

## 단지교정을 위한 빈평균방법과 최소자승법의 비교

### Comparison of Bin Averaging Method and Least Square Method for Site Calibration

유 능 수\*    남 윤 수\*\*    이 정 완\*\*    이 명 재\*\*\*  
Yoo, Neung-Soo    Nam, Yun-Su    Lee, Jeong-Wan    Lee, Myeong-Jae

---

#### Abstract

Two methods, the bin averaging method and least square method, are often used in calibrating wind turbine test sites. The objective of this work was to determine a better method to predict the wind speed at wind turbine installing point. The calibration was done at the test site on a complex terrain located in Daegwallyeong, Korea. It was performed for two different cases based on the IEC 61400-12 power performance measurement standard. The wind speeds averaged for 10 minutes ranged between 4 m/s and 16 m/s. The wind-direction bins of each meteorological mast were 10 degrees apart, and only the bins having data measured for more than 24 hours were employed for the test site calibration. For both cases, the two methods were found to yield almost same results which estimated real wind speed very closely.

키워드 : 시험 사이트, 복잡 지형, 단지교정, 흐름 왜곡 보정계수, 풍향 빈  
Keywords : Test Site, Complex Terrain, Site Calibration,  
Flow Distortion Correction Factor, Wind Direction Bin

---

#### 1. 서론

풍력터빈(Wind Turbine : WT)의 출력성능을 정확하게 평가하기 위해서는 WT 허브(Hub) 높이에서의 풍속정보가 매우 중요하다. WT를 작동시키는 풍속을 알기 위한 가장 쉬운 방법은 풍황계 측타워(Meteorological Mast : MM)를 WT에 가까이 설치하는 것이다. 이것은 시험 사이트(Test Site)가 복잡 지형(Complex Terrain)일 경우, WT를 설치하기 전에 두 개의 MM를 세워 풍향-풍속

관계를 구하는 단지교정(Site Calibration)방법에 비해 비용과 시간의 절감을 가져다준다. 그러나 공기역학적으로 MM가 WT의 후류(Wake)에 있게 된다면 흐름의 왜곡(Flow Distortion)이 발생하게 되어 WT 위치의 풍속을 정확히 알지 못하게 된다 [1].

또한, 시험 사이트가 바람흐름에 영향을 주는 건물들이나 산과 같은 장애물(Obstacle)을 포함하고 있다면, MM에서 측정된 풍속과 풍력터빈에서 측정된 풍속이 서로 다르게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법이 단지교정(Site Calibration) 방법이다[2].

국제적인 기준 규격서인 IEC(International Electrotechnical Commission) 61400-12는 시험 사이트가 복잡지형일 경우, 반드시 단지교정 수행을 요구하고 있다.

---

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 부교수, 공학박사  
\*\*\* 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과 대학원 석사과정

## 2. 이론적 배경

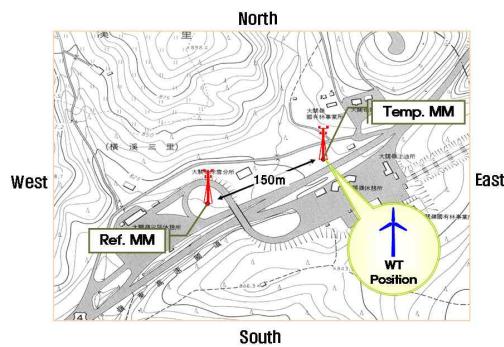
단지교정은 시험 사이트가 복잡지형일 경우, 지형적 요건으로 인한 바람의 흐름 왜곡을 풍속보정계수(Flow Distortion Correction Factor)로 나타내는 것이다[2][3].

IEC 61400-12에 따라, 단지 교정을 수행하기 위해서는 두 대의 MM가 요구된다. 시험 사이트에 반영구적으로 위치하여 풍향을 측정하기 위한 기준풍향계측타워(Reference Meteorological Mast : Ref. MM)와 WT 설치 위치에 단지교정을 위한 임시풍향계측타워(Temporary Meteorological Mast : Temp. MM)를 세워야 한다. Ref. MM의 위치선정은 주의해서 결정해야 한다. WT 뒤에서는 풍속의 왜곡이 있기 때문에 Ref. MM는 WT가 설치될 위치에 너무 가까이 있어서는 안 된다. 또한 풍력터빈과 너무 멀리 떨어져 있으면 풍속과 출력의 상관관계가 감소한다. 그러므로 이 두 MM는 WT 로터직경(D)의 2배에서 4배 사이의 거리에 있어야 한다. IEC 61400-12에서는 일반적으로 2.5D를 권장하였다[2]. 이 두 MM에서 측정된 풍향 데이터로부터 풍향-풍속 관계를 구하여, 이로부터 흐름왜곡보정계수 즉 풍속보정계수를 결정한다. 단지교정이 끝나면 Temp. MM를 제거하고 그 위치에 WT를 설치한 후, Ref. MM의 풍속 데이터를 보정하여 WT를 작동시키는 풍속으로 대체하게 된다.

