

碩士學位論文

풍력발전시스템 출력성능 평가  
및 불확실성 평가에 관한 연구

The background features a large, faint watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, containing a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written around the top half of the circle, and '제주대학교' is written around the bottom half. In the center of the logo, there is a smaller emblem with the text 'JEJU 1952'.

濟州大學校 大學院

機械工學科

金俊澈

2009年 2月

# 풍력발전시스템 성능평가 및 불확실성 평가에 관한 연구

指導教授 林 鍾 桓

金 俊 澈

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

金 俊 澈의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2009年 2月

A Study of Power Performance and Uncertainty  
Evaluation of a Wind Turbine Generator System

Junchul Kim

(Supervised by professor JongHwan Lim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Engineering

Department of Mechatronics Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 2.

# 목 차

List of Figures .....	vi
List of Tables .....	vii
Nomenclature .....	viii
Summary .....	xii
1. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구동향 및 연구목적 .....	3
2. 이론적 배경 .....	5
2.1 출력성능 평가 .....	5
2.2 불확실성 평가 .....	10
3. 패키지 개발과 적용 .....	21
3.1 패키지 개발 .....	21
3.2 패키지 적용 .....	22
3.3 측정 및 데이터 처리 .....	25
3.4 성능평가결과 .....	32
3.5 불확실성평가결과 .....	38
4. 결 론 .....	51
5. 참고문헌 .....	53

# List of Figures

Fig. 1 Comparison of Unit Cost of Electricity Generation .....	1
Fig. 2 Graphical illustration of evaluating the standard uncertainty of input quantity from priori distribution .....	16
Fig. 3 Form of Program .....	21
Fig. 4 Process of Package program .....	22
Fig. 5 Configuration of System .....	22
Fig. 6 NEG-MICON 750W .....	23
Fig. 7 Power Curve, $C_e$ and $C_t$ curve .....	23
Fig. 9 Wind Turbines Position in Hangwon Wind Farm .....	24
Fig. 8 Local of Hangwon Wind Farm .....	24
Fig. 10 Meterological Mast(50m) .....	25
Fig. 11 Real Time Monitoring System .....	26
Fig. 12 Transmitter/receiver in Turbine and Exterior toward Antenna .....	27
Fig. 13 RS442-RS232 and Serial-Ethernet Transducer .....	27
Fig. 14 AP(Access Point)and Exterior toward Antenna .....	28
Fig. 15 Circumference of Obstacles nearby turbine .....	28
Fig. 16 Reduced Wind Speed Inside Wind Farm and Direction .....	29
Fig. 17 Measured direction sector .....	30
Fig. 18 Data of Effective Wind Direction .....	30
Fig. 19 Example of Data set .....	31
Fig. 20 Scatter Plot Power Output Before Normalization( $1.281\text{kg/m}^3$ ) .....	32
Fig. 21 Scatter Plot Power Output Normalization( $1.281\text{ kg/m}^3$ ) .....	32
Fig. 22 Scatter Plot Average power ( $1.281$ ) .....	33
Fig. 23 Measured Power Curve .....	33
Fig. 24 Measured Power and Origin Power Curve .....	34
Fig. 25 Comparing Power Coefficient .....	36
Fig. 26 Annual Energy Production .....	36
Fig. 27 Composition Standard Uncertainty .....	45
Fig. 28 Power Curve with Standard Uncertainty .....	45
Fig. 29 Origin Power Curve and that with Standard Uncertainty Power Curve .....	46
Fig. 30 Raw Power Data, Origin Power and Uncertainty Power Curve .....	46
Fig. 31 Standard Deviation of Wind Speed .....	47
Fig. 32 Maximum, Minimum, and Mean Power Curve .....	47
Fig. 33 Comparison of Power curves .....	48
Fig. 34 Comparison of Power Coefficient curve .....	49

# List of Tables

Table. 1 List of Standard of Wind Turbine system .....	4
Table. 2 Uncertainty Factors .....	11
Table. 3 Roughness Class .....	21
Table. 4 Distance and Direction from Obstacles .....	29
Table. 5 Topographical Deviation Regulation in Test Site (IEC 61400-12) .....	31
Table. 6 Information of Data set .....	31
Table. 7 Bin Power Output Mean (1.281 kg/m <sup>3</sup> ) .....	35
Table. 8 Annual Energy Production .....	37
Table. 9 List of type A and B Uncertainty .....	38
Table. 10 Supposition Value of Uncertainty Factors .....	43
Table. 11 Factors of Uncertainty Values (Reference Density :1.281 ) .....	44
Table. 12 Information of Data set .....	49



## Nomenclature

A	회전자 면적	[m <sup>2</sup> ]
AEP	연간 에너지 생산량	[Wh]
B	기압	[Pa]
B <sub>10min</sub>	10분 평균 공기압	[Pa]
C <sub>P,I</sub>	i번째 빈의 출력계수	
c	민감계수	
C <sub>B,i</sub>	i번째 빈의 공기압 민감계수	[W/Pa]
C <sub>k,i</sub>	i번째 빈의 요소 k의 민감계수	
C <sub>m,i</sub>	i번째 빈의 공기밀도 보정 민감계수	[Wm <sup>3</sup> /kg]
C <sub>T,i</sub>	i번째 빈의 공기온도 민감계수	[W/K]
C <sub>V,i</sub>	i번째 빈의 풍속 민감계수	[Ws/m]
D	회전자 직경	[m]
D <sub>e</sub>	등가 회전자 직경	[m]
D <sub>n</sub>	인접 풍력발전기 회전자 직경	[m]
d	기상탑 직경	[m]
F(V)	풍속에 대한 Rayleigh 확률분포함수	
f <sub>i</sub>	일정 풍속구간에서 해당 풍속의 상대적 발생빈도	
H	허브 높이	[m]
h	장애물 높이	[m]
k	분류 등급	
k <sub>b</sub>	장애 보정 계수	
k <sub>c</sub>	풍동 보정 계수	
k <sub>f</sub>	다른 풍동에 대한 풍동 교정계수 (불확도 평가에만 적용)	
k <sub>r</sub>	밀도에 대한 습도 보정계수	
K <sub>B,t</sub>	기압계	
K <sub>B,s</sub>	기압계 보상이득	
K <sub>B,d</sub>	기압계 표본	
K <sub>T,t</sub>	온도 트랜스듀서	
K <sub>T,s</sub>	온도 트랜스듀서 보상이득	
K <sub>T,d</sub>	온도 트랜스듀서 표본	

$K_{p,t}$	압력 트랜스듀서 민감도	
$K_{p,s}$	압력 트랜스듀서 보상이득	
$K_{p,d}$	압력 트랜스듀서 표본 전환	
$L$	기상탑과 풍력발전기 이격거리	[m]
$L_e$	기상탑 또는 풍력발전기와 장애물 이격거리	[m]
$L_n$	기상탑 또는 풍력발전기와 인접 풍력발전기 거리	[m]
$I_h$	장애물 높이	[m]
$I_w$	장애물 폭	[m]
$M$	각 빈의 불확도 요소의 수	
$M_A$	A형 불확도 요소의 계수	
$K_{B,t}$	기압계	
$K_{B,s}$	기압계 보상이득	
$K_{B,d}$	기압계 표본	
$K_{T,t}$	온도 트랜스듀서	
$K_{T,s}$	온도 트랜스듀서 보상이득	
$K_{T,d}$	온도 트랜스듀서 표본	
$K_{p,t}$	압력 트랜스듀서 민감도	
$K_{p,s}$	압력 트랜스듀서 보상이득	
$K_{p,d}$	압력 트랜스듀서 표본 전환	
$L$	기상탑 다리간 간격	[m]
$L$	기상탑과 풍력발전기 이격거리	[m]
$L_e$	기상탑 또는 풍력발전기와 장애물 이격거리	[m]
$L_n$	기상탑 또는 풍력발전기와 인접 풍력발전기 거리	[m]
$M$	각 빈의 불확도 요소의 수	
$M_B$	B형 불확도 요소의 수	
$N$	빈의 갯수	
$N_h$	1년간 시간 $\approx 8760$	[h]
$N_i$	i번째 풍속 빈에서 10분 평균 데이터 모음의 수	
$N_j$	j번째 풍향 빈에서 10분 평균 데이터 모음의 수	
$n$	본 획득 간격간 획득 표본의 수	
$n$	속도 프로파일 지수 ( $n=0.14$ )	
$P_o$	장애물의 장애도 (0: 교체, 1: 비장애물)	

$P_i$	i번째 빈의 평균 출력	[W]
$P_n$	출력	[W]
$P_{n,i,j}$	i번째 빈의 j 데이터 모음의 출력	[W]
$P_{10min}$	10분 평균 측정 출력	[W]
$P_W$	증기압	[Pa]
$R$	기상탑 중심까지의 거리	[m]
$r$	상관관계 계수	
$s$	A형 불확도 요소	
$s_A$	풍동 풍속의 시계열 A형 표준불확도	
$s_{k,i}$	i번째 빈의 k요소에 대한 A형 표준불확도	
$s_i$	i번째 빈의 복합 A형 표준불확도	
$s_{P,i}$	i번째 빈의 출력에 대한 A형 표준불확도	[W]
$s_{W,i}$	i번째 빈의 기상변화에 대한 A형 표준불확도	
$s_{a,j}$	i번째 빈의 풍속비에 대한 A형 표준불확도	
$T$	절대온도	[K]
$T_{10min}$	10분 평균 측정 공기온도	[K]
$t$	시간	[s]
$U$	풍속	[m/s]
$U_h$	높이 h인 장애물에서의 자유 풍속	[m/s]
$U_i$	i번째 빈의 풍속	
[m/s]		
$u$	B형 불확도	
$u_{AEP}$	AEP의 표준 불확도	[Wh]
$u_{B,i}$	i번째 빈의 공기압 B형 표준 불확도	[Pa]
$u_{c,i}$	i번째 빈의 출력 표준 불확도	[W]
$u_i$	i번째 빈의 B형 표준 불확도	
$u_{index}$	지수의 B형 표준 불확도	
$u_{k,i}$	i번째 빈의 출력 표준 불확도	[W]
$u_{m,i}$	i번째 빈의 공기밀도 보정 B형 표준불확도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$u_{P,i}$	i번째 빈의 출력 B형 표준 불확도	[W]
$u_{V,i}$	i번째 빈의 풍속 B형 표준 불확도	[m/s]
$u_{T,i}$	i번째 빈의 공기온도 B형 표준 불확도	[K]

$u_{a,lj}$	i번째 빈의 풍속과 j번째 빈 풍향에 대한 평가현장 보정의 표준 불확도	[m/s]
$V$	풍속	[m/s]
$V_{ave}$	허브 높이에서의 연간 평균 풍속	[m/s]
$V_i$	i번째 빈에서의 평균 풍속	[m/s]
$V_n$	표준 풍속	[m/s]
$V_{n,lj}$	i번째 빈의 데이터 모음 j의 표준 풍속	[m/s]
$V_{10min}$	10분 평균 측정 풍속	[m/s]
—	평균 공기 유동속도	[m/s]
$X_{10min}$	10분 평균 요소	
$x$	기상탑 도는 풍력발전기에 대한 장애물 이격거리	[m]
$z$	지표 높이	[m]
$z_0$	표면 거칠기 높이	[m]
$\alpha$	왜곡 방위각	[°]
$\alpha_j$	j번째 빈에서 풍행 대 풍속 비	
$\Delta_z$	장애물에 의한 풍속 차	[m/s]
$e_{max,i}$	i번째 빈에서 최대 풍속 편차	[m/s]
$K$	von Karman 상수 0.4	
$r$	상관관계 계수	
$\rho$	공기밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	표준 공기밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{10min}$	10분 평균 공기밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$SP_i$	i번째 빈의 표준 출력의 표준편차	[W]
$S_{10min}$	10분 평균값에 대한 표준편차	
$S_u/S_v/S_w$	세 방향 풍속 속도성분의 표준편차	

# Summary

Nowadays, worldwide concern for the environment and the energy depletion problem is increasing, so that many countries are developing the wind turbine system for clean energy production. In our country, the jeju local government installed a wind farm at Hangwon, which has fifteen wind turbines. From operation data for these wind turbines this thesis analyzed the characteristics performance, and uncertainty. The study have 3 steps. The first step is getting data from the wind turbines. The second step is the development of evaluation package that can evaluate wind turbine output and wind data. We can predict annual energy production by using the package. The predicted results are compared with real data derived from actual wind turbines. As a result, in order to produce more electric power, new wind turbines should be located along the coastal line that has a comparatively high wind energy density. The third step is the evaluation of uncertainty that might be involved in the measurements and evaluation process. There are two types of uncertainties: category A of which the magnitude can be deduced from measurements, and category B, which can be estimated by other means. In both categories, uncertainties are expressed as standard deviations ,which is called standard uncertainties. Uncertainties in the measurements can be evaluated by means of sensitivity factors. All the results can be useful for optimal design of future farms in Korea and can be helpful for the improvement of domestic wind turbine technology.

# 1. 서 론

## 1.1 연구배경

현재 우리나라의 발전구조는 석유 및 석탄을 이용한 화력발전이 주를 이루고 있으며, 우리나라의 에너지 해외 의존도는 96.7%로 대부분 에너지를 수입에 의존하고 있어 경제적인 부담은 물론 에너지 전략에서도 취약성을 안고 있는 실정이다. 이런 측면에서 대체에너지에 대한 필요성이 요구되어 지고 있다. 신·재생에너지 중 풍력발전은 기술성숙도가 가장 높으며 Fig. 1 과 같이 발전 단가가 60~90원/kWh로 낮아 67원/kWh인 화력발전에 필적할만한 경제성을 가진다[1].

