그림 5]와 [그림 6]과 같은데, 설계 치와 시험치 간의 차이가 거의 보이지 않아 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

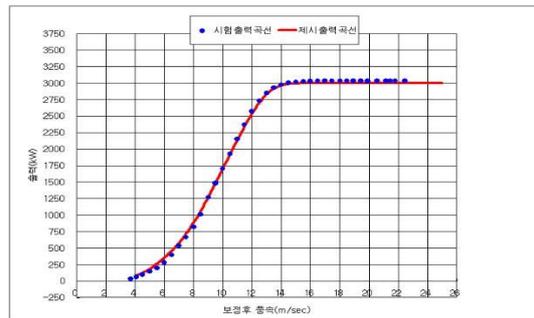


그림 5. 환경의 풍속에 대한 bin 구간 출력곡선

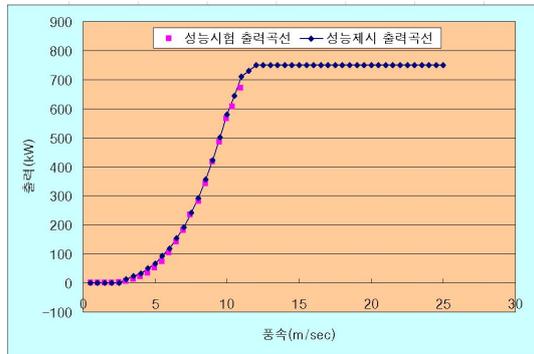


그림 6. 고리원전의 풍속에 대한 bin 구간 출력곡선

**5.2 측정된 출력곡선의 불확도 분석**

본 시험을 통해 측정된 출력곡선에 대한 A형, B형 및 합성 표준 불확도를 [표 3]과 [표 4]에 나타내고 있다.

환경에서의 합성 표준 불확도는 저출력 상태에서는 약 20~50kW 정도를 보이고, 출력이 커지면 120~130kW 정도의 표준 불확도를 보이고 있다. 이는 저출력 상태에서 출력

에 상대적으로 약 10% 정도의 합성 표준 불확도를 갖고 출력이 커지면서 그 출력에 상대적으로 약 5% 정도의 합성 표준 불확도를 갖는다.

고리원전에서의 합성 표준 불확도는 낮은 풍속상태인 저출력 상태에서는 상대적으로 매우 큰 수치인 약4~5kW 정도를 보이고, 출력이 커지면 그 출력에 상대적으로 작아져서 60~70kW 정도의 표준 불확도를 보이고 있다.

표 3. 환경에서의 측정 출력곡선의 불확도 분석

Bin no.	풍속 m/s	출력 (kW)	자료 수	계시 출력 (kW)	A형 표준 불확도 (kW)	B형 표준 불확도 (kW)	합성 표준 불확도 (kW)
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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

표 4. 고리 원전에서의 측정 출력곡선의 불확도 분석

Bin no.	풍속 m/s	출력 (kW)	자료 수	계시 출력 (kW)	A형 표준 불확도 (kW)	B형 표준 불확도 (kW)	합성 표준 불확도 (kW)
1	0.53	0.08	467	0.00	0.036	4.330	4.330
2	1.01	0.13	945	0.00	0.028	4.330	4.330
3	1.50	0.23	1,214	0.00	0.030	4.330	4.330
4	2.00	0.44	1,418	0.00	0.037	4.331	4.331
5	2.50	1.39	1,602	0.00	0.067	4.353	4.354
6	3.00	5.12	1,619	12.8	0.150	4.724	4.726
7	3.51	12.29	1,585	22.8	0.234	5.765	5.769
8	3.99	21.75	1,524	32.9	0.277	7.062	7.067
9	4.49	34.28	1,489	49.8	0.371	8.771	8.779
10	4.99	51.25	1,179	66.7	0.551	11.899	11.911
11	5.48	72.87	748	92.4	0.824	15.908	15.929
12	5.98	103.90	424	118.1	1.281	23.353	23.388
13	6.47	141.83	256	154.8	2.016	29.973	30.041
14	6.98	181.71	175	191.4	2.389	32.220	32.309
15	7.45	233.88	104	241.3	3.735	48.315	48.460
16	8.02	281.54	52	291.1	6.153	38.757	39.242
17	8.53	341.28	38	357.0	8.893	57.061	57.750
18	9.00	416.68	40	422.9	5.531	80.036	80.227
19	9.48	484.10	28	501.3	7.238	74.327	74.679
20	9.96	565.71	19	579.6	8.667	93.167	93.569
21	10.37	606.65	4	644.8	30.665	56.727	64.485
22	10.96	670.81	7	710.0	6.977	65.405	65.776

### 5.3 측정된 출력곡선의 불확도 비교

본 시험을 통해 측정된 출력곡선에 대해 A형, B형 및 합성 표준 불확도를 각각 정격 용량에 대한 상대 비율로 비교한 그림이 아래의 [그림 7], [그림 8] 및 [그림 9]과 같다.