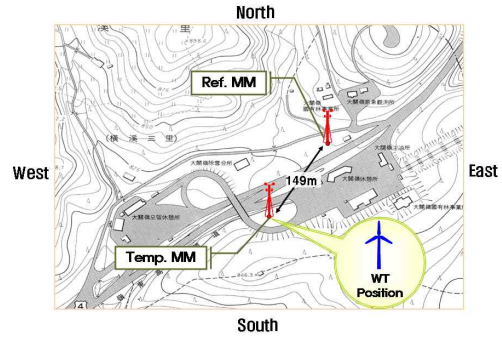
## 3. 단지교정 방법

### 3.1 단지교정 대상

이 연구를 위해 두 경우에 대한 단지교정을 수행하였다.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 1 Position of Two Meteorological Masts and Wind Turbine in Test Site for Each Case

Fig. 1의 (a)는 2005년 9월경에 설치예정인 (주)효성에서 제작되는 750kW급 WT을 위한, (b)는 2002년 10월부터 운영한 Jeumont사의 750kW급 WT J-48에 대한 단지교정을 위한 실증단지내의 MM의 배치도이다. 두 MM의 데이터 수집 기간은 (a)경우는 2002년 12월부터 현재까지, (b)경우는 2002년 7월부터 10월까지이다.

이 논문에서 단지교정의 절차 및 데이터의 분석은 Fig. 1 (a)의 경우에 대하여만 기술하였고, (b)의 경우는 결과만 나타내었다.

### 3.2 시험사이트의 지형 평가

시험 사이트는 Fig. 2와 Table 1에 제시한 IEC 61400-12에서 요구하는 지형적 변화에 대한 조건들을 만족하면 단지교정이 요구되지 않는다. 여기서 L은 풍력터빈과 기준풍향계측타워 간의 거리이고 D는 풍력터빈의 로터 직경이다[2].

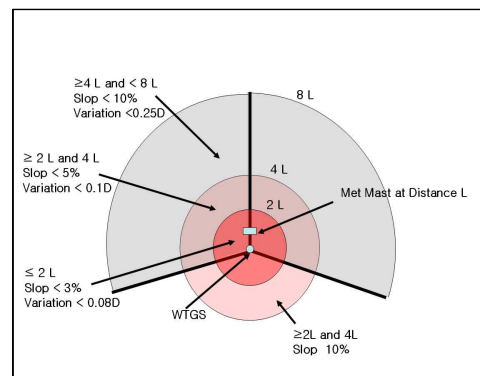


Fig. 2 Requirements to Topographical Variations

Table 1 Test Site Requirements  
: Topographical Variations

Distance	Sector	Max Slope (%)	Max Terrain Variation
< 2L	360°	< 3	< 0.08 D
2L~4L	Measurement Sector	< 5	< 0.15 D
2L~4L	Outside Measurement Sector	< 10	Not applicable
4L~8L	Measurement Sector	< 10	< 0.25 D

Fig. 1의 (a)와 같이 L이 150m인 경우 로터직경(D)이 50m인 풍력터빈이 설치된다면, 풍력터빈이 설치될 위치에서 2L내에는 지형변화량은 4m이하가 되어야 한다. 그러나 해발 833m인 풍력터빈의 위치는 북쪽으로 2L거리에 해발 890m, 서쪽으로 3L거리에 해발 870m, 남쪽으로 해발 850m의 산들이 위치하여 있고, 동쪽으로 2L거리부터 가파른 내리막 경사가 이어져 있다.

따라서 IEC 61400-12에서 요구하는 조건들을 만족하지 못하므로 대관령 시험 사이트는 복잡 지형(Complex Terrain)으로 평가된다. 그러므로 단지 교정을 수행하여야 한다.

### 3.3 시험사이트의 풍향 분석

Fig. 3은 대관령 시험 사이트에 설치된 Ref. MM의 높이 46m에서 2003년부터 2004년까지 측정된 월별 평균 풍속을 보여주고 있다. 2003년 5.6m/s, 2004년 6.5m/s의 연 평균 풍속을 보여주고 있다.