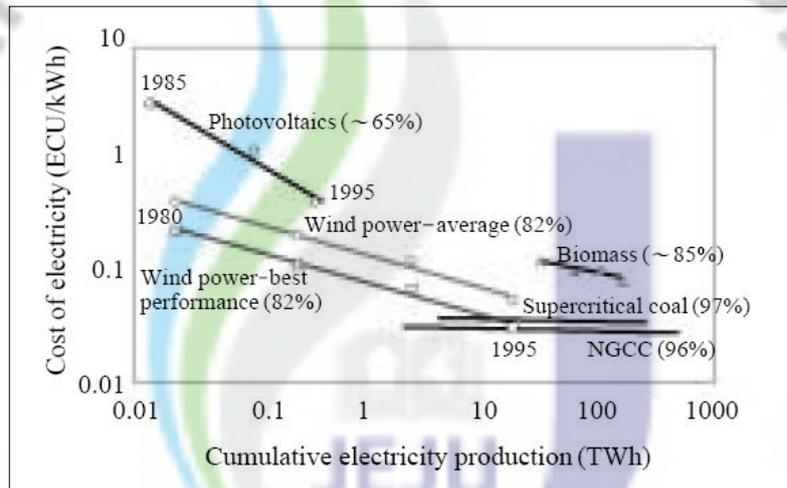


Fig. 1 Comparison of Unit Cost of Electricity Generation

유럽, 미국 등 많은 나라에서는 이미 풍력에너지의 개발·보급이 활성화 단계에 있으며, 유럽은 2020년까지 전체 발전량의 12%를 풍력발전으로 보급한다는 목표를 발표한 바 있다[2]. 이에 산업자원부에서 '제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획'을 확정하고, 풍력발전 사업단을 구성하여 기술개발 및 보급을 활성화함으로써 2020년에는 전체 발전량의 9.4%를 보급하려는 목표를 설정하고 있다. 한편 전 세계적인 풍력발전의 추세는 내륙 및 해안 풍력단지의 개발이 포화상태에 다다름에 따라 해상 풍력자원을 이용하는 방향으로 진행되고 있다[3]. 이런 이유로 제주도청은 1998년부터 구좌읍 행원리에 풍력발전단지를 운영하고 있으며, 한국남부발전은 2007년 12월경 한경면 용당리 일대에 국

내최대급 3.0MW의 풍력발전기 5기를 추가 설치하고 운영 중에 있다. 따라서 현재 제주도에는 약 34MW의 풍력발전기가 설치되어 운영되고 있다. 하지만 모든 기종이 해외에서 수입한 수입 기종이다 보니 풍력발전기 단가가 매우 비싸고 설치 후 유지보수에도 상당한 비용이 요구되고 있어 국내 풍력시장이 아직은 활발하지 못하다. 만약 우리나라 기업이 풍력발전기를 제작한다면 발전단가가 더 낮아지기 때문에 풍력시장이 더 활발해질 것이다. 우리나라 기업의 기술력이나 기술 인프라는 충분히 풍력발전기를 개발 할 수 있는 잠재력을 가지고 있으나 아직 개발 중에 있거나 중형풍력발전기를 아웃소싱 하는 단계에 지나지 않고 있다. 하지만 현재 많은 회사들이 풍력산업에 뛰어들고 있어 몇 년 후면 국내 기종으로 풍력단지를 조성할 날이 멀지 않을 것으로 예상된다. 하지만 그러기에 앞서서 국내 제품들이 생산되기 위해서는 무엇보다 발전기 성능을 평가하고 하는 일이 가장 우선 되어야 한다. 현재는 발전기 성능을 평가하고 인증 받는 일 역시 해외에 의존해야 하는 실정이다. 출력성능 평가 관한 연구는 새로운 기종에 대한 성능 평가뿐만 아니라 기존에 운전 중인 발전기에 대한 성능을 평가함으로써 새로운 발전기 기종에 대한 디자인에 도움을 주고 더 나가서는 단지 설계에도 이용 될 수 있는 중요한 부분이다. 따라서 성능평가에 관한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

## 1.2 연구동향 및 연구목적

우리나라는 많은 복합지형을 안고 있음에도 풍력 발전기 도입 초기부터 지금 까지 계속 유럽 기종을 채택해 도입하고 있다. 이것은 유럽이 풍력산업을 리드하고 있기 때문에 유럽 지형에 맞는 풍력발전기를 도입 할 수밖에 없었다. 초기 풍력발전기들은 유럽지형에 맞게 디자인 되어 있기 때문에 한국 지형에 적합한지에 대한 연구가 필요하고 그 시작이 도입 초기에 들어온 풍력발전기에 대한 성능 평가라 하겠다. 현재 점점 아시아 시장이 커짐에 따라 덴마크, 네덜란드, 독일 등의 평탄지형만 고려하는 디자인에서 이제는 그리스, 이태리, 스페인, 아시아 등의 복잡지형지도 고려해 발전기를 제작하고 있고 복잡지형에 맞는 풍력발전기를 제작해 성능평가에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있기 때문에 성능평가에 관한 연구가 우리나라에서도 하루 빨리 활발히 이루어져야 한다[4]. 우리나라에서는 풍력발전기의 성능계측에 관한 모든 기술을 해외에 의존하고 있고 현재 몇몇 기관에서 인증기관 설립을 위해 노력하고 있긴 하지만 중대형 풍력발전기 인 경우 아직 연구가 미비한 실정이다.

풍력발전기는 바람에 따라 불안정 하게 발전하는 특성 때문에 풍력발전기의 성능을 파악하는 일은 매우 중요한 요소이며 접근방식 또한 각 나라마다 다르기 때문에 전 세계적으로 통일된 기준이 필요하다. 따라서 현재 표준규격·기술기준의 제정을 통해 국제 표준에 맞게 평가 되고 있다. 풍력발전기에 관련된 표준을 제정한 IEC(International Electrotechnical Commition : 국제전기표준회의, 가맹국64개국)와 ISO(International Organization for Standardization : 국제표준화기구, 가맹국 146개국) 같은 국제표준화기관에서 정한 표준화 목록을 살펴보면 Table. 1과 같다. 따라서 본 연구에서도 독자적인 시험평가기술의 적용보다는 국제적인 기준에 의거하여, 이미 국제 성능인증 기관 등에서 공포해 놓은 성능시험이나 측정분석 방법 등을 적용하여 모든 측정 장비의 설치, 측정방법 및 평가는 IEC 61400-12-1의 “Wind turbines - Part 12-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines”에 의거해 수행한다.

풍력발전기 평가 Package는 허브 높이에서 측정된 풍속과 전기출력을 바탕으로 풍력발전시스템의 출력성능곡선을 결정하고, 풍속와이블분포 표 와 출력곡선을 통해 연간에너지생산량(APE)을 결정한다. 출력곡선은 테스트 사이트에

서 다양한 조건 및 광범위한 범위의 풍속에 대하여 풍속과 출력을 동시에 측정함으로써 통계학적으로 충분한 의미가 있는 데이터로부터 평가한다. 또한 연간 에너지 생산량은 기준풍속분포가 100% 이용 가능하다는 가정 하에 출력곡선을 기준풍속분포에 적용하여 계산한다.

Table. 1 List of Standard of Wind Turbine system

분 야	규 격
안전요건(IS)	IEC 61400-1 제2판(1999) 제1부
소형 풍차의 안전성(IS)	IEC 61400-2 제1판(1996) 제2부
소음측정방법(IS)	IEC 61400-11 제2판(2002) 제11부
풍차의 성능계측 방법(IS)	IEC 61400-12 제1판(1998) 제12부
기계적 하중의 계측방법(TS)	IEC 61400-13 제1판(2001) 제13부
계통연계 풍차의 전력품질특성의 측정 및 평가(IS)	IEC 61400-21 제1판(2001) 제21부
풍차의 실제 날개구조 강도시험(TS)	IEC 61400-23 제1판(2001) 제23부
풍차의 낙뢰보호(TR)	IEC 61400-24 제1판(2002) 제24부

기존 풍력발전기 성능평가 연구들을 보면 대부분 불확실성 부분이 생략되어 있거나 실제 장기간 운전 중인 발전기가 아닌 프로토타입 발전기에 대한 것 또는 발전기에서 충분히 성능을 평가할 수 있는 데이터를 수집 하지 못해 외삽으로 성능을 예측하는 연구에 지나지 않았다. 하지만 본 연구에서는 장시간 발전기에서 나온 데이터를 가지고 성능을 측정하였고 출력성능평가 부분에서는 표준불확실성을 포함 시켜 좀 더 구체적인 성능평가를 구현 한다.

본 연구는 앞으로 우리나라 풍력산업발전에 도움이 될 수 있도록 우리나라 최초 발전 단지인 행원단지 내에 설치되어 장기간운전 중인 외국산 시스템에 대해 종합적인 성능평가를 수행한다. 또한 발전기 성능을 평가 할 수 있는 종합적인 패키지를 개발함으로써 추후 성능 평가가 필요한 다른 기종이나 다른 지역 등에서 손쉽게 사용 할 수 있게 하고 단지 내 여러 기종에 대한 종합적인 비교 또한 가능하게 할 수 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 출력성능 평가

출력성능평가는 측정 지역의 온도, 기압 등 환경 요인과 출력 값 등을 이용하여 성능을 분석하게 된다. 모든 데이터는 충분한 기간 동안 수집되어야 한다.

#### 2.1.1 공기밀도

바람은 공기의 흐름이다. 그러기 때문에 바람이 갖고 있는 에너지는 운동 에너지이다. 따라서 바람이 가지는 운동에너지 (1) 을 통해 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

여기서,

m : 질량

V : 속도

이다.

출력은 단위 시간당의 에너지로 정의되므로 운동에너지 식을 시간미분 합으로써 (2) 로 변환 할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 \quad (2)$$

면적 A를 통과하여 속도 V로 흐르는 공기유관을 고려하면 유관내의 기류의 단위시간당 질량유량은 체적과 공기밀도의 곱이기 때문에  $\rho AV$ 가 된다.

$$P = \frac{1}{2} (\rho AV) V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (3)$$

(3)은 바람의 출력해석에서 가장 중요한 식으로서 출력은 회전자 회전면적에 비례하고 풍속의 3제곱에 비례한다는 결과를 얻을 수 있다. 여기서 회전자의

면적으로 알고 풍속을 측정을 통해 알기 때문에 공기밀도를 구하면 되는데 공기 밀도는 기온과 기압으로부터 산출 할 수 있는데 그 식은 (4) 와 같다.

$$\rho_{10\min} = \frac{B_{10\min}}{R \cdot T_{10\min}} \quad (4)$$

여기서,

- $\rho_{10\min}$  : 10분 평균 공기 밀도
- $T_{10\min}$  : 10분 평균 공기의 절대온도 (K)
- $B_{10\min}$  : 10분 평균 기압
- R : 기체상수 (287.05 J/(kg K))

이다.

### 2.1.2 출력 값 보정

만약 출력성능평가를 하고자하는 풍력발전기가 실속제어(Stall-Control)방식에 해당하면 출력 데이터를 (5)로 표준화 시켜야한다. 출력 값 보정은 두 가지 밀도 값으로 보정하는데, 첫 번째 기준 밀도는 테스트사이트의 평균 밀도이며 두 번째는 기준밀도는 ISO 표준 대기 밀도에 따른 해수면 공기밀도  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 이다.

$$P_n = P_{10\min} \frac{\rho_0}{\rho_{10\min}} \quad (5)$$

여기서,

- $P_n$  : 표준화 출력 [kW]
- $\rho_0$  : 기준 공기 밀도  $1.225 [ \text{kg/m}^3 ]$
- $\rho_{10\min}$  : 10분 평균 밀도  $[ \text{kg/m}^3 ]$

이다.

### 2.1.3 풍속 값 보정

또 다른 보정으로 만약 출력성능평가 기종이 능동제어(Pitch-Control)방식의 풍력발전기를 평가 할 때 에는 풍속 값을 보정해야 한다. 풍속의 표준화는 다음(6)과 같다.

$$V_n = V_{10\min} \left( \frac{\rho_{10\min}}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

여기서,

$V_n$  : 풍속 표준화 [m/s]

$V_{10}$  : 10분 평균 풍속 [m/s]

$\rho_{10\min}$  : 10분 평균 공기 밀도 [ $kg/m^3$ ]

이다.

#### 2.1.4 데이터베이스 구축

데이터베이스 구축은 정규화 과정을 거친 선택된 데이터 세트를 빈(bin) 방법으로 처리하여 데이터베이스를 구축하고, 각 빈은 풍속이 0.5 m/s 차이로 구성되며 최소 30분 이상의 데이터(3개 이상의 10분 평균 데이터)로 구축된 데이터베이스의 풍속범위는 발전시작 풍속보다 낮은 1m/s부터 정격출력의 85% 출력을 발생시키는 풍속까지 측정해 신뢰성을 갖게 한다.

#### 2.1.5 실측출력곡선

정규화 된 데이터 세트에 대해 빈 방법으로 실측출력곡선을 결정한다. 이때 0.5 m/s 구간의 풍속 빈을 이용하였으며, 각 빈에 대한 정규화 평균 풍속과 정규화 평균 출력은 다음 식들과 같다.

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (7)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (8)$$

여기서,

$V_i$  : i 번째 빈의 정규화 평균 풍속

$V_{n,i,j}$  : i 번째 빈에 소속된 j 번째 데이터 세트의 정규화 평균 풍속

$P_i$  : i 번째 빈의 정규화 평균 출력

$P_{n,i,j}$  : i 번째 빈에 소속된 j 번째 데이터 세트의 정규화 평균 출력

$N_i$  : i 번째 빈에 소속된 10분 간격으로 전 처리된 데이터 세트 수

이다.

### 2.1.6 풍속의 시간과 빈도 분포

어떤 기간에 여러 크기의 풍속이 몇 번 나타나는가를 보여주는 것이 풍속의 도수분포이다. 지금까지 많은 연구가 행해져서, 포아송 분포, 피아송Ⅲ형 분포, 와이블 분포, 카이(레일리)분포, 야코부스의 분포식 오루송 분포식등이 제안되었지만, 이 중에서 풍속의 도수분포에 잘 맞고 가장 많이 사용되고 있는 것이 와이블(weibull)분포함수이다. 식은 (9) 와 같다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (k>0, V>0, c>0) \quad (9)$$

여기서,

k: 형상계수(shape parameter)

c: 척도계수(scale parameter)

이다.

### 2.1.7 연간에너지 생산량 (Annual Energy Production: AEP)

연간 에너지 생산량은 다양한 풍속 밀도 함수에 대하여 측정된 출력 곡선을 적용함으로서 구해지는데 이 때 기준 풍속분포는 레일리(Rayleigh) 분포를 사용한다. 레일리 분포는 형상계수가 2인 와이블(Weibull) 분포와 동일한 것이다. 식으로 보면 (10) 과 같다.

$$\begin{aligned} f(V) &= \frac{2}{c} \left(\frac{V}{c}\right) \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right] \\ F(V) &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (10)$$

척도계수 c를 감마 함수의 특성을 이용하면 (11)를 통해 구할 수 있다.

$$\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right)\right]^2 = \left[\frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right)\right]^2 = \left[\frac{1}{2} \sqrt{\pi}\right]^2 = \frac{\pi}{4} \quad (11)$$

이것을 이용하여 레일리 함수를 구하면 (12)와 같다.

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right) \quad (12)$$

여기서,

$F(V)$  : 풍속에 대한 Rayleigh 누적확률분포함수

$V_{avg}$  : 허브 높이에서의 연 평균 풍속

$V$  : 풍속

이다.

AEP는 레일리 함수를 이용하여 각 풍속에 대해 0.5m/s 구간으로 해서 다음 식으로 계산한다.

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (13)$$

여기서,

AEP : 연간에너지생산량

$N_h$  : 1년 총 시간 (=8760)

$N$  : 빈 수

$V_i$  :  $i$  빈의 정규화 된 평균 풍속

$P_i$  :  $i$  빈의 정규화 된 평균 출력

이다.

그리고 AEP는 IEC 규정에 따라 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11m/s 의 평균 풍속에 대하여 계산되고 측정-AEP와 외삽 AEP의 두 가지 방법으로 계산한다. 측정 AEP는 실측출력곡선으로부터 직접 계산하며, 이때 실측출력곡선의 풍속 범위를 벗어나는 모든 풍속에 대한 출력은 0으로 가정한다. 또한 외삽 AEP는 다음과 같은 가정 하에 실측출력곡선으로부터 평가한다.

- 실측출력곡선의 최저 풍속 이하인 모든 풍속에 대한 출력은 0.0kW
- 실측출력곡선의 최대 풍속부터 cut-out 풍속사이의 모든 풍속에 대한 출력은 실측출력곡선내의 최대 풍속에 해당하는 빈의 출력 값과 동일

### 2.1.8 출력계수

출력 계수는 자연 풍으로부터 풍력발전기가 추출 할 수 있는 출력을 말하며 다음과 같이 표현된다.

$$C_p = \frac{\text{풍차로 추출할 수 있는 출력}}{\text{자연풍이 보유한 출력}}$$

실제 측정된 출력 자료로부터 출력계수를 계산하려면 (14)를 통해 구할 수 있다.

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (14)$$

여기서,

$C_{P,i}$  : I 번째 빈의 출력계수

$V_i$  : I 번째 빈의 정규화 평균풍속

$P_i$  : I 번째 빈의 정규화 평균출력

$A$  : 풍차의 수평면적

$\rho_0$  : 기준 공기밀도

이다.

## 2.2 불확실성 평가

불확실성 평가는 실제 측정을 통해 측정된 값이 얼마나 실제 값에 근접한지 혹은 실제 값과 얼마 만큼에 차이를 두고 있는지를 평가하는 것이다. 불확실 범위는 오차 범위라고 할 수 있는데 이 불확실범위를 분석함으로써 좀 더 정확한 시스템에 특성을 파악할 수 있다.

### 2.2.1 불확실성 성분의 구분

일반적으로, 측정의 결과는 측정의 대상이 되는 특정한 양 즉, 측정량 (measured)에 대한 추정 값에 불과하다. 따라서 측정결과는 불확실성이 정량적으로 표시되어 있어야만 완전하다고 볼 수 있다. 측정 결과의 불확실성은 일반적으로 몇 개의 성분으로 구성되는데, 국제도량형위원회(CIPM)의 접근방식에 의하면 그 성분의 수치적인 값을 추정하기 위해서 사용되는 방법에 따라 다음과 같은 두 가지 타입으로 분류하고 있다.