A형 불확도의 경우에 절대적인 불확도는 작지만, 단지보정이 필요한 지역의 불확도가 단지보정이 필요하지 않은 시험자료에 비해 매우 크게 나타나고 있으며, 이러한 현상은 풍속과 출력이 증가하면서 더욱 크게 나타나고 있다.

B형 불확도도 거의 동일한 형태의 경향이 나타나고 있는데, 역시 풍속이 증가하면서 그 차이가 확연하게 나타나고 있다. 아울러, 단지 보정이 필요한 시험자료는 정격 부근에서

의 불확도도 매우 불안정한 경향을 보이고 있다. [그림 9]과 같이 A형 및 B형의 합성형 태인 합성 표준 불확도도 거의 동일한 형태를 보이고 있다. 역시 풍속과 출력이 증가하면서 정격출력에 대한 상대적인 불확도 비율도 급격하게 증가하고 있는데, 증가정도가 단지보정이 필요한 시험자료가 훨씬 급격하게 증가하고 있음을 보이고 있다.

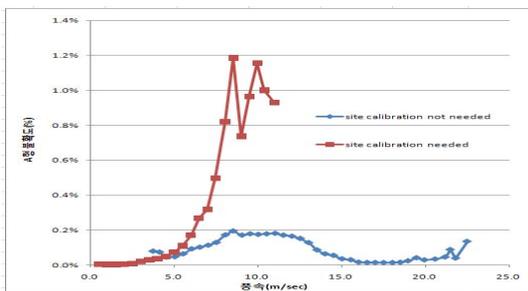


그림 7. A형 불확도의 상대비율 비교

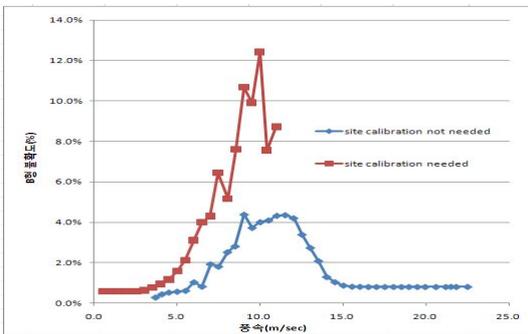


그림 8. B형 불확도의 상대비율 비교

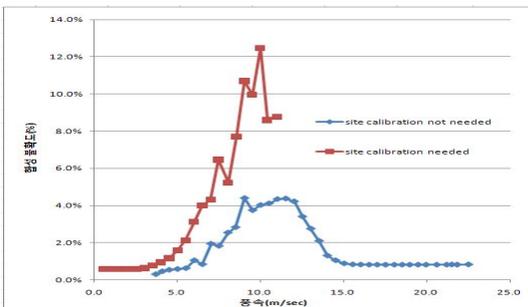


그림 9. 합성 표준 불확도의 상대비율 비교

## 6. 결 론

복잡지형과 단순 지형에서 이루어진 풍력 발전시스템 성능시험 결과를 비교한 결과, 단지보정이 이뤄지지 않은 복잡지형에서의 시험결과가 모든 불확도 성분에 크게 영향을 미치고 있으며, 불확도에 최대 약8%이상의 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한, 단순지형에서의 불확도는 정격 출력 부근에서 빠르게 작아지고 있으나, 복잡지형에서의 시험 결과는 불확도의 변동 폭이 매우 크며 불안정한 경향을 보이고 있다. 따라서, 단지 보정은 풍력발전시스템 성능시험에서 반드시 필요한 과정으로서 인식되어야 하며, 그 영향은 최대 8%정도의 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국남부발전(주)와 한국수력원자력(주)의 지원 하에 수행한 성능시험의 결과로서, 이에 감사드립니다.

## 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 - Part1 : Design Requirements, Aug. 2005.
4. MEASNET Power Performance Measurement Procedure, Version 3 Nov. 2000.
5. 한국수력원자력(주), “고리풍력 발전설비 성능시험 평가”, Dec. 2009.
6. 한국전력공사 전력연구원, “환경풍력 2단계 인수 성능 시험 결과 보고서”, Jun. 2010.