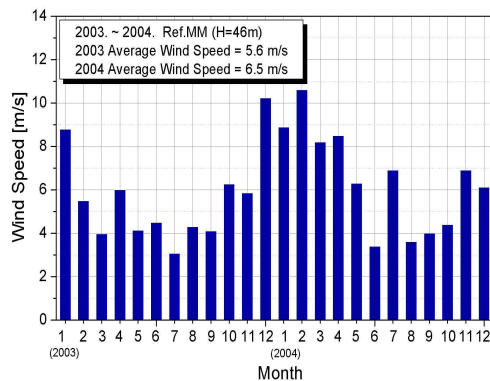


Fig. 3 Monthly Average Wind Speed at 46m  
(2003. 01. ~ 2004. 12.)

Fig. 4는 Ref. MM에서 측정된 풍향 자료를 바람장미(Wind Rose)형으로 그린 것이다. Fig. 4의 (a)는 각 풍향에서의 평균 풍속을 나타낸 것이고, (b)는 풍향의 빈도수를 백분율(%)로 나타낸 것이다. 약 70%의 서풍계열과 30%의 동풍계열을 보이고 있다. (c)는 각 풍향별 풍력에너지 밀도(Wind Power Density)를 나타낸다. Fig. 4로부터 대관령 시험 사이트는 주풍(Main Wind)이 서풍계열과 동풍계열이지만, 동풍계열의 풍속은 그다지 크지 않기 때문에 대부분의 에너지는 서풍계열일 때 생산되는 것을 알 수 있다[4].

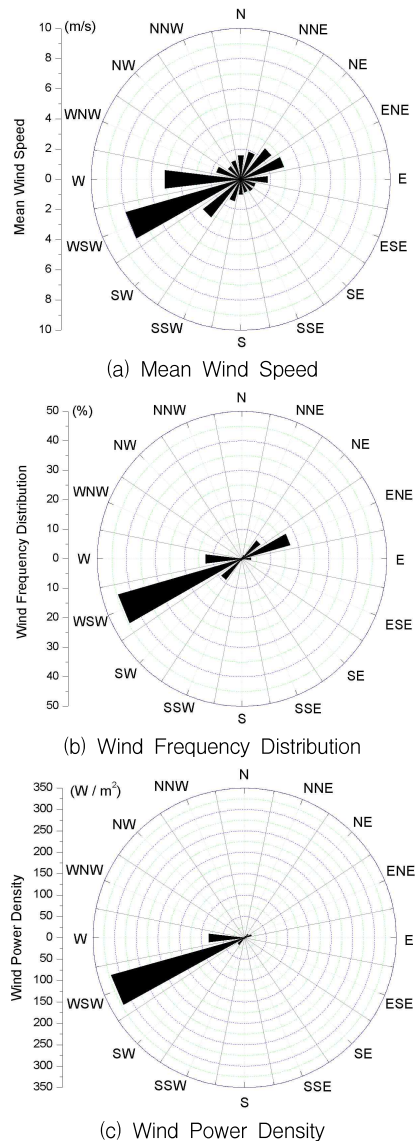


Fig. 4 Wind Rose (2003. 01. ~ 2004. 12.)

### 3.4 단지교정을 위한 데이터의 수집 및 선택

풍향 데이터를 측정하기 위해 사용된 장비는 주 풍속계로 NRG사의 Ice Free II Electrically Heated Anemometer를, 보조 풍속계로 NRG #40 Maximum Anemometer를 사용하였고, 주 풍향계로 NRG사의 IceFree II Electrically Heated Wind Direction Vane을, 보조 풍향계로 NRG #200P Wind Direction Vane을 사용하였다.

본 연구에서 풍향 데이터 수집 시스템으로 NRG사의 NRG Symphonie 데이터로거(Data Logger)를 사용하였다. NRG Symphonie의 채널당 샘플링율(Sampling Rate)은 1Hz이고, 데이터의 저장 평균간격(Averaging Interval)은 10분이다. 수집된 데이터는 10분간 평균, 표준편차, 최대값, 최소값 순으로 저장된다[5].