A 형: 일련의 측정값이 통계적 방법으로 평가될 수 있는 불확실성 성분

B 형: 기타 방법으로 평가 되는 불확실성 성분

두 가지 형 모두 불확도가 표준편차로써 표현하게 되는데 ISO에서는 측정 결과의 불확실성에 영향을 미치는 개개의 성분을  $u_i$ 로 표현하고, 이를 표준불확실성이라고 정의 한다. 이 값은 측정량의 추정 표준편차를 의미한다.  $u_i$ 는 추정분산  $u_i^2$ 의양의 제곱근과 같다.

### A 형 평가

표준불확실성의 A형 평가는 데이터를 유효한 통계적 방법으로 처리하면 된다. 예를 들어 여러 독립된 관측 값의 평균의 표준편차를 계산한다거나 최소제곱법을 사용하여 곡선을 적합 시킨다거나 또는 우연효과를 도출하고 정량화하기 위해 분산분석을 실시하는 것 등이 해당된다.

### B 형 평가

표준불확실성의 B형 평가는 다음을 포함한 모든 관련 정보들을 사용하여 과학적인 판단을 함을 기본으로 한다.

- 과거의 측정 데이터
- 관련 재료와 기기의 거동 및 특성에 대한 경험이나 일반 지식
- 교정 및 기타 보고서에 수록된 데이터
- 핸드북으로부터 인용한 참고 자료의 불확실성

불확실성 성분에 대한 평가의 신뢰도는 사용될 수 있는 정보의 질에 좌우되기 때문에 측정량에 영향을 주는 모든 파라미터를 최대한 변화시켜 평가가 가능한 많은 관측 데이터에 의해 이루어질 수 있도록 한다. 타당한 경우에는 언제나 장기적으로 축적된 정량적 데이터를 토대로 만들어진 측정과정의 경험적 모델과 점검표준 및 관리도를 사용하여 불확실성성분을 신뢰성 있게 평가하여야 한다. 제한된 데이터에 근거한 A형 평가가 반드시 B형 평가보다 더 신뢰성이 있다고는 할 수는 없다.

## 2.2.2 불확실성 요소

Table. 2 는 불확도 평가에 반드시 포함되어야 하는 최소한의 불확도 요소들에 대한 표이다.

i 번째 bin의 출력에 관련된 결합 표준 불확실성( $u_{c,i}$ )의 가장 일반적인 표현은 다음 (15) 와 같이 나타낸다.

Table. 2 Uncertainty Factors

측정파라메타	불확실성 요소	불확실성 유형
전기출력	전류변환기	B
	전압변환기	B
	출력변환기 혹은 출력측정 장치	B
	데이터수집시스템(아래참조)	B
	전기출력변동성	A
풍속	풍속계보정	B
	작동특성	B
	설치영향	B
	데이터수집시스템	B
	지형에 따른 유동 변형	B
대기온도	온도센서	B
	복사차폐	B
	설치영향	B
	데이터수집시스템	B
대기압력	압력센서	B
	설치영향	B
	데이터수집시스템	B
데이터수집시스템	신호전달	B
	시스템의 정도	B
	신호처리	B

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M c_{k,i} u_{k,i} c_{l,i} u_{l,i} \rho_{k,l,i,j} \quad (15)$$

여기서,

$c_{k,i}$  : i번째 풍속구간의 요소 k의 민감계수

$u_{k,i}$  : i번째 풍속구간의 요소 k의 표준 불확도

M : 각 풍속구간의 불확도 요소의 수

$\rho_{k,l,i,j}$  : i번째 풍속구간의 불확도 요소 k와 j번째 풍속구간의 불확도 요소 l과의 상관계수

이다.

불확실성 요소는 각각의 측정 변수들에 대한 개별적 입력 양이며,  $u_{AEP}$ 에 대한 복합 표준불확도는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M f_i c_{k,i} u_{k,i} f_j c_{l,j} u_{l,j} \rho_{k,l,i,j} \quad (16)$$

여기서,

$f_i$  :  $V_{i-1}$ 과  $V_i$  풍속구간에서 상대적 발생빈도  $F(V_i) - F(V_{i-1})$

$F(V)$  : 풍속에 대한 Rayleigh 누적확률 분포함수

$N$  : 풍속구간의 수

$N_h$  : 연간 시간( $\approx 8,760$ 시간)

이다.

모든 상관계수  $r_{k,l,i,j}$  를 명확하게 도출하는 것은 매우 어려운 일이므로 단순화 작업이 필요하다. 따라서 위의 복합 불확도 관계식을 적용 가능한 정도로 단순화하기 위해서 몇 가지 가정을 통해 단순화 시킨다.

- 1) 불확도 요소들이 완전히 상관되었거나 비 상관관계이다.
- 2) 모든 A형 불확도 요소들은 상호간 비 상관관계이고 B형 불확도 요소들은 상호간에 상관이다.
- 3) A 및 B형 불확도 요소들은 독립적이다.

위의 가정을 통해  $i$ 번째 풍속구간의 출력 복합 불확도  $u_{c,i}$  을 구하면 (17)과 같다.

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + \sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2 = s_i^2 + u_i^2 \quad (17)$$

여기서,

$M_A$  : A형 불확도 요소의 수

$M_B$  : B형 불확도 요소의 수

$s_{k,i}$  :  $i$ 번째 풍속구간의  $k$ 요소에 대한 A형 표준불확도

$s_i$  :  $i$ 번째 풍속구간의 A형 복합 표준불확도

$u_i$  :  $i$ 번째 풍속구간의 B형 복합 표준불확도

이다.

$u_{c,i}^2$  는 풍속구간의 데이터군 수에 대한  $s_{p,i}$  의 종속성으로 인해 풍속구간 데이터 개수에 영향을 받는다.

위 가정은 (16)에 (17)을 대입해 (18)처럼 나타낼 수 있다. 이 식은  $u_{AEP}$ 의 복합 표준불확도를 의미한다.

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B} \left( \sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i} \right)^2 \quad (18)$$

위 식에서 두 번째 항의 의미는, 각각의 B형 불확도 요소들이 풍속구간들 사이에 완전한 상관관계가 있다는 가정을 적용함으로써 이에 해당하는 AEP 불확실성을 평가할 수 있다는 점이다. 실제 계산에 있어서, 유형 B의 불확실성 요소들을 각 빈 별로 개별적으로 결합시키기 이전에 빈 사이에 교차된 불확실성을 계산한다는 것은 쉽지 않다. 따라서 각 빈 사이의 교차된 유형 B의 결합 불확실성을 다음 식과 같이 각 빈 별로 유형 B의 불확실성 요소들을 먼저 결합시켜 (17)의  $u_i$  ( $\sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2 = u_i^2$ )를 먼저 구한 다음 각 빈에 대해  $f_i$ 을 곱하여 더한 것으로 근사화 하는 방법을 이용한다.

$$\sum_{k=1}^{M_B} \left( \sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i} \right)^2 \doteq \left( \sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2} \right)^2 = \left( \sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2 \quad (19)$$

(17)에서  $\sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 = s_i^2$  이라는 사실과 (19)의 관계 똑 같이 이용하면 (18)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + N_h^2 \left( \sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2 \quad (20)$$

이 식으로 계산된  $u_{AEP}$ 는 (18)로 계산한 값보다 항상 같거나 크다.

### 2.2.3 불확실성 적용

#### (1) 유형 A 불확실성

분석이 필요한 유일한 A형 불확도는 각각의 풍속구간에 포함된 측정 후 표준화된 전기출력자료뿐이다. 전기출력의 A형 불확도는 각각의 풍속구간에 포함된 표준 출력자료의 분포에 대한 표준편차는 (21)에 의해 구할 수 있다.

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2} \quad (21)$$

여기서,

$\sigma_{P,i}$  : 빈 i의 정규화 출력 표준편차

$N_i$  : 빈 i의 10분 평균 데이터 수

$P_i$  : 빈 i의 정규화 평균 출력

$P_{n,i,j}$  : 빈 i의 j번째 데이터 셋의 정규화 출력

이다.

해당 풍속구간에서 표준화된 평균 출력의 표준불확도는 (22)와 같다.

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}} \quad (22)$$

여기서,

$s_{P,i}$  : 빈 i의 출력에 대한 유형 A 표준 불확실성

$N_i$  : 빈 i의 10분 평균 데이터 셋 수

이다.

## (2) 유형 B 불확실성

B형 불확실성은 측정 장비, 데이터 수집 장치, 그리고 출력성능평가가 수행되는 사이트의 주변의 지형에 관계된다. 만약 불확실성이 불확실성 한계로 표현되거나 직접적인 불확실성이 아닌 잠재적이고 일정치 않은 적용범위 계수로 표현되는 경우에는 이들로부터 표준불확실성을 평가하거나 적당하게 표준 불확실성으로 변환해야 한다.

Fig. 2 를 보면 미지의 양이 정규분포를 따르는 것으로 하고 상한과 하한을 각각  $a_-$  와  $a_+$ 로 가정하여 그 양의 최량/최적 가정 값을  $(a_- + a_+)/2$  로 하고, 그 양의 참 값이  $a_-$ 와  $a_+$ 구간 내에 있을 확률을 50%로 하면  $u_j = 1.48a$  가 된다. 여기서  $a = (a_- + a_+)/2$  는 그 구간의 반 너비 이다. 만일, 미지의 양인 참 값이  $a_-$ 와  $a_+$ 구간 내에 있을 확률을 67%로 하면  $u_j \approx a$  가 된다. 여기서  $a = (a_- + a_+)/2$ 이다. 실제적인 적용에 있어서는 미지의 양이 항상  $a_-$  와  $a_+$  구간 내 있도록 하한  $a_-$  와 상한  $a_+$ 을 추정한다. 만일 이에 관한 정보가 없을 경우에는 미지의 양이 직사각형 확률분포를

따르는 것으로 하면 최적추정값은  $a=(a_- + a_+)/2$  이고  $u_j=a/\sqrt{3}$  이 된다. 여기서  $a=(a_- + a_+)/2$  이다. 만일 분포가 직사각형이 아니고 삼각형일 경우에는  $u_j=a/\sqrt{6}$  이 된다. 어떤 특별한 다른 정보가 없을 때는 직사각형 분포를 사용하여도 큰 무리가 없다. 그러나 미지 량의 값이 하한이나 상한 쪽 보다 중앙에 있을 확률이 더 많은 경우는 삼각형이 더 나은 모델이 된다. 따라서

i) 직사각형 확률분포로 가정하는 경우의 표준 불확실성은,

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

ii) 삼각형 확률분포로 가정하는 경우의 표준 불확실성은,

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{6}} \quad (24)$$

이 된다.

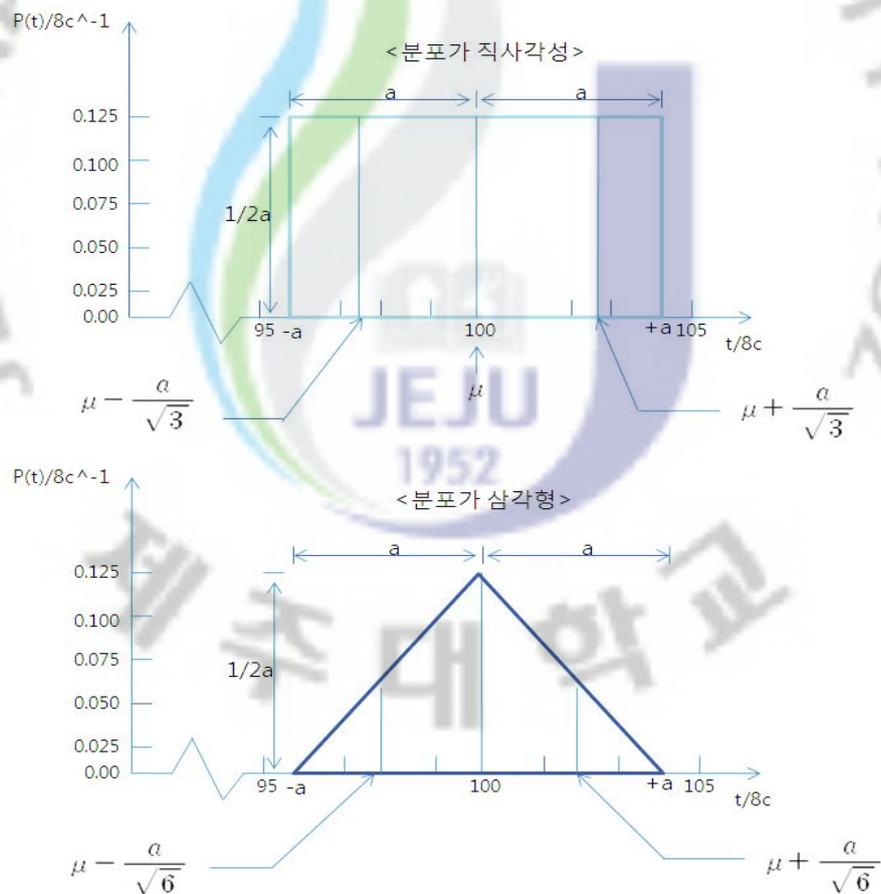


Fig. 2 Graphical illustration of evaluating the standard uncertainty of input quantity from priori distribution

- 데이터 처리 장치의 유형 B 불확실성

데이터 처리 장치에서는 신호전송과정, 신호조절과정, A/D 변환과정, 그리고 데이터 처리과정에서 불확실성이 발생할 수 있으며, 그 크기는 각 채널별로 서로 달라질 수 있다. 어떤 채널의 전체 측정 범위에 대한 표준 불확실성,  $u_{d,i}$ , 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d1,i}^2 + u_{d2,i}^2 + u_{d3,i}^2} \quad (25)$$

여기서,

$u_{d1,i}$  : 빈 i에서의 신호전달과 신호조절에 관련된 불확실성

$u_{d2,i}$  : 빈 i에서의 A/D 변환의 분해능과 같은 디지털화의 불확실성

$u_{d3,i}$  : 빈 i에서의 데이터 저장 방식, 처리 소프트웨어 등에 의해 발생하는 기타 불확실성

이다.

- 전기출력에서의 유형 B 불확실성

출력센서의 불확실성은 전류변환기 및 전압변환기, 그리고 출력변환기로부터 발생한다. 이와 같은 기기들은 등급이 정해져 있으며 그 불확실성은 일반적으로 등급에 따라 정해진다. 빈 i에서의 전기 출력에 대한 표준 불확실성,  $u_{p,i}$ , 는 출력변환기, 전류변환기, 전압변환기, 그리고 데이터 수집 장치의 표준 불확실성 등을 결합한 형태로 계산된다.

$$u_{p,i} = \sqrt{u_{p1,i}^2 + u_{p2,i}^2 + u_{p3,i}^2 + u_{pd,i}^2} \quad (26)$$

여기서,

$u_{p1,i}$  : 빈 i의 전류변환기 불확실성

$u_{p2,i}$  : 빈 i의 전압변환기 불확실성

$u_{p3,i}$  : 빈 i의 출력변환기 불확실성

$u_{pd,i}$  : 데이터 수집 장치에서 빈 i에 해당하는 채널의 불확실성

이다.

- 풍속측정에서 유형 B 불확실성

풍속측정에서의 불확실성은 여러 가지 요소들이 복합되어 나타나는데, 지형에 의한 유동변형, 풍속계 설치형태에 따른 영향, 그리고 풍속계 보정에 의한 불

확실성 등이 그 주요한 요인들이다.