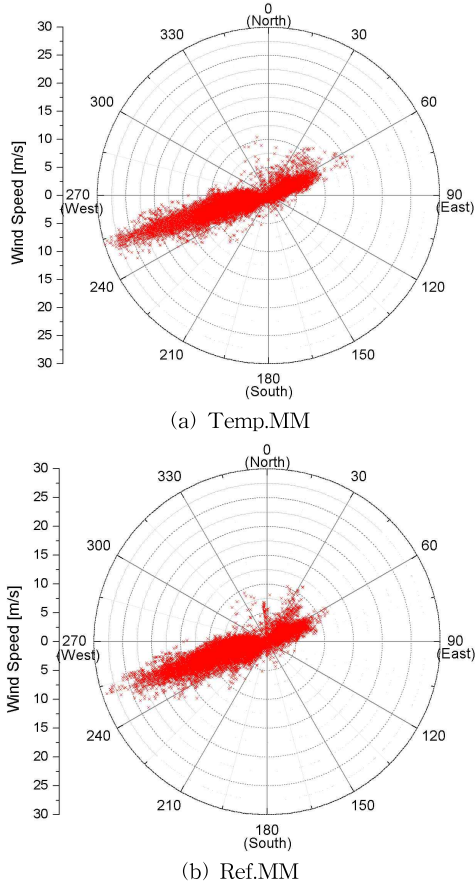


Fig. 5 Distribution of Wind Speed at Temp. MM & Ref. MM

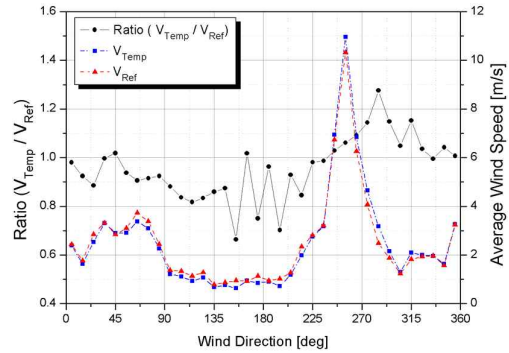


Fig. 6 Average Wind Speed at Two MM and Ratio of Average Wind Speeds

신뢰성 있는 단지교정의 결과를 얻기 위해, IEC 61400-12에서는 두 MM의 센서와 장비의 고장 또는 결빙(Icing), 폭우등이 발생하였을 때 수집된 데이터는 제외할 것을 요구한다[2]. 대관령 시험사이트의 높이 46m에서 두 MM에 동시에 측정된 5261시간(약 219일)의 데이터가 단지교정을 위해 사용되었다.

풍향은 적절한 빈(Bin)으로 나누어야 한다. IEC는 최소 30°의 빈으로 분류할 것을 요구하였다. 또한 각 빈마다 풍속 5~10m/s에서 24시간에 해당하는 데이터 수(144개의 10분 평균 데이터)를 만족할 것을 요구하였다[2]. 한편, Risø 국제 연구소(Risø National Laboratory)는 4~16m/s 풍속데이터만 사용하고, 10°씩 풍향 빈을 나누는 것을 제안하였다[1]. 실제로 IEC에서도 4~16m/s와 10°로 개정 준비 중이다. 본 연구에서는 이 부분은 Risø가 제안한 방식으로 데이터를 수집하였다. 전체 5261시간의 데이터 중 4~16m/s의 풍속 데이터는 2748시간(약 114일) 존재한다.

Fig. 5는 두 MM에서 측정된 풍속데이터를 풍향별로 나타낸 것이다. 풍속분포의 경향은 비슷하지만 서로 차이가 있음을 보여준다. 이것은 시험사이트가 복잡 지형이기 때문이다. Fig. 6은 두 MM에서 측정된 빈 평균풍속과 그 비(Ratio)를 나타내었다. 주풍인 40°~80°와 230°~280°만 고려할 때, 동풍과 서풍에서 풍속은 다른 양상을 보인다[6].

### 3.5 단지교정 방법

각각의 풍향 빈별 흐름 왜곡 보정계수를 결정하기 위한 첫 번째 방법은 빈 평균법(Bin Averaging Method)으로, 식 (1)처럼 두 대의 MM로부터 얻어진 각 풍향 빈에 속한 모든 풍속 데이터에 대하여 풍속의 평균값들을 구하고 그 비(Ratio)를 해당 풍

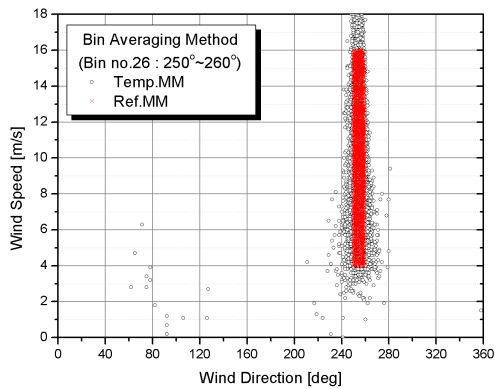
항 빈에 대한 흐름왜곡 보정계수( $K_{CF}$ )로 사용하는 것이다[1][7].