빈  $i$ 에서 풍속에 의한 유형 B 불확실성  $u_{V,i}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + u_{V3,i}^2 + u_{V4,i}^2 + u_{dV,i}^2} \quad (27)$$

여기서,

$u_{V1,i}$  : 빈  $i$ 의 풍속계 보정(calibration) 불확실성

$u_{V2,i}$  : 빈  $i$ 의 풍속계 작동특성(calibration)에 기인한 불확실성

$u_{V3,i}$  : 빈  $i$ 의 풍속계의 설치영향(calibration)에 기인한 불확실성

$u_{V4,i}$  : 빈  $i$ 의 지형에 따른 풍속 변형(calibration)의 불확실성

$u_{dV,i}$  : 빈  $i$ 의 풍속측정용 데이터 수집 장치(calibration)의 불확실성

이다.

- 풍속측정에 대한 민감도 인자

풍속과 출력에 관한 함수에서 민감도 인자는 실측출력곡선에서의 각 빈 사이의 기울기로 결정되기 때문에 식으로 나타내면 (28)과 같다.

$$c_{V,i} = \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \quad (28)$$

- 공기밀도에 대한 유형 B 불확실성

밀도는 대기온도 와 공기압으로부터 계산되므로 온도 및 기압의 불확실성을 평가한다. 대기온도 측정에는 다음과 같은 불확실성 요소들이 관련된다.

1. 온도 센서 보정의 불확실성

2. 온도 센서의 불완전한 복사열 차단으로 인한 불확도

(복사차폐 불량 시 실제보다 높은 온도가 측정됨)

3. 설치 영향에 따른 불확실성

(온도센서가 허브높이에 설치되지 않은 경우에는 낮과 밤의 수직 온도분포차에 의해 온도 측정에 영향을 준다)

각 빈의 측정된 온도에 대한 표준 불확실성  $u_{T,i}$ 는 다음과 같다.

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T1,i}^2 + u_{T2,i}^2 + u_{T3,i}^2 + u_{dT,i}^2} \quad (29)$$

여기서

- $u_{T1,i}$  : 빈 i의 온도센서 보정(calibration) 불확실성
- $u_{T2,i}$  : 빈 i의 온도센서의 복사차폐불량에 기인한 불확실성
- $u_{T3,i}$  : 빈 i의 온도센서의 설치영향에 기인한 불확실성
- $u_{dT,i}$  : 빈 i의 온도측정용 데이터 수집 장치의 불확실성

이다.

- 온도측정에 대한 민감도 인자
- 해수면 기준(해발고도 0)으로 평가된 온도측정에 있어서의 민감도 인자는 다음과 같다.

$$c_{T,i} \approx \frac{P_i}{288.15} [kW/K] \quad (30)$$

대기압의 측정은 만약 센서가 허브 높이에 설치되지 않았다면 허브 높이에 서의 대기압으로 보정하기 위한 보정계수를 우선 포함되어야 한다. 이 때 보정으로 인한 불확도가 고려될 수 있으며, 압력센서의 불확도가 포함되어야 한다. 각각의 풍속 구간에 대한 측정 대기압의 표준불확도는 (31)과 같다.

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B1,i}^2 + u_{B2,i}^2 + u_{dB,i}^2} \quad (31)$$

여기서,

- $u_{B1,i}$  : 빈 i의 대기압센서 보정(calibration) 불확실성
- $u_{B2,i}$  : 빈 i의 대기압센서의 설치영향에 기인한 불확실성
- $u_{dB,i}$  : 빈 i의 대기압측정용 데이터 수집 장치의 불확실성

이다.

- 대기압 측정에 대한 민감도 인자
- 대기압 측정에 있어서의 해수면 기준 민감도 인자는 (32)과 같다.

$$c_{B,i} = \frac{P_i}{1013} [kW/hPa] \quad (32)$$

- 결합된 유형 B 불확실성
- 각 빈의 유형 B 불확실성은 (33) 같이 결합된다.

$$u_i = \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} \quad (33)$$

여기서,

- $u_{P,i}$  : 전기출력에서의 B 형 불확실성
- $c_{V,i}$  : 풍속측정 민감도 인자
- $u_{V,i}$  : 풍속에서의 B 형 불확실성
- $c_{T,i}$  : 온도측정 민감도 인자
- $u_{T,i}$  : 온도에서의 B 형 불확실성
- $c_{B,i}$  : 대기압 측정 민감도 인자
- $u_{B,i}$  : 대기압측정에서의 B 형 불확실성

이다.

- 결합표준불확실성이 포함된 출력곡선
- 각 bin의 출력곡선에 대한 결합표준불확실성은 모든 유형 B 불확실성에 유형 A 불확실성을 결합하여 다음과 같이 구한다.

$$u_{c,i} = \sqrt{s_i^2 + u_i^2} = \sqrt{s_{P,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} \quad (34)$$

여기서,

- $s_i$  : A 형 불확실성
- $u_i$  : B 형 불확실성

이다.

### 3. 패키지 개발과 적용

#### 3.1 패키지 개발

본 연구에서 자체 제작한 프로그램은 위에서 언급했던 모든 이론적 배경을 통해 연산 하도록 구성하였다.

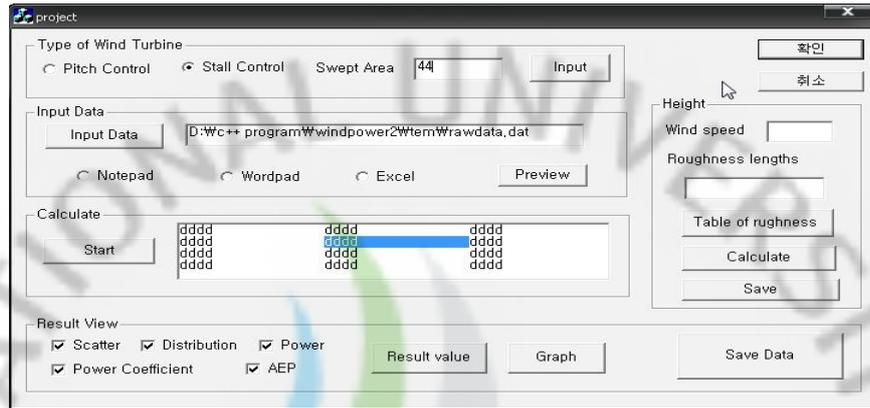


Fig. 3 Form of Program

##### 3.1.1 패키지 형태

Fig. 3 은 프로그램 모습이다. 이 프로그램으로 성능을 평가 할 때 풍력발전기 타입에 따라 데이터 보정 방법이 다르기 때문에 회전자 컨트롤방식을 선택한다. 출력계수를 구하기 위해서는 발전기 회전자면적을 구해야 하기 때문에 거기에 필요한 변수인 회전자 직경을 입력한다. 그리고 난 후 기상탑에서 측정된 데이터들과 발전기에서 수거된 데이터들을 을 입력해서 계산하면 성능곡선, 와이블 분포도, 연간 발전 생산량, 불확실성이 포함된 출력그래프가 나온다. 이때 만약 기상탑 높이와 풍력발전기 허브 높이가 달라 풍속을 높이에 따라 보정을 해야 할 경우 Table. 3 에서 나온 것처럼 거칠기 등급을 입력해야 한다.

$z_0$ [m]	Terrain surface characteristics	Roughness Class
1.00	city	
0.80	forest	
0.50	suburbs	
0.40		3 (0.40 m)
0.30	shelter belts	
0.20	many trees and/or bushes	
0.10	farmland with closed appearance	2 (0.10 m)
0.05	farmland with open appearance	
0.03	farmland with very few buildings/trees	1 (0.03 m)
0.02	airport areas with buildings and trees	
0.01	airport runway areas	
0.008	mown grass	
0.005	bare soil (smooth)	
0.001	snow surfaces (smooth)	
0.0003	sand surfaces (smooth)	
0.0002		0 (0.0002 m)
0.0001	water areas (lakes, fjords, open sea)	

Table. 3 Roughness Class

거칠기 모델은 특정 지역의 거칠기는 거칠기 요소의 분포와 크기에 의해 결정되어지고, 일반적으로 수풀이나 지표의 표면상태, 건축물 등에 따라 지표면 형태의 값을 결정하게 된다. European Wind Atlas에서 일반적으로 4가지 타입으로 분류하고 있다. 각 지형의 타입은 거칠기 등급의 값으로 나타내어진다. 거칠기 길이와 측정된 풍속을 입력하면 알고 싶은 높이에서의 풍속을 보정을 통해 알 수 가 있다.

### 3.1.2 패키지 연산 과정

보정하지 않은 원본 데이터 중 출력을 최대, 최소, 평균, 표준 편차 별로 그래프를 나타낸다. 그 다음에 기종별로 다른 보정 방식으로 보정한 값을 나타내서 보정 전 후를 비교하게 된다. 그 후 와이블 분포 표를 나타내 풍속 확률분포를 알 수 있게 하고 평균 출력그래프를 그린다. 그 후 연간 발전량을 계산하고 출력계수를 출력한다. Fig. 4는 연산과정을 그림으로 나타낸 것이다.

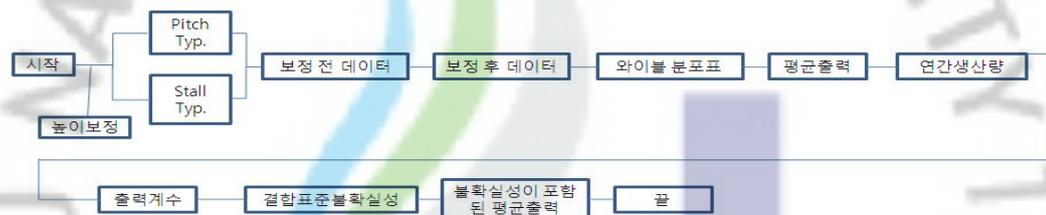


Fig. 4 Process of Package program

## 3.2 패키지 적용

### 3.2.1 시스템 구성

Fig. 5 와 같이 구성된 풍력발전기와 기상탑에서 실시간으로 풍황과 출력을 모니터링하고 그 데이터를 저장한다. 이 때 풍력발전기에서 풍속, 풍향, 요각, 발전량, 운전시간 등을 수집하고 기상탑에서는 풍속, 풍향, 온도, 압력을 수집한다.

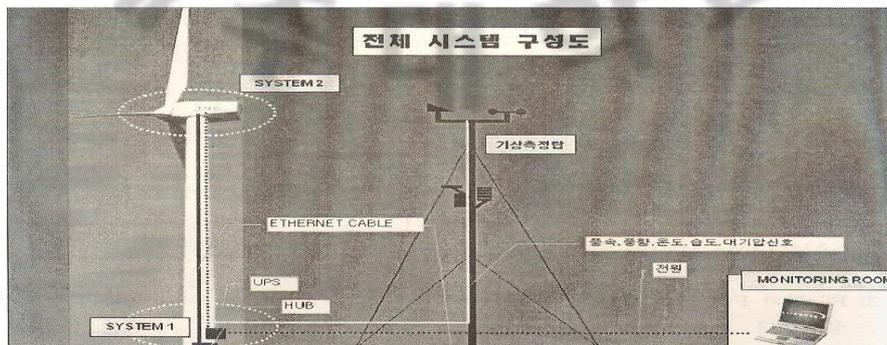


Fig. 5 Configuration of System

### 3.2.2 풍력발전기 사양

Fig. 6은 평가대상인 NEG-MICON 750KW 풍력발전시스템의 재원 및 사양을 나타낸다.

Company	NEG MICON	
Type/Version	NM48/750	
Rated power	750,0 kW	
Secondary generator	200,0 kW	
Rotor diameter	48,2 m	
Tower	Tubular	
Grid connection	50 Hz	
Origin country	DK	
Blade type	LM 23,5	
Generator type	Two generator	
Rpm, rated power	22,0 rpm	
Rpm, initial	15,0 rpm	
Hub height(s)	45,0; 50,0; 55,0 m	
Maximum blade width	0,00 m	
Blade width for 90% radius	0,00 m	
Valid	Yes	
Creator	USER	
Created	2008-05-14 14:57	
Edited	2008-05-14 14:57	

Fig. 6 NEG-MICON 750W

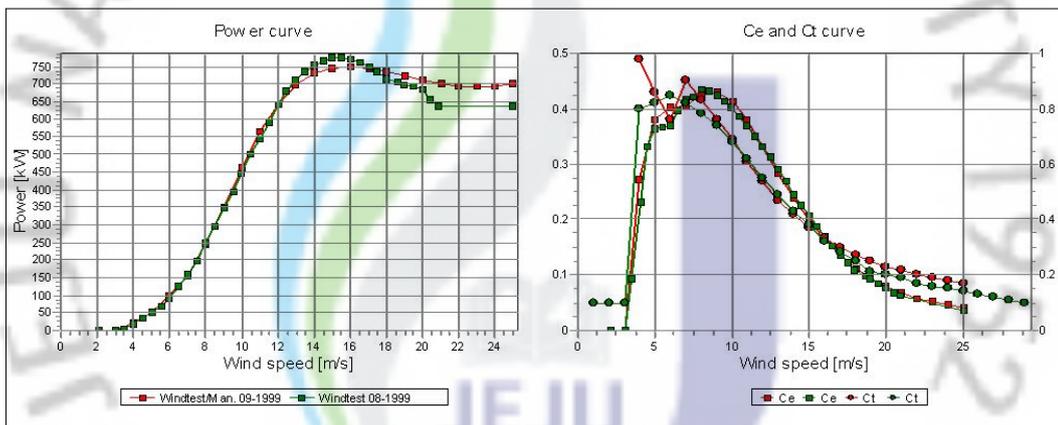


Fig. 7 Power Curve, Ce and Ct curve

행원단지에는 15기에 발전기가 설치 운용되고 있는데 그 중 6호기인 MEG-MICO-N 750W 기종은 단지에서 가장 큰 기종으로 현재 5기가 운행 중에 있다. Fig. 7은 제조사에서 제공한 출력 커브와 출력계수, 추력 계수 그래프이다.

### 3.2.3 기상측정마스트 주변 지형 분석

제주 행원 풍력발전 단지는 제주시로부터 동쪽으로 약 30km 떨어져 있는 지점으로서 한라산을 중심으로 제주도 북동부 단에 위치하고 있다. 다음의 Fig. 8은 제주 행원 풍력발전 단지의 지정학적 위치를 보이고 있다. 전체적으로는 북쪽은 바다와 인접한 지형이며 남서쪽으로는 점차 지표고도가

높아지는 한라산 지역으로 연결되어 있다. 그러나 세부적인 지형도에서도 볼 수 있듯이 행원지역은 돌출지역으로서 다소 남서쪽으로의 지형에 의한 영향을 제외한다면 거의 모든 방향에서의 바람을 기대할 수 있는 지형적으로 우수한 지역이라 할 수 있다.



Fig. 8 Local of Hangwon Wind Farm

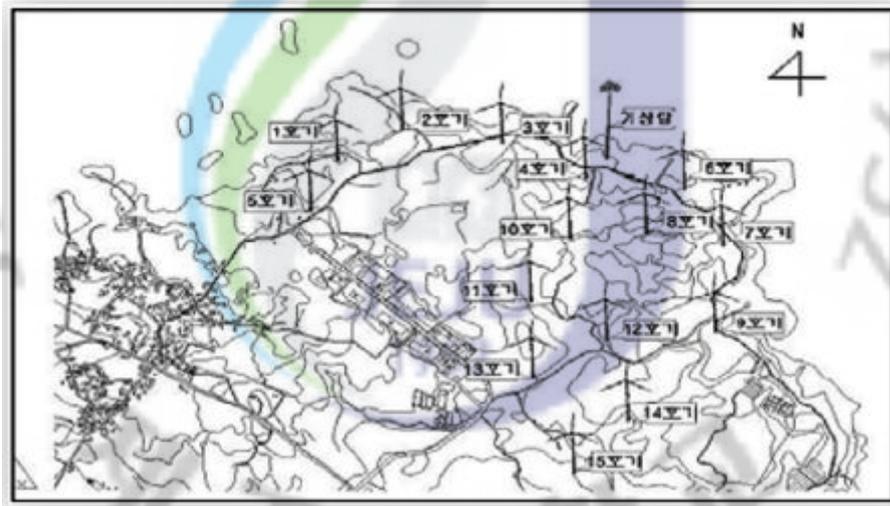


Fig. 9 Wind Turbines Position in Hangwon Wind Farm

아울러, Fig. 9 를 보면 알 수 있듯이 주변에 잘 조성되어 있는 도로 등으로 인해 풍력발전 단지의 건설지로서도 좋은 지역적인 장점을 지니고 있다고 할 수 있다. 즉, 풍력발전 단지로서 거의 모든 방향에서의 풍력자원을 기대할 수 있는 돌출지역이며 건설여건도 우수한 지정학적 특징을 지니고 있다고 할 수 있다. 풍력발전기들은 행원 양식장 주변에 설치되어있다. 주변 지역은 약간 기복이 있고 바다와 아주 가까이 인접해있는데, 바다와 풍력발

전기들 사이 거리는 약 5m ~ 1km 이다.

행원 단지 내 기상 측정 마스트는 높이 50m로 풍력발전기 허브높이와 동일하고 6호기와의 거리는 동남쪽방향 308m(3.5D) 떨어진 곳에 위치하고 유효한 방위각은 322도 ~ 116도 사이와 252도 ~ 257도 사이에서 유효한 방위각이 존재한다. 지역이 해안가인 점으로 보아 동서남북 모두 평활한 지형적 모습을 보이고 있으므로 지형의 영향에 의한 바람자원의 막힘은 없는 것으로 판단되어진다.

### 3.3 측정 및 데이터 처리

#### 3.3.1 측정시스템

기상측정마스트에 부착된 계측장비에 의해 측정되는 데이터는 풍속, 풍향, 일사량, 온도, 대기압, 습도이다. 측정된 데이터들은 센서에 의해 미국 NRG사의 #9300 Wind data logger 를 통해 지속적으로 풍속 및 풍향 등의 데이터들을 저장하게 되며, 일정기간 후 데이터로거 에서 데이터가 저장된 메모리 카드를 회수하여 컴퓨터를 통해 자료를 읽고 분석하는 과정을 거치게 된다.



Sensor	Raw Sensor Output	9300 Data Output Range	9300 Resolution
#40 Anemometer	0Hz to 125Hz	1m/s to 96m/s	0.271%
200P Wind Direction vane	0 V to excitation Voltage	360° rotation	0.271%
11DS Temperature Sensor	0 to 2.5V	-40°C to 52.5°C	0.271%
LI-200SA Li-Cor Pyranometer	93.7microamp ps/ 1000 watts m-2	0 to 3000 W/m2	0.271%
BP-20 Pressure Sensor	0 to 10.55kPa	15 to 115kPa	0.271%

Fig. 10 Meterological Mast(50m)

측정 마스트 하단부에 설치된 Data logger 는 Shelter box에 의해 보호되며, 측면에 각종 센서로부터 신호선이 연결되며, 전면 상단부에 메모리 카드가 삽입되며, 하단부에 컴퓨터와 연결하여 자료를 전송하는 통신포트가 있다. Data logger는 9V의 알카라인 축전지로 작동되며, 별도로 외부의 전원에 연결도 되고 내부에 큰 용량의 2차 축전지로도 작동이 가능하다. Fig. 10 마스트 그림과 스펙을 나타내고 있다. 풍속센서는 일반적으로 많이 사용되는 NRG #40 Anemometer를 설치하였다. 이 풍속센서는 전기신호의

강하를 막기 위하여 조그만 교류 발전기에 의해 펄스를 발생하여 그 주파수로서 풍속신호를 측정하게 되어 있다. 풍속센서의 보정은 원제작사의 테스트에 의한 보정보고서를 통해 알 수 있다. #40 Anemometer는 약 0.78m/s의 풍속에서 가동되며, 거리상수는 3.0m이고, 보정상수는 0.7658m/s/Hz로서 선형적으로 신호가 변하는 특성을 지니고 있다.

풍향센서는 일반적으로 많이 이용되는 가변저항식의 200P 모델을 이용하였다. 비교적 신뢰도가 우수한 편이며, 선형도는 최대 1.0%, 반응도는 1m/sec로서 작은 풍속에서도 작동하게 된다. 온도센서는 100S의 모델로서 정확도는 최대  $\pm 1.11^{\circ}\text{C}$ , 비선형도는 최대  $\pm 0.33^{\circ}\text{C}$ , 열적 시정수는 5분 전기적 시정수는  $250\mu\text{S}$ 이다. 일사량계는 일사량에 비례하여 미소전류가 흐르는 High-stability silicon photovoltaic형으로서 안정도는 12개월간 2% 미만으로서 안정적인 상태를 유지한다. 대기압 측정은 0.046/kPa의 보정상수와 최대 0.1%의 비선형도를 지닌 센서를 설치하였다.

### 3.3.2 실시간 모니터링 시스템

구축된 실시간 모니터링 시스템은 Fig. 11 과 같이 터빈으로부터 RS422통신으로 입력되는 신호를 RS232신호를 변환 후 이 신호를 다시 이더넷 통신을 위한 신호로 변환하고 이 신호를 무선으로 이용하여 모니터링 하우스의 AP로 보내지게 된다. 모니터링 서버에 연결된 AP에서 받은 신호는 개발된 서버 프로그램에서 받아 이를 분석하여 원하는 정보를 얻은 후 화면에 보여주며 보인 데이터는 별도의 DB에 일정 시간간격으로 저장하게 된다. 이 저장된 데이터는 분석 모듈을 통해 필요한 분석 데이터를 확인 할 수 있다.

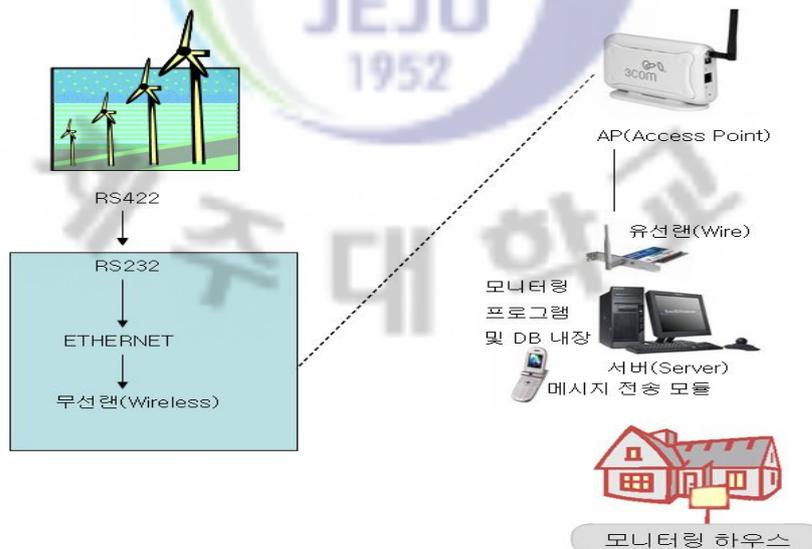


Fig. 11 Real Time Monitoring System

모니터링 하우스에 설치된 서버는 2개의 이더넷 카드를 장착하고 있으며 한 개는 터빈과의 데이터 전송을 담당하고 나머지 한 개는 웹을 통하여 모니터링 서버에 접속하는 원격 컴퓨터와 연결하는데 사용한다. 무선 연결의 경우 데이터의 정확성을 위해 별도의 외장 안테나를 이용하여 데이터 송수신의 안정성을 도모하였다.



Fig. 12 Transmitter/receiver in Turbine and Exterior toward Antenna

Fig. 12는 터빈 내 RS422통신 신호를 RS232신호로 변환하고 이 신호를 다시 이더넷 신호로 변환하는 모듈과 그 테스트 화면이다. 신호 변환은 RS422신호를 바로 이더넷 신호로 변환 할 수 도 있으나 휴대용 PC를 이용하여 터빈 내에서 바로 연결할 수 있는 2가지 모드를 지원하기 위해 라인 구성의 통일성을 위하여 Fig. 13과 같이 구성하였다.



Fig. 13 RS442-RS232 and Serial-Ethernet Transducer

RS422-232변환기의 한쪽은 터빈 컨트롤러의 CT모듈과 연결되며 다른 한쪽은 시리얼-이더넷 변환기에 연결된다. 시리얼-이더넷 변환기는 시리얼 신호를 이더넷 신호로 변환하고 그 신호를 연결된 외장 안테나를 통해 모니터링 하우스로 전송한다. 휴대용 PC를 이용하여 터빈 내에서 데이터를 받을 경우

RS-422-232변환기만을 이용하여 개발된 휴대 모듈을 통하여 데이터를 주고받을 수 있다.



Fig. 14 AP(Access Point)and Exterior toward Antenna

Fig. 14는 모니터링 하우스 내 설치된 서버 측 산업용 AP와 무지향성 안테나로 터빈에서 보내오는 신호를 받아 모니터링 서버로 데이터를 보내주는걸 나타내고 있다. 모니터링 하우스에 설치된 안테나는 무지향성으로 넓은 범위에 있는 터빈들과 신호를 주고받기 위해 무지향성을 선택했으며 현재 설치된 상태는 테스트를 위한 설치이며 추후 케이블을 길게 하여 공간이 확보된 장소에 설치하면 여러 방향의 터빈으로부터 데이터를 송수신 할 수 있다.

### 3.3.3 측정방위 구간

만약 장애물이 있으면 바람은 주변장애물들의 영향으로 인해 유동왜곡이 발생한다. 따라서 기상측정 마스트에서 풍속을 측정 할 때 주변 장애물이나 평가대상 풍력발전기에 의해 유동변형이 발생하지 않는 풍향의 유효한 측정 방위각 구간을 설정해야 하는데 측정 사이트에서의 장애물을 들을 보면 다음과 같다.

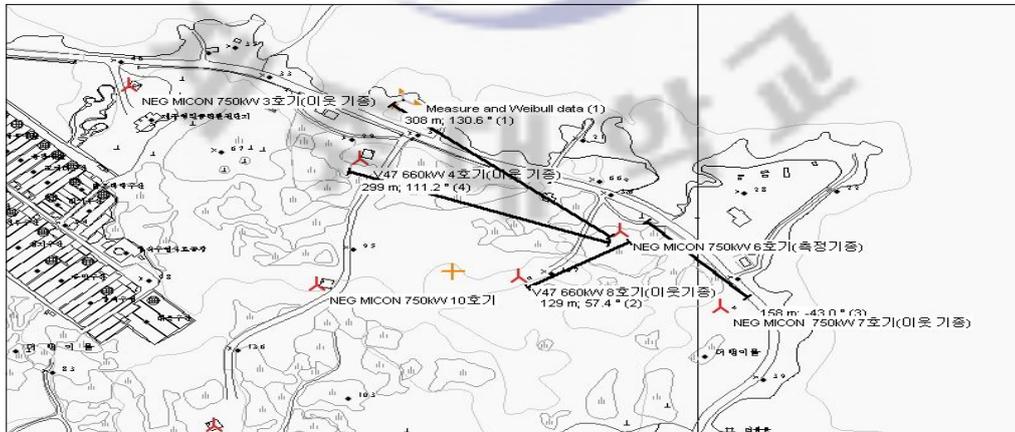


Fig. 15 Circumference of Obstacles nearby turbine

Fig. 15는 테스트 사이트 주변의 주요 장애물과 평가대상인 풍력발전기와 행원단지 모니터링 건물, 양식장 시설, 그리고 주변의 건물 그리고 각 장애물에서 발전기 까지 거리를 나타내고 있다. Table. 4는 각 장애물로부터의 거리 및 방위를 표로 나타냈다.

Table. 4 Distance and Direction from Obstacles

기준	기상측정 마스트			평가대상 풍력발전기		
	평가대상 풍력발전기	모니터링 건물	양식장건물	4호기	7호기	8호기
거리(D)	308m(3.5D)	259m(2.9D)	341m(3.9D)	299m(3.4D)	158m(1.8D)	129m(1.4D)
방위(°)	130.6°	84.9°	68.9°	111.2°	-43.0°	57.4°

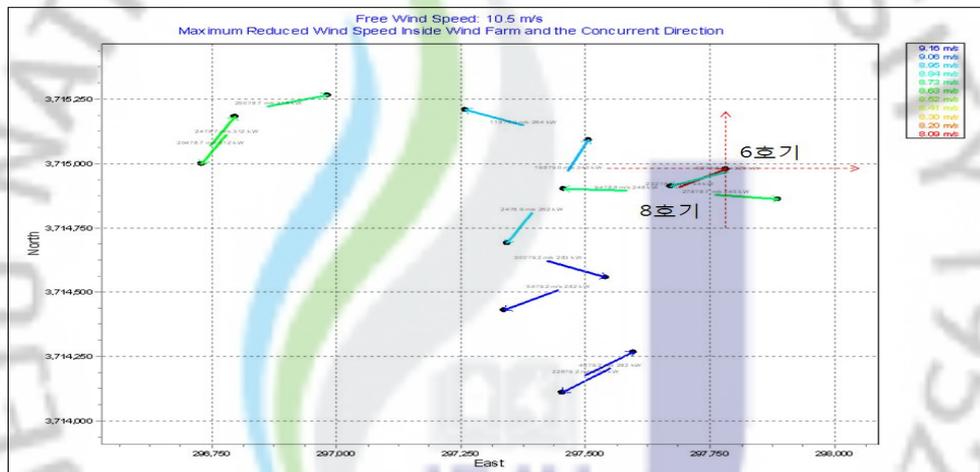


Fig. 16 Reduced Wind Speed Inside Wind Farm and Direction

Fig. 16은 Windpro 상용패키지를 이용하여 주변 풍력 발전기가 6호기에 미치는 영향을 분석하였다. 전반적으로 큰 영향은 주고 있지 아니하지만 가장 근접한 8호기가 영향을 주고 있다. 만약, 10.5m/s 바람이 360° 방향으로 불 때 8호기 때문에 6호기는 약 200° 방향으로 8.09m/s 즉 약 2m/s에 바람을 손해 보는 걸로 나타났다. 이것은 8호기가 6호기에 영향을 주고 있다는 걸 나타냄으로 Fig. 17과 같이 영향을 받지 않는 범위의 유효측정 구간을 정하였다. Fig. 17은 IEC61400-12-1에 규정된 방법에 의해 설정된 기상 마스트와 풍력발전기에 대한 측정방위구간을 나타낸다. 이 결과로부터 측정방위구간은 340° ~ 70° 과 180° ~ 250° 로 결정되었다. Fig. 18은 유효측정 구간에서의 풍황 데이터이다.

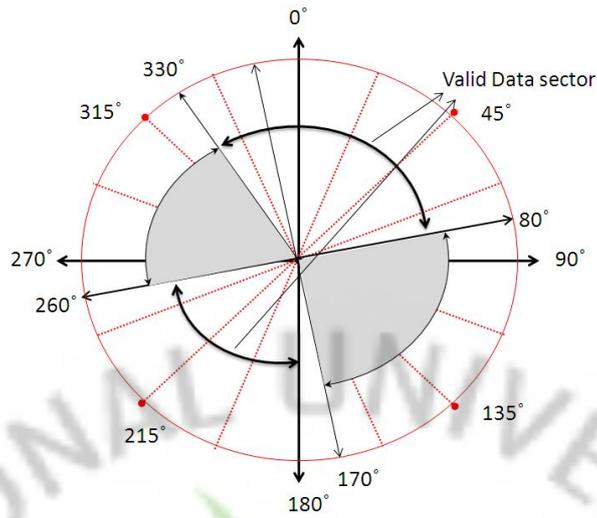


Fig. 17 Measured direction sector

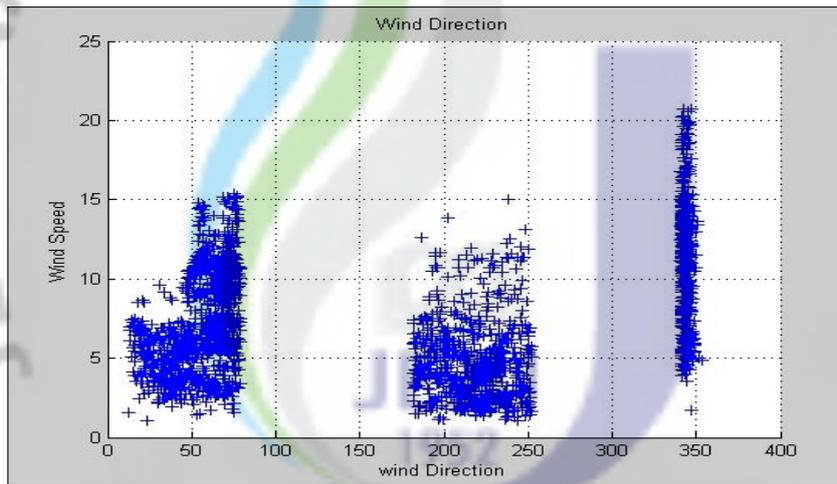


Fig. 18 Data of Effective Wind Direction

### 3.3.4 지형학적 특성

Table.5 는 IEC61400-12-1에 규정된 바람의 유동변형 영향을 주는 테스트 사이트의 지형에 대한 요구사항이다. 본 테스트 사이트의 지형 분석결과 측정 방위구간 내 지형의 기울기는  $4L$ 이내 에서는 약 0.63, 그리고  $4L$ 이상에서는 1.4정도 이었으며, 지형의 굴곡편차 또한 각 경우  $0.02D$ 로서 모두 IEC 규정에 적합한 것으로 평가되었다.