두 번째 방법은 각각의 풍향 빈에 대하여, Ref. MM와 Temp. MM에서 측정된 풍속 데이터 집합에 대한 선형관계를 구하는 것이다. 이를 위해 최소자승법(Least Square Method)이 사용되었고, 식 (2)로 표현된다[8][9].

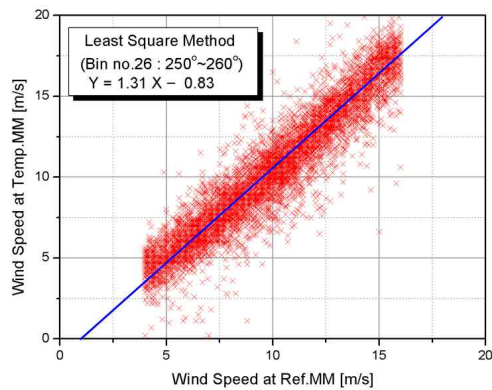
$$V_{WT} = K_{CF} V_{Ref} \quad (1)$$

$$V_{WT} = K_{CF} V_{Ref} + V_{WT} )_0 \quad (2)$$

- $V_{Ref}$  : Ref.MM 위치의 풍속
- $V_{WT}$  : WT 위치의 풍속
- $K_{CF}$  : 두 MM의 풍속 비
- $V_{WT} )_0$  : 절편 값



(a) Bin Averaging Method



(b) Least Square Method

Fig. 7 The Correlation of Wind Data measured at

two Meteorological Masts

Fig. 7은 250°~260°(Bin #26)의 풍향 빈에 대하여, 두 MM에서 측정된 풍속 데이터의 상관관계를 빈평균법과 최소자승법으로 나타낸 것이다[1][3][10].

### 3.6 단지교정 결과 I (경우 1)

Table 2에는 흐름왜곡 보정계수를 구하기 위해 사용된 4~16m/s에 해당하는 시간(Hour)으로 나타낸 풍속 데이터의 수와 식 (1)과 (2)를 사용하여 구한  $K_{CF}$ , 절편 값이 모든 풍향 빈에 대하여 나타나 있다. 여기서 10°씩 나눈 풍향빈들 중 24시간의 데이터를 포함하지 못한 풍향 빈은  $K_{CF}$ 를 구하지 않고 1로 두었다. 위의 Fig. 5에서 보듯이  $K_{CF}$ 를 구하지 않은 빈들은 빈도수가 매우 낮은 북풍과 남풍계열이며, 10분 평균 풍속도 낮은 것을 볼 수 있다. 따라서 두 보정방법을 비교하는데 있어서 의미가 없다.

Table 2 Flow Correction Factor

Bin No	Direction Range (deg)	$V_{avg}$ (m/s)		Bin-Avg $K_{CF}$	Least Square		4~16m/s Number of Data (hour)
		Temp .MM	Ref .MM		$K_{CF}$	$V_{WT} )_0$	
1	0~10	4.6	5.3	1	1	0	1.0
2	10~20	6.0	5.4	1	1	0	0.7
3	20~30	5.5	6.5	1	1	0	4.8
4	30~40	6.7	6.3	1	1	0	15.0
5	40~50	6.0	5.5	1.01	1.03	-0.03	24.3
6	50~60	4.9	4.9	1.01	1.24	-1.18	71.5
7	60~70	5.1	5.3	0.96	1.26	-1.60	244.0
8	70~80	5.2	5.2	0.99	1.21	-1.15	84.5
9	80~90	5.3	5.2	1	1	0	7.8
10	90~100	3.7	4.4	1	1	0	0.7
11	100~110	1.5	5.0	1	1	0	0.2
12	110~120	6.2	4.0	1	1	0	0.2
13	120~130	0.0	0.0	1	1	0	0
14	130~140	0.0	0.0	1	1	0	0
15	140~150	0.0	0.0	1	1	0	0
16	150~160	0.0	0.0	1	1	0	0
17	160~170	0.8	4.5	1	1	0	0.2
18	170~180	0.0	0.0	1	1	0	0
19	180~190	0.0	0.0	1	1	0	0
20	190~200	3.2	5.2	1	1	0	0.2
21	200~210	4.0	4.5	1	1	0	0.3
22	210~220	4.4	5.7	1	1	0	4.5
23	220~230	5.1	5.5	0.93	0.90	0.13	25.2
24	230~240	5.8	6.3	0.96	0.90	0.18	63.8
25	240~250	8.8	8.7	1.01	1.08	-0.61	353.2
26	250~260	10.3	9.8	1.05	1.13	-0.83	1314.7
27	260~270	7.8	7.2	1.08	1.10	-0.15	508.3
28	270~280	6.2	5.6	1.11	1.00	0.60	116.5
29	280~290	6.1	5.0	1	1	0	10.3
30	290~300	4.6	5.2	1	1	0	1.3