Table. 5 Topographical Deviation Regulation in Test Site (IEC 61400-12)

거리	구간	최대 기울기	최대 지형편차
<2L	360°	<3*	<0.08D
≥2L and <4L	측정방위구간	<5*	<0.15D
≥2L and <4L	측정방위구간 이외 영역	<10*	Not applicable
≥4L and <8L	측정방위구간	<10*	<0.25D

주) \* :타워 기초와 구간 내 지형을 동시에 통과하는 최적합 평면의 최대 기울기  
 $L$  :측정마스트와 풍차간의 거리  
 $D$  :풍차의 허브 높이 + 회전자의 직경

### 3.3.5 데이터 전처리

연속적으로 측정된 데이터로부터 10분 간격으로 전처리 데이터 세트를 구성하였다. Table. 6은 전 처리 된 데이터 세트의 정보를 나타내고 Fig. 19는 그때 수집 데이터 예시이다. 이때 풍차가 정상가동 되지 않았을 때 와 측정방위 구간 이외의 풍향일 때 측정된 데이터는 제외했다.

Table. 6 Information of Data set

구분	출력	풍속	풍향	밀도
데이터 정보 (10분 간격)	평균, 최대, 최소, 표준편차	평균, 표준편차	평균	평균 (온도와 기압으로부터 계산)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	56.9540	59.6090	182.2000	48.3000	5.7850	205.4870	1.2810
2	1	272.1090	78.3600	443.5000	24.2000	8.1080	215.5400	1.2800
3	2	365.6020	75.2090	577.7000	189.3000	9.1150	216.0500	1.2800
4	3	339.7900	77.7750	528.8000	123.7000	8.6720	196.3970	1.2800
5	4	317.9610	65.5050	489.8000	189.9000	8.5800	238.3500	1.2810
6	5	315.1710	95.7580	554.2000	88.4000	8.2230	232.1830	1.2810
7	6	331.0340	97.6030	583.2000	108.1000	8.5030	347.1470	1.2780
8	7	302.7770	86.6870	517.5000	102.2000	8.0710	341.3930	1.2790
9	8	237.1000	69.9660	386.7000	76.2000	7.6800	341.1170	1.2790
10	9	363.4480	94.8810	607.6000	191.1000	8.8170	342.3030	1.2830
11	10	344.1410	82.9420	547.4000	174.5000	8.6990	239.7170	1.2850
12	11	307.0250	91.6910	522.4000	131.4000	8.4150	225.9430	1.2860
13	12	419.3350	115.6850	701	209.6000	9.2660	232.4100	1.2880
14	13	335.7600	71.8470	499.1000	198.3000	8.2060	226.3700	1.2890

Fig. 19 Example of Data set

### 3.4 성능평가결과

#### 3.4.1 전처리 데이터의 산포도

Fig. 20은 10분 평균으로 전 처리된 데이터로부터 그려진 풍속에 대한 풍력 발전기의 전기출력을 나타낸다. 최고출력, 최저출력, 평균출력 그리고 출력에 표준편차를 나타내고 있다.

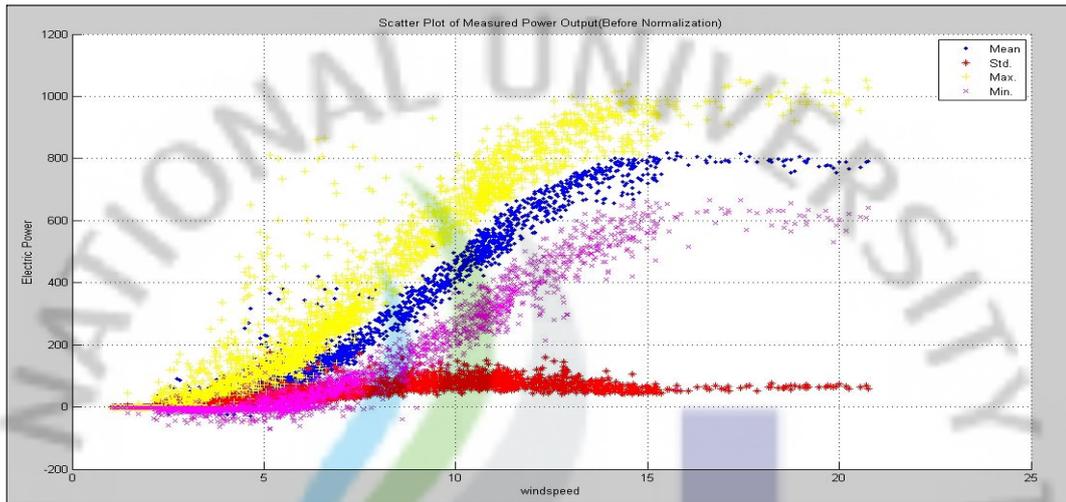


Fig. 20 Scatter Plot Power Output Before Normalization(1.281kg/m<sup>3</sup>)

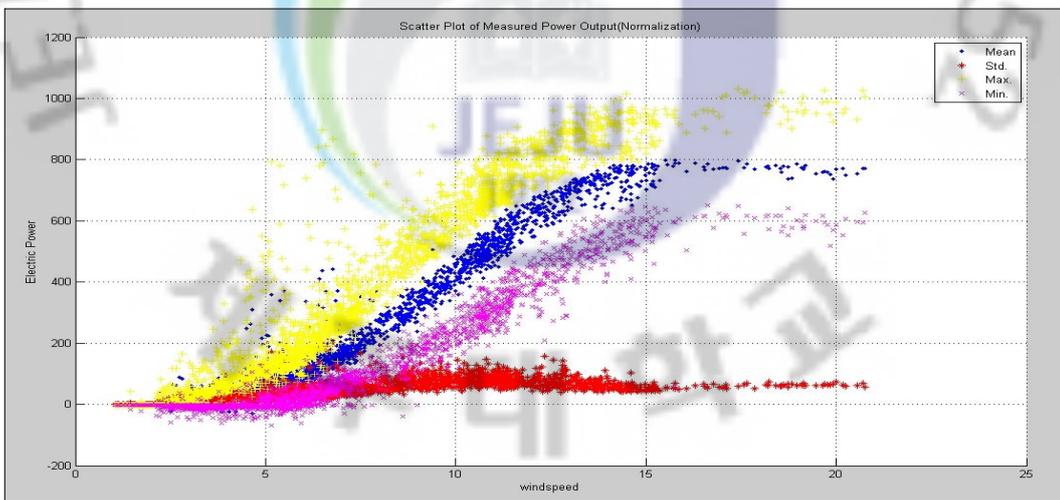


Fig. 21 Scatter Plot Power Output Normalization(1.281 kg/m<sup>3</sup>)

Fig. 21은 후 처리데이터로부터 그려진 출력의 최대, 최소 및 표준편차에 대한 산포도이다. 기준 밀도(1.281kg/m<sup>3</sup>)와 표준공기 밀도(1.225kg/m<sup>3</sup>)을 이용하여 출력 표준화를 거치고 난 후 그래프이다. 본 연구에서 평가한 기종은 실속

제어(Stall control) 방식이기 때문에 출력 표준화를 했다. 만약 평가 기종 이 능동출력제어(Pitch control) 방식이면 풍속을 표준화해야 한다.

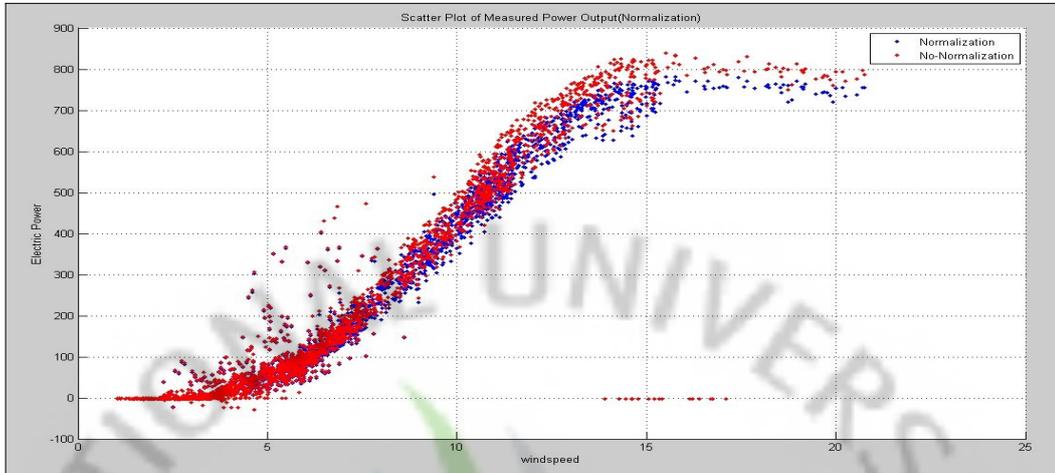


Fig. 22 Scatter Plot Average power ( $1.281 \text{ kg/m}^3$ )

Fig. 22는 평균 출력만을 나타내고 있다. 전체적으로는 이론적인 출력곡선과 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 표준화 전과 후를 비교하면 표준화를 한 후 값이 적게 나타나고 있는걸 알 수 있다. 이것은 평균공기밀도가 표준 공기밀도 보다 크기 때문이다.

### 3.4.2 실측출력곡선

정규화 된 데이터 세트에 대해 IEC 규정에 따라  $0.5 \text{ m/s}$  풍속 구간으로 구분된 빈을 구성하였다. Fig. 23은 사이트 평균밀도에 대한 출력곡선을 보여 준다.  $750\text{kW}$  발전기이기 때문에 최고 출력이 약  $750\text{kW}$  정도 나타나고 있다.

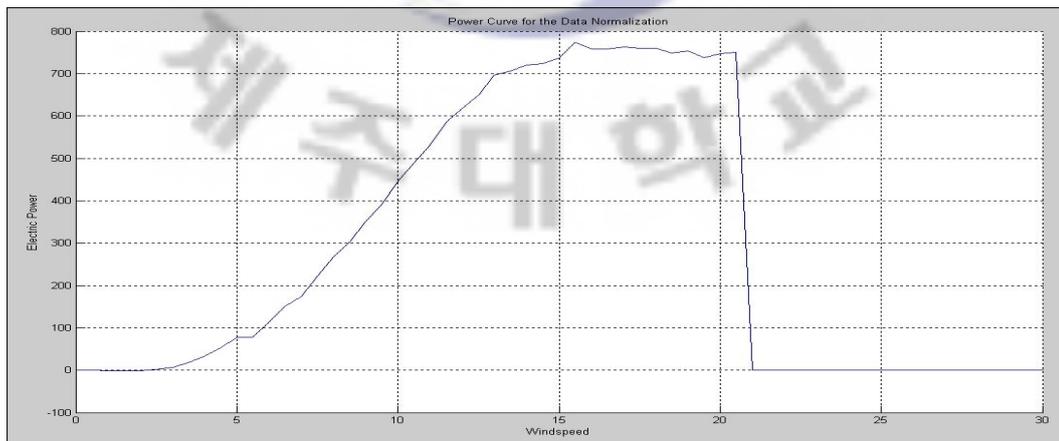


Fig. 23 Measured Power Curve

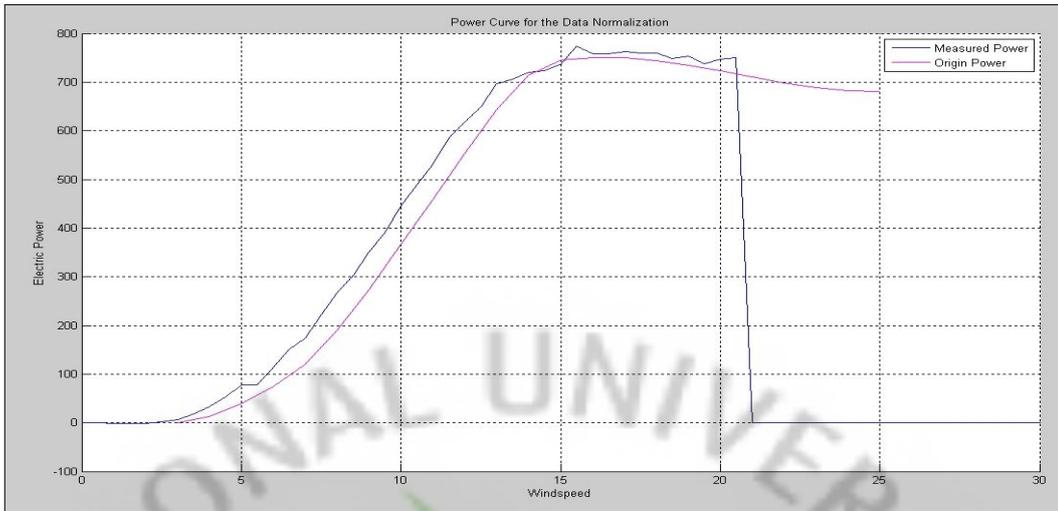


Fig. 24 Measured Power and Origin Power Curve

Fig. 24는 측정평균밀도에 대한 측정 출력곡선과 제조사에서 제공한 표준공기밀도( $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ )를 기준으로 한 출력 곡선을 각각 나타낸다. 이 때 공기 밀도가 서로 같지 않기 때문에 이 그래프로 서로를 비교 하긴 무리가 있다. 하지만 밀도 차가  $0.056\text{kg}/\text{m}^3$  이기 때문에 참고 비교 자료로 나타났다. Fig. 24처럼 실제 출력 곡선이 제조업체가 제공한 출력 곡선 보다 높다. 하지만 제조사에서 제공한 출력 곡선은 표준대기밀도가  $1.225\text{kg}/\text{m}^3$  이고 본 연구에서 측정한 평균 밀도는  $1.281\text{kg}/\text{m}^3$  이기 때문에 발전효율이 높다고 말할 수 는 없다. 또한 스톨 이 발생해야 하는 지점인  $15\text{m}/\text{s}$  이상에서 스톨이 정확히 일어나고 있는지 정확히 알 수 없다. 만약 실제 발전기에 날개에서 스톨이 정확히 발생 하지 않는다면, 이것은 추후 발전기 수명에 영향을 줄 것 이라 사료 된다.

Table. 7은 각 빈에 대한 평균 허브높이 풍속과 그에 따른 발전량 그리고 그 빈에 대한 데이터 셋수를 나타냈다. 데이터 셋 수를 보면 풍속 확률을 짐작 할 수 있다. 여기서  $5\text{m}/\text{s} \sim 7\text{m}/\text{s}$  와  $9\text{m}/\text{s} \sim 10\text{m}/\text{s}$  가 가장 빈번이 붙었던 걸로 알 수 있다. 이결과로 봐서 풍력발전기 운전 사이트로는 좋다는 걸 알 수 있다.

Table. 7 Bin Power Output Mean (1.281 kg/m<sup>3</sup>)

Bin No	Hub high wind speed (m/s)	Power output (kW)	No. of data sets (10 min. average)
1	1.280	-31.431	16
2	1.756	-133.49	65
3	2.249	-46.764	83
4	2.749	299.44	115
5	3.254	813.645	126
6	3.765	2210.154	121
7	4.246	4125.75	119
8	4.741	6451.557	117
9	5.267	12585.17	156
10	5.757	12216.5	151
11	6.250	17151.34	143
12	6.752	19863.7	126
13	7.238	21326.73	117
14	7.738	13074.26	56
15	8.257	12569.15	45
16	8.744	22235.89	70
17	9.251	26093.81	71
18	9.725	26264.51	64
19	10.257	31673.54	68
20	10.745	63930.9	125
21	11.247	57131.21	103
22	11.694	28767.98	47
23	12.222	34882.23	54
24	12.760	35315.22	52
25	13.248	28435.05	39
26	13.733	31003.41	42
27	14.254	24871.09	33
28	14.719	21177.56	28
29	15.174	13879.44	18
30	15.705	5664.951	7
31	16.184	1585.749	2
32	16.677	3962.546	5
33	17.166	3189.262	4
34	17.691	2385.305	3
35	18.248	3179.026	4
36	18.713	5476.079	7
37	19.205	3940.477	5
38	19.779	3856.555	5
39	20.149	2343.942	3
40	20.662	2351.716	3

### 3.4.3 출력계수(CP)

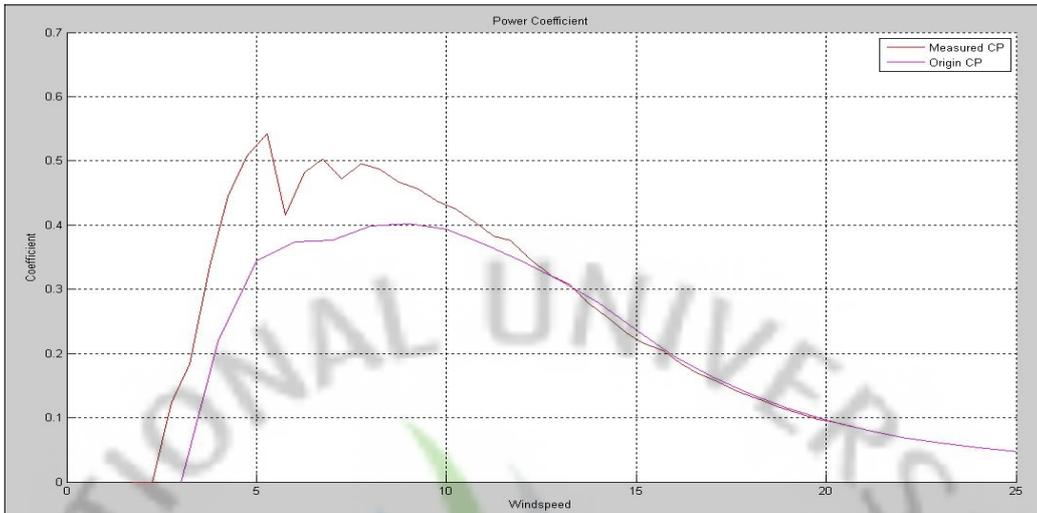


Fig. 25 Comparing Power Coefficient

실측출력곡선의 각 빈에 대한 출력계수  $C_p$  을 Fig. 25에서 나타내고 있다. 출력 계수는 풍속이 5m/s 부근에서 최대이며 점점 풍속이 증가하면 블레이드에서 Stall 이 발생해  $C_p$  값이 작아진다. 제조사에서 제공한 출력계수보다 상당히 높게 나타나고 있다. 출력계수는 출력 값에 대한 함수기 때문에 출력 그래프와 동일하게 제조사 제공 값보다 높게 나타나고 있다. 하지만 출력계수의 최대값은 란체스터와 베츠에 의해 밝혀진 것과 같이, 이상 풍차에서는 0.593이고, 실제 풍차에 대해서는 고성능 프로펠러형 풍차에서 0.45, 항력형 사보니우스 풍차에서는 0.15에서 0.20 정도 인 결과 봐선 위 출력계수 값이 너무 높게 나타나고 있다. 이것은 발전기 출력 값이 너무 높게 측정되고 있다는 것을 나타내는데 그 이유는 평가 적용 부분에서 설명한다.

### 3.4.4 연간 에너지 생산량(AEP)

풍속에 따른 연간발전량은 Fig. 26과 같다. 각 풍속에서의 높이가 그 풍속에서의 생산량이고, 면적의 합이 연간 발전 총 생산량(2173230W)이 된다. AEP는 IEC 61400-12-1 규정에 따라 실측출력곡선을 다양한 기준 풍속분포에 적용하여 평가하였다. 기준 풍속으로는 연 평균풍속 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11m/s의 각각에 대해 평가하였으며, 그 결과를 Table. 8, 그리고 Fig. 26에 나타내었다. 11m/s 이후 풍속이 감소하여 연간 에너지 생산량도 감소 하게 된다.

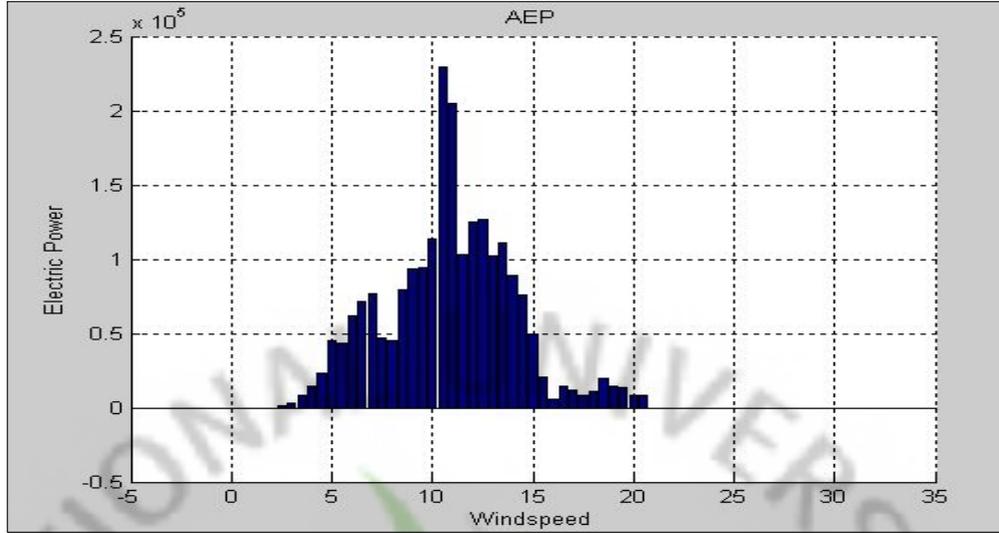


Fig. 26 Annual Energy Production

Table. 8 Annual Energy Production

Reference air density : 1.281 kg/m<sup>3</sup>  
cut-out wind speed : 25m/s  
cut-in wind speed : 4m/s  
(extrapolated by constant power from the last bin)

Hub high annual average wind speed (Rayleigh) m/s	AEP-measured (measured power curve) Wh	Standard uncertainty in AEP Wh	Standard Uncertainty in AEP(%)
4	19159.89	4023.576	21
5	34483.39	4138.007	12
6	53197.32	4255.786	8
7	67049.57	4693.47	7
8	62314.45	3738.867	6
9	63046.34	3152.317	5
10	94842.61	4742.13	5
11	173179.3	8658.963	5

### 3.5 불확실성평가결과

형성된 빈의 측정 파라메타가 Table. 9 와 같이 전기출력, 기후변동 등이 유형 A 불확실성 파라메타이고, 출력, 풍속, 밀도, 데이터 수집 장치, 유동변형, 해석방법 등이 유형 B 불확실성 파라메타에 대해 평가하였다.

Table. 9 List of type A and B Uncertainty

유형 B : 장비	참조	표준	불확실성	민감도
<b>출력</b>			$U_{P,i}$	$C_{P,i} = 1$
전류변환기 *	a	IEC 60044-1 IEC 60186 IEC 60688	$U_{P1,i}$	
전압변환기 *	a		$U_{P2,i}$	
출력변환기 *	a		$U_{P3,i}$	
또는 출력측정 장비 *	c		$U_{P4,i}$	
<b>풍속</b>			$U_{V,i}$	$C_{V,i} = \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}$
풍속계 *	b	$U_{V1,i}$		
작동특성 *	c d	$U_{V2,i}$		
설치영향 *	c	$U_{V3,i}$		
<b>대기 밀도</b>				$C_{T,i} = \frac{P_i}{288.15K}$ $C_{B,i} = \frac{P_i}{1013hPa}$
<b>온도</b>			$U_{T,i}$	
온도센서 *	a	ISO 2533	$U_{T1,i}$	
복사차폐방식 *	c d		$U_{T2,i}$	
설치영향 *			$U_{T3,i}$	
<b>대기압</b>			$U_{B,i}$	
기압센서 *	a		$U_{B1,i}$	
설치효과 *	c		$U_{B2,i}$	
<b>데이터수집장치</b>			$U_{d,i}$	민감도 인자는 실제 불확실성 파라메타로부터 도출함
신호전송 *	b		$U_{d1,i}$	
시스템 정확도 *	c d		$U_{d2,i}$	
신호조절 *			$U_{d3,i}$	
<b>유형 B : 지형</b>				
지형에 따른 유동변형 *	b c		$U_{V4,i}$	$C_{V,i}$ (위 참조)
<b>유형 B : 방법론</b>				
<b>방법</b>			$U_{m,i}$	$C_{T,i}$ and $C_{B,i}$ (위 참조)
대기압보정	c d		$U_{m1,i}$	
빈 방법	c		$U_{m2,i}$	
<b>유형 A : 통계</b>				
전기출력 *	e		$S_{P,i}$	$C_{P,i} = 1$
기후변동	e		$S_w$	
* 불확실성 평가에 필요한 파라메타				
참조 - 불확실성 확인(평가) 방법: a = 표준 참조, b = 보정(Calibration), c = 외적인 객관적 방법, d = 추측 평가, e = 통계적 평가				

## ▪ A형 불확도

분석이 필요한 A형 불확도는 전기출력 자료뿐이다. 따라서 수거된 데이터를 통해 표준화된 전기 출력데이터를 2장 이론적 배경에서 언급했던 (21)을 통해 빈의 평균 출력에 대한 표준 불확실성 표준 편차를 구하면 309.24 이고 이 값을 (22)에 넣고 계산하면 출력에 대한 유형 A 표준 불확실성 값인 39 가 나온다.

## ▪ B형 불확도

### i) 데이터 처리 장치의 유형 B 불확실성

데이터 처리 장치에서는 신호전송과정, 신호조절과정, A/D 변환과정, 그리고 데이터 처리과정에서 불확실성이 발생할 수 있으며, 그 크기는 각 채널별로 서로 달라질 수 있다. 어떤 채널의 전체 측정 범위에 대한 표준 불확실성,  $u_{d,i}$ , 는 다음과 같이 표현 할 수 있다. 본 연구에서는 데이터 수집 장치 각 채널의 불확실성을 각 채널별 최대측정범위의 0.1% 로 가정했다.

### ii) 전기출력에서의 유형 B 불확실성

발전기에 공칭 출력과 출력 측정 장치에 대한 값들은 어떤 발전기를 측정 하느냐 와 데이터 수집 장치 채널의 불확실성에 따라 변하기 때문에 변수로 설정해야 하며, 본 연구에서는 공칭출력이 750kW인 풍력발전시스템에 대하여 전류변환기, 전압변환기 및 출력변환기의 등급은 0.5이며 공칭출력이 2000kW 인 출력측정 장비와 출력측정범위가 2500kW이고 불확실성이 측정범위의 0.1% 인 데이터 수집 장치를 이용하여 측정하였다.

### iii) 전류변환기

IEC 60044-1에 따르면, 100% 부하에서 0.5 등급 전류변환기의 불확실성 한계는 전류의  $\pm 0.5\%$  이다. 그러나 20% 와 5% 부하에서는 불확실성 한계가 각각  $\pm 0.75\%$  및  $\pm 1.5\%$ 로 증가한다고 나와 있다. 풍력발전기의 출력성능측정에서는 최대 출력(100% 부하)보다 낮은 출력에서 주로 에너지가 생산되기 때문에 본 연구에서는 일반적 경우인 20% 부하에서 전류의  $\pm 0.75\%$ 를 불확실성 한계로 계산하였다. 이 때, 불확실성 분포는 사각형으로 가정하였다.

또한 세 개의 전류 변압기에 대한 불확도는 공기온도와 전력계통 주파수 같은 외부 요소의 영향으로 발생하는 것으로 가정하였다. 위에 가정을 통해 전기 출력에서의 불확도 요소들은 서로 완전히 연관된 것이므로 각 불확실성 값

들을 단순히 합하여 결합불확실성을 구한다. 또한 각 전류측정기가 출력의 1/3씩을 담당하므로 전체 전류변환기의 불확실성은 다음 (34)과 같이 구할 수 있다.

$$U_{P1,i} = \frac{0.75\% \cdot P_i [kW]}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{3} \cdot 3 = 0.43\% \cdot P_i [kW] \quad (34)$$

#### iv) 전압변환기

전압변환기 역시 0.5 등급의 전압변환기를 사용했다. 0.5 등급의 전압변환기는 IEC 60044-2 에 따르면  $\pm 0.5\%$ 의 불확도 범위를 갖는다고 나와 있기 때문에 불확도 범위를  $\pm 0.5\%$ 로 했고 이때 불확도는 직사각형 분포를 갖는다고 가정했다. 일반적으로 계통(grid) 전압은 일정한편이며 풍력발전기의 출력에 대해서는 서로 독립적 관계를 갖는다. 세 개의 전압변압기의 불확도 역시 전류변압기의 경우와 같이 외부 요소들에 의해 영향을 받으며 이 때 서로 상관관계에 있는 것으로 가정하여 각 불확실성을 단순히 합하여 결합 불확실성을 구하였다. 각 전압변환기 역시 출력측정에서 1/3씩을 담당하므로 전체 전압변환기의 불확실성은 출력에 비례하는 형태로서 (35)와 같이 계산되었다. 만약 전류 및 전압 변환기가 2 차 운전하중 범위 내에서 작동하지 않는 다면 추가적인 불확도 평가가 필요하다.

$$u_{P2,i} = \frac{0.5\% \cdot P_i [kW]}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{3} \times 3 = 0.29\% \cdot P_i [kW] \quad (35)$$

#### v) 출력변환기

공칭출력이 2000kW( 공칭출력이 1000kW인 풍력발전기의 200%)인 0.5 등급의 출력변환기는 IEC 60688에 의하면 10kW의 불확실성 한계를 가지며 직사각형의 불확실성 분포를 갖는다고 나와 있다. 이것을 이용해 출력변환기의 불확실성을 구하면 다음과 같다.

$$u_{P3,i} = \frac{10kW}{\sqrt{3}} = 5.8 kW \quad (36)$$

본 연구에서는 공칭출력이 750kW인 풍력발전기를 0.5등급 출력변환기를 사용하였기 때문에 7.5kW의 불확실성 범위를 가지게 된다. 따라서 출력변환기

불확실성은 다음과 같다.