31	300~310	4.6	5.2	1	1	0	0.5
32	310~320	6.8	6.8	1	1	0	0.7
33	320~330	5.8	6.1	1	1	0	0.8
34	330~340	8.3	7.8	1	1	0	0.7
35	340~350	7.9	7.0	1	1	0	0.7
36	350~360	5.0	5.3	1	1	0	0.2

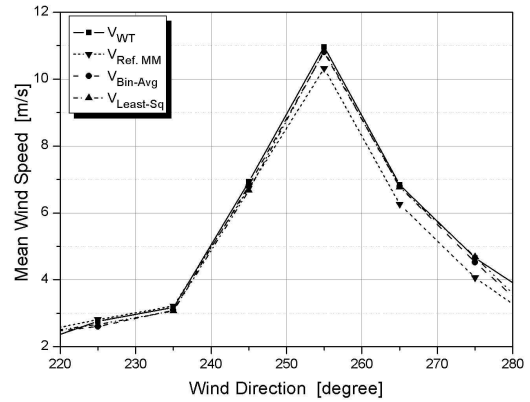
Table 3은 Table 2의 결과를 이용한 단지교정의 결과를 나타낸 것이다. 4~16m/s에 해당하는 풍속에 대하여 구한 풍속보정계수를 모든 풍속범위에 적용하여 얻어진 결과들(Bin-avg와 Least-Sq)과 실제풍속 즉 Temp. MM의 평균풍속을 각각 보여준다. 이로부터 두 방법에 의해 Ref. MM의 풍속 데이터로 얼마만큼 정확히 WT 위치의 풍속을 예측해 내었는가를 알 수 있다.

Table 3 Result of Site Calibration

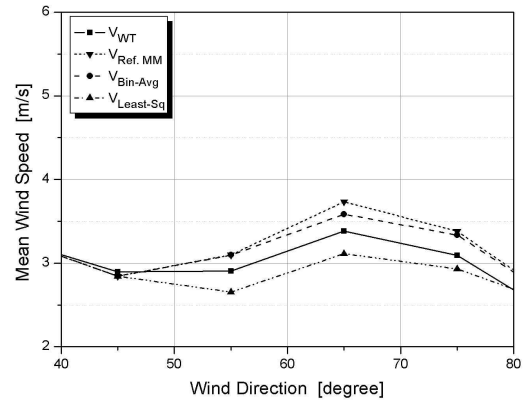
Bin No	Direction Range (deg)	V <sub>avg</sub> (m/s)			Number of Data (hour)
		Temp.MM	Bin-avg	Least-Sq	
1	0~10	2.39	2.44	2.44	6.3
2	10~20	1.63	1.77	1.77	10.5
3	20~30	2.53	2.86	2.86	19.5
4	30~40	3.31	3.32	3.32	47.5
5	40~50	2.90	2.84	2.84	97.2
6	50~60	2.91	3.10	2.65	293.0
7	60~70	3.38	3.58	3.11	589.2
8	70~80	3.09	3.34	2.93	259.0
9	80~90	2.26	2.45	2.45	58.0
10	90~100	1.22	1.38	1.38	25.8
11	100~110	1.12	1.34	1.34	16.0
12	110~120	0.93	1.14	1.14	6.0
13	120~130	1.07	1.29	1.29	4.7
14	130~140	0.68	0.79	0.79	7.0
15	140~150	0.76	0.87	0.87	5.7
16	150~160	0.63	0.95	0.95	3.2
17	160~170	0.94	0.92	0.92	7.0
18	170~180	0.85	1.14	1.14	5.0
19	180~190	0.91	0.95	0.95	4.7
20	190~200	0.72	1.03	1.03	5.0
21	200~210	1.19	1.27	1.27	7.8
22	210~220	1.99	2.35	2.35	25.3
23	220~230	2.76	2.61	2.67	102.0
24	230~240	3.17	3.09	3.07	272.3
25	240~250	6.94	6.82	6.68	626.7
26	250~260	10.96	10.81	10.85	1750.8
27	260~270	6.84	6.79	6.77	665.7
28	270~280	4.65	4.52	4.69	219.3
29	280~290	3.17	2.49	2.49	61.0
30	290~300	2.15	1.87	1.87	16.5
31	300~310	1.30	1.24	1.24	6.8
32	310~320	2.10	1.82	1.82	6.3
33	320~330	2.00	1.93	1.93	4.2
34	330~340	1.96	1.97	1.97	5.2
35	340~350	1.63	1.56	1.56	7.2
36	350~360	3.26	3.24	3.24	14.2

Fig. 8은 Table 3의 결과를 그림으로 나타낸 것으로, 풍속의 범위에 제한을 두지 않고 모든 풍속에 대하여 두 방법에 의해 보정된 Bin 평균풍속과 WT 위치의 Bin 평균풍속을 보여준다. 서풍계열에서는 두 방법으로 보정된 Bin 평균풍속이 WT 위치의 Bin 평균풍속과 거의 일치함을 볼 수 있다. 그러나 동풍계열에서는 서풍계열만큼 정확한 결과를 얻을 수 없었다. 이는 동풍계열의 경우 풍향 Bin 평균풍속이 주로 4m/s를 넘지 못하는 저풍속인데 이 경우 난류강도(Turbulence Intensity)가 크기 때문으로 분석된다. Fig. 9에서 풍속별 난류강도와 풍향별 난류강도를 볼 수 있다[11].

이 결과들로부터 두 방법 중 어느 방법이 더 낫다고 판단할 수 없으나 Bin평균방법과 최소자승법 모두 실제 풍속 값을 잘 예측한다는 것을 알 수 있다.



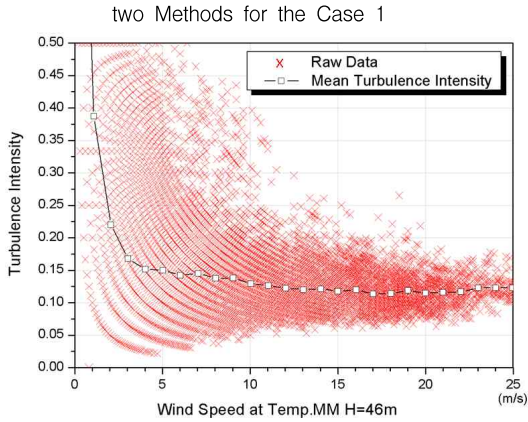
(a) West Wind



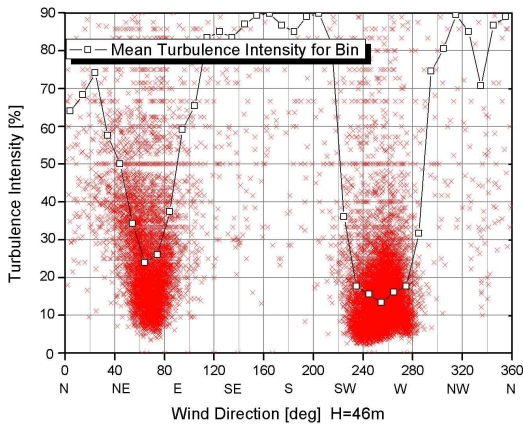
(b) East Wind

Fig. 8 Average Wind Speed at WT position and Average Corrected Wind Speed by





(a) Wind Speed - Turbulence Intensity

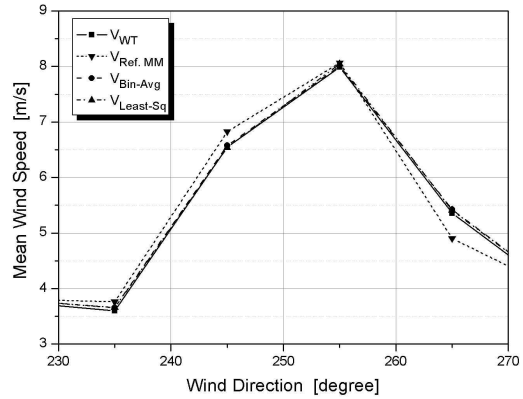


(b) Wind Direction - Turbulence Intensity

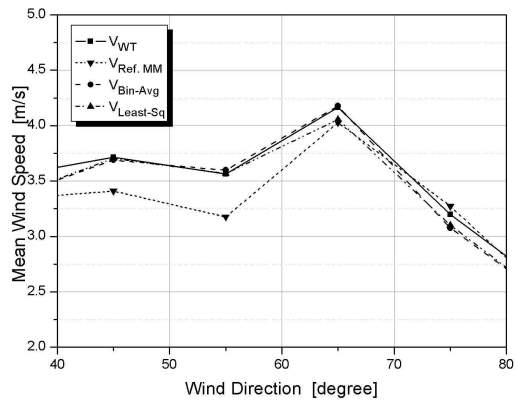
Fig. 9 Turbulence Intensity

### 3.7 단지교정의 결과 II (경우 2)

Fig. 10은 Fig. 1의 (b) 경우를 단지교정 대상으로 했을 때의 결과이다. 위 절 들과 같은 과정과 방법으로 단지교정을 수행하였다. 이 경우의 단지교정에서도 빈평균법과 최소자승법 모두 실제풍속을 잘 예측하고 있어 두 방법 중 어느 방법이 더 정확한 방법이라 단언할 수 없다. 이경우도 역시 서풍계열의 경우가 동풍계열보다 단지교정의 효과가 좋았다.



(a) West Wind



(b) East Wind

Fig. 10 Average Wind Speed at WT position and Average Corrected Wind Speed by two Methods for the Case 2

## 4. 결론

대관령 시험 사이트는 주위에 산으로 둘러싸여 있다. IEC 61400-12에 따라 지형평가를 하였으며, 복잡 지형(Complex Terrain)으로 판별되었다. 따라서 단지교정을 수행하였다. 또한 측정된 데이터를 분석한 결과 지형에 의한 흐름의 왜곡이 존재함을 알 수 있었다.

본 논문에서 두 가지 대상에 대한 단지교정을 한 결과를 나타내었다. 각각 약 7개월과 약 3개월 분량의 풍향 데이터를 두 MM에서 동시에 수집하였으며, 자체적으로 MATLAB을 사용하여 분석 프로그램을 작성하였다.

단지교정을 위해 빈평균법과 최소자승법을 제시하였고, 두 방법에 대한 단지교정 결과를 비교하였다. 두 방법 모두 Ref. MM의 풍속을 보정하여, WT 위치의 풍속을 매우 정확히 예측하였다. 이것

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제25권 B호, 2005.

유 능 수, 남 윤 수, 이 정 완, 이 명 재

으로 단지보정의 효과를 확인할 수 있었다. 또한 두 방법은 모두 우수한 것으로 우열을 가릴 수 없었다.

[11] Kurt S. Hansen, Gunner Chr. Larsen & Mike Courtneyk "DATABASE ON WIND CHARACTERISTICS", pp. 1-2., 2001.

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단의 실용화평가사업 과제로 수행된 결과물의 일환이므로 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Roskilde, Risø National Laboratory, "Task 1: Measurement Method to Verify Wind Turbine Performance Characteristics", *European Wind Turbine Testing Procedure Developments*, 2001.
- [2] IEC, "Wind Turbine Generator Systems. Part 12 : Wind Turbine Power Performance Testing", *IEC 61400-12*, 1st Ed., 1998.
- [3] Yoonsu Nam, Neungsoo Yoo, Jungwon Lee, "Site Calibration for the Wind Turbine Performance Evaluation," *JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY*, Vol. 22A, pp.49-57, 2002.
- [4] AWS Scientific, Inc., "Wind Resource Assessment Handbook", pp.6-6., 1997.
- [5] NRG Systems, Inc., "Symphonie Data Logger and Accessories : User Manual", 1996.
- [6] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, "Wind Energy Explained : Theory, Design and Application" pp. 49, 2002.
- [7] Antoniou, I., Mouzakis, F., Albers, A., Follrichs, U., "Identification of Variables for site calibration and Power Curve Assessment in Complex Terrain (Project JOR3-CT98-0257)," *2001 European Wind Energy Conference*, pp. 17-22, 2001.
- [8] Ferreira, M., Rodrigues, A., Ribeiro, L., "Evaluation of the Influence of the Installation of a Wind Turbine over the Results of a Nearby Measuring Station", *1999 European Wind Energy Conference*, pp. 1185-1188, 1999.
- [9] Curvers, A., "Site Calibration at the ECN Test Site", *1999 European Wind Energy Conference*, pp. 638-640, 1999.
- [10] "Power Performance Measurement Procedure," *Measnet, Version3*, pp. 5-6., 2000.