$$u_{P3,i} = \frac{7.5kW}{\sqrt{3}} = 4.3301 kW \quad (37)$$

따라서 출력측정 범위가 2500kW이고 불확실성이 측정범위의 0.1%인 데이터 수집 장치를 이용한 각 bin의 전기출력에 수반되는 표준불확실성은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} u_{P,i} &= \sqrt{(0.43\% \cdot P_i [kW])^2 + (0.29\% \cdot P_i [kW])^2 + (4.33kW)^2 + (0.1\% \cdot 2500kW)^2} \\ &= \sqrt{(0.52\% \cdot P_i [kW])^2 + (4.97kW)^2} \end{aligned} \quad (38)$$

vi) 풍속측정에서 유형 B 불확실성

풍속계 보정의 표준불확도는 0.1 m/s, 작동특성으로 인한 불확도는 지형이 최대기울기 한도가 50% 이내이기 때문에 지형 보정이 별도로 필요하지 않고 지형 조건에 대한 일반적 영향요소 범위를 갖는 등급인 1.2A등급으로 평가되었다. 불확도 분포도가 직사각형이라 가정하면 이 등급에서의 표준불확도는  $0.034m/s \pm 0.0034 \cdot V_i$  이다. 풍속계의 설치로 인한 유동왜곡 표준불확도는 풍속의 1% 이다. 측정 채널의 풍속범위가 30m/s 이고 데이터 처리장치의 불확도가 이 풍속 범위에 대해 0.1%라는 점을 고려한다면 데이터 처리 시스템으로 인한 표준불확도는 0.03m/s 이다. 또한 지형 보정이 없었기 때문에 지형으로 인한 유동왜곡은 풍속의 3% 정도이며 각각의 풍속 군에 대한 불확도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_{V,i} &= \sqrt{(0.1m/s)^2 + (0.034m/s + 0.0034 \cdot V_i [m/s])^2 + (0.01\% \cdot V_i [m/s])^2} \\ &\quad + (0.03\% \cdot V_i [m/s])^2 + (0.001 \cdot 30m/s)^2 \\ &= \sqrt{(0.104 m/s)^2 + (0.032 \cdot V_i [m/s])^2 + (0.034m/s + 0.0034 \cdot V_i [m/s])^2} \end{aligned} \quad (39)$$

만약 본 연구와는 달리 현장보정이 이루어진 경우라면 풍속구간의 지형으로 인한 유동왜곡 불확도가 포함 되어야 한다. 본 연구에서는 3%로 고정하였다.

vii) 공기밀도에 대한 유형 B 불확실성

온도센서 매뉴얼에 따라 표준불확도는  $\pm 1.11^\circ C$ 이고 불완전한 복사열 차폐는 정확히 알 수 없으므로  $2^\circ C$ 로 가정했다. 온도센서가 허브높이로부터 허브높이의 10m 이내에 설치되었다면 표준불확도는  $1/3^\circ C$  이 된다고 가정하여,

측정채널의 온도 범위가 40 °C이고 데이터 처리장치의 불확도가 0.1% 라고 가정했기 때문에 다음의 식이 나온다.

$$u_{T,i} = \sqrt{(0.5 K)^2 + (2.0 K)^2 + (0.3 K)^2 + (0.1\% \cdot 40 K)^2} = 2.1 K \quad (40)$$

대기압센서 매뉴얼 대기압센서의 표준불확실성(calibration 불확실성)은 0.46 hPa로 나와 있고 측정된 대기압이 ISO 2533(표준대기조건에서 허브와 센서 사이의 높이 차가 28m라면 3.4 hPa)에 따라 허브 높이에 대해 보정되어야 한다. 측정 채널의 측정 압력범위가 100hPa 이고 데이터 처리장치의 불확도가 이 범위에 대해 0.1% 라면 대기압의 표준불확도는 다음과 같다.

$$u_{B,i} = \sqrt{(0.46 hPa)^2 + (0.34 hPa)^2 + (0.1\% \cdot 100 hPa)^2} = 0.58 hPa \quad (41)$$

viii) 결합된 유형 B 불확실성

각 빈의 유형 B 불확실성을 합하여 계산하면 (42)과 같다.

$$u_i = \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2}$$

$$u_i = \sqrt{\begin{aligned} & (0.52\% \cdot P_i [kW])^2 + (4.97 kW)^2 + \\ & c_{V,i}^2 ((0.104 m/s)^2 + (0.032 \cdot V_i [m/s])^2 + \\ & (0.0034 \cdot V_i [m/s])^2) + \\ & C_{T,i}^2 ((2.1 K)^2 + C_{B,i}^2 (0.58 hPa)^2) \end{aligned}} \quad (42)$$

각 변수들에 대해 결합된 B형 불확실성을 구할 때 센서 spec에 명시되어 있는 값들과 정확히 알 수 없는 값들은 가정을 통해 계산하였다. 이 때 가정된 값들과 명시된 값들을 타나낸 것이 Table. 10 이다.

Table. 10 Supposition Value of Uncertainty Factors

변 수	불확도	비고
유동 왜곡 불확도	3%	supposition
온도센서 불확도	1.11%	value
복사열 차폐	2°	supposition
측정채널 온도 범위	40°	supposition
대기압센서 불확도	0.46hPa	value
측정채널 압력 범위	100hPa	supposition
전류/전압/출력변환기 불확 등급	0.5	value(IEC 60688)
측정채널 전기 출력 범위	2,500kW	supposition
풍속계 보정의 불확도	0.78m/s	value
풍속계 작동특성 등급	1.2A	0.034m/s ± 0.0034 $V_i$
측정채널 풍속범위	30m/s	value
각 채널에 대한 데이터 처리 불확도	0.1%	supposition

ix) 결합표준불확실성- 출력곡선

각 빈의 출력곡선에 대한 결합표준불확실성은 모든 유형 B 불확실성에 유형 A 불확실성을 합하여 (43)과 같다.

$$u_{c,i} = \sqrt{s_i^2 + u_i^2} = \sqrt{s_{P,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2}$$

$$u_{c,i} = \sqrt{S_i^2 + (0.52\% \cdot P_i [kW])^2 + (4.97kW)^2 + c_{V,i}^2 ((0.104m/s)^2 + (0.032 \cdot V_i [m/s])^2 + (0.0034 \cdot V_i [m/s])^2) + C_{T,i}^2 ((2.1K)^2 + C_{B,i}^2 (3.0hPa)^2)}$$
(43)

Table. 11 는 각 빈에 대한 각각 요소들에 대한 불확도를 나타낸 표이다.

Table. 11 Factors of Uncertainty Values (Reference Density :1.281  $kg/m^3$ )

no.	빈 평균풍속 $V_i$ [m/s]	빈 평균출력 $P_i$ [KW]	전기 출력 불확도 $U_{P,i}$	민감 계수 $C_{V,i}$	풍속 측정 불확도 $U_{V,i}$	공기 온도 불확도 $C_{T,i}$ [KW/K]	대기압측정 불확도 $C_{B,i}$ [kW/hPa]	B형 복합 불확도 $U_i$
1	1.2798125	-1.9644375	6.300003515	-0.187369679	0.118169612	-0.006817413	-0.001939228	4.970080437
2	1.756169231	-2.053692308	6.300006619	3.026933272	0.124787132	-0.007127164	-0.002027337	4.984366782
3	2.248506024	-0.563421687	6.30001085	6.325825621	0.133144348	-0.001955307	-0.000556191	5.040863717
4	2.749191304	2.603826087	6.30001622	7.639814816	0.142949048	0.009036356	0.002570411	5.088628021
5	3.253611111	6.4575	6.300022718	23.07001467	0.153904704	0.022410203	0.00637463	6.108263879
6	3.765454545	18.26573554	6.300030428	34.16459121	0.165907847	0.063389677	0.018031328	7.540281675
7	4.245613445	34.67016807	6.300038683	41.36466074	0.177819562	0.120319861	0.03422524	8.882566185
8	4.740512821	55.14151282	6.300048226	48.46609396	0.190629455	0.191363917	0.054433872	10.50266216
9	5.267326923	80.67413462	6.300059541	0.469554644	0.20474653	0.279972704	0.07963883	5.023572293
10	5.756781457	80.90396026	6.30007112	79.11071108	0.218224604	0.280770294	0.079865706	17.97977842
11	6.25020979	119.9394266	6.300083834	75.09658307	0.232101975	0.416239551	0.118400224	18.15717412
12	6.752349206	157.648381	6.300097846	50.69869968	0.2464725	0.547105261	0.155625253	13.52420381
13	7.238188034	182.2797778	6.300112433	102.3911742	0.260576039	0.632586423	0.179940551	27.19080188
14	7.738125	233.4689107	6.3001285	88.39332749	0.27526154	0.810233943	0.230472765	24.92779675
15	8.256777778	279.3143556	6.300146303	78.75808776	0.290653793	0.96933665	0.275729867	23.57138926
16	8.7436	317.6555429	6.300164063	98.32049682	0.30522556	1.10239647	0.313579016	30.56893969
17	9.250746479	367.5184366	6.300183647	90.30573789	0.320515486	1.27544139	0.36280201	29.58431708
18	9.72540625	410.3829375	6.300202976	104.2173491	0.334914065	1.424198985	0.405116424	35.48908264
19	10.25702941	465.7872941	6.300225773	93.49744424	0.351128504	1.616475079	0.459809767	33.53873278
20	10.745384	511.4472	6.300247783	86.13089211	0.366094912	1.774933889	0.504883712	32.35995789
21	11.24723301	554.6719029	6.300271468	128.4337139	0.381537625	1.924941534	0.547553705	49.60427516
22	11.69425532	612.0846383	6.300293475	64.23173128	0.395340801	2.124187535	0.604229653	26.7279315
23	12.22175926	645.9671296	6.300320548	61.64512688	0.411680358	2.241773832	0.637677324	26.84373219
24	12.75986538	679.13875	6.300349395	102.4182248	0.42839925	2.356893111	0.670423248	44.82448585
25	13.24771795	729.1037436	6.300376622	18.70033107	0.443596388	2.53029236	0.719747032	12.88306071
26	13.73288095	738.1764524	6.300404711	29.72293439	0.458743276	2.561778422	0.728703309	16.90144752
27	14.25412121	753.6692424	6.300436016	5.748135249	0.475050107	2.615544829	0.743997278	10.57196628
28	14.719	756.3414286	6.300464918	32.42797772	0.489620293	2.624818423	0.746635171	18.90002779
29	15.1735	771.0799444	6.300494072	71.85043367	0.503887265	2.675967185	0.761184545	37.6890573
30	15.70514286	809.2787143	6.3005293	-34.29281768	0.520601065	2.808532758	0.798893104	21.00546006
31	16.1835	792.8745	6.300562033	-0.740823362	0.535660959	2.751603332	0.782699408	10.81626398
32	16.6766	792.5092	6.300596802	9.815786786	0.551204293	2.750335589	0.782338796	12.08239814
33	17.16625	797.3155	6.300632361	-4.22151597	0.566656688	2.767015443	0.787083416	11.13847762
34	17.69066667	795.1016667	6.300671586	-0.619040502	0.583224327	2.759332524	0.784897993	10.84983599
35	18.24825	794.7565	6.300714585	-26.83378202	0.600858598	2.758134652	0.784557256	19.42762025
36	18.71257143	782.297	6.30075141	11.78468149	0.615556965	2.71489502	0.772257651	12.88168362
37	19.2046	788.0954	6.300791443	-29.21058127	0.6311449	2.735017873	0.777981639	21.33356976
38	19.7792	771.311	6.300839508	27.04975663	0.649363821	2.676769044	0.761412636	20.45250915
39	20.149	781.314	6.300871119	5.054616385	0.661097101	2.711483602	0.771287266	11.14269967
40	20.66166667	783.9053333	6.300916084	0	0.677372992	2.720476604	0.773845344	10.66974385

A형 불확도와 B형 불확도 요소들을 합한 결합표준불확실성 값들을 그래프로 나타내면 Fig. 27처럼 나타난다. 이 그래프를 보면 와이블 분포 표와 비슷한 성향이 있는데 이것은 풍속 빈도수에 따라 불확실성 값이 크게 나타나고 있는 것으로 사료된다.

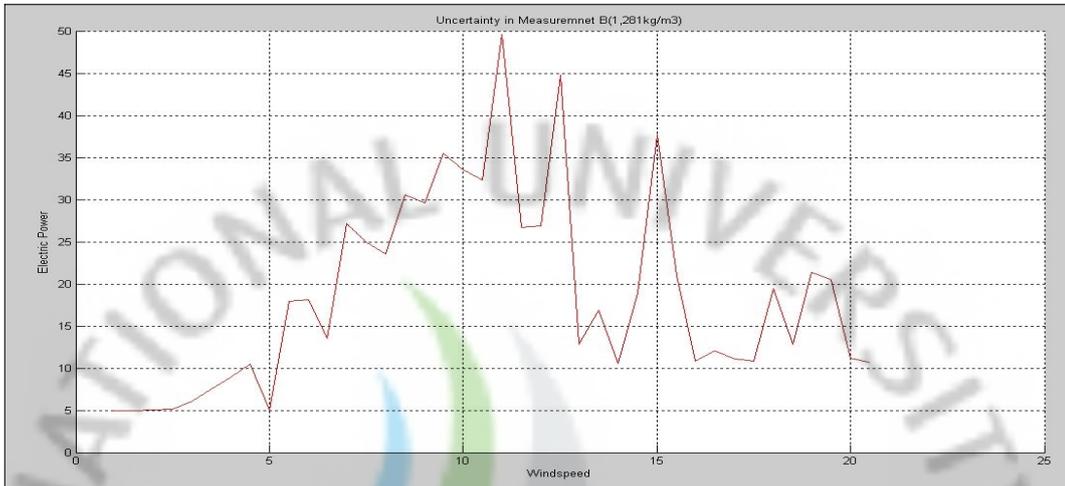


Fig. 27 Composition Standard Uncertainty

Fig. 28은 출력곡선에 대한 복합 표준불확실도 곡선을 나타내고 있다. 제조사에서 제공한 출력곡선과 복합불확실성이 포함된 출력 그래프를 비교해 보면 Fig. 29과 같다. Fig. 29을 보면 실제 측정값이 제조사에서 제공한 값보다

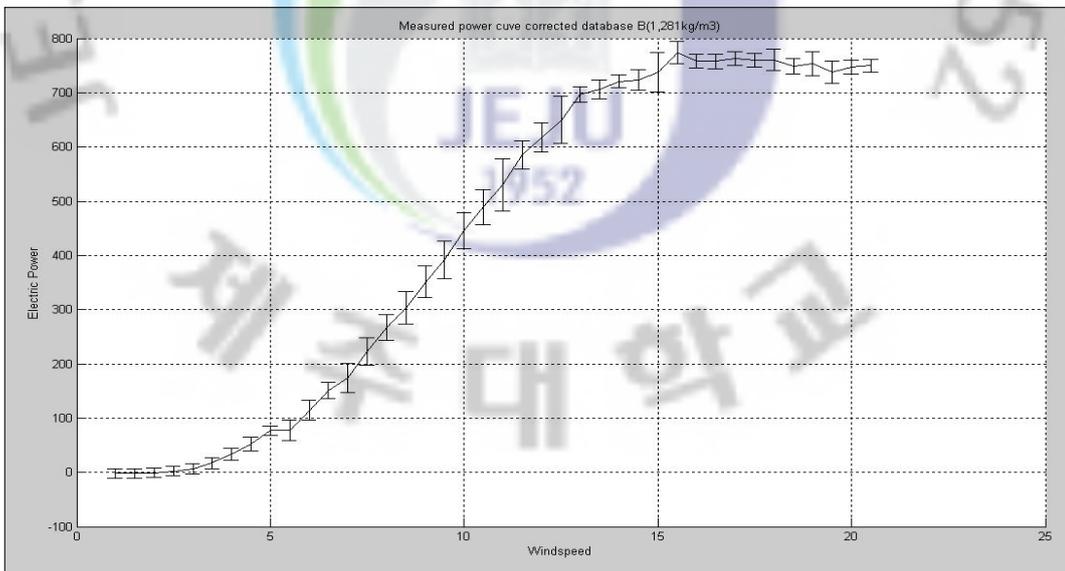


Fig. 28 Power Curve with Standard Uncertainty

높게 나타나고 있다. 또한 불확실 범위 내에 포함 되는 부분도 있고 포함 되지 않는 부분도 있다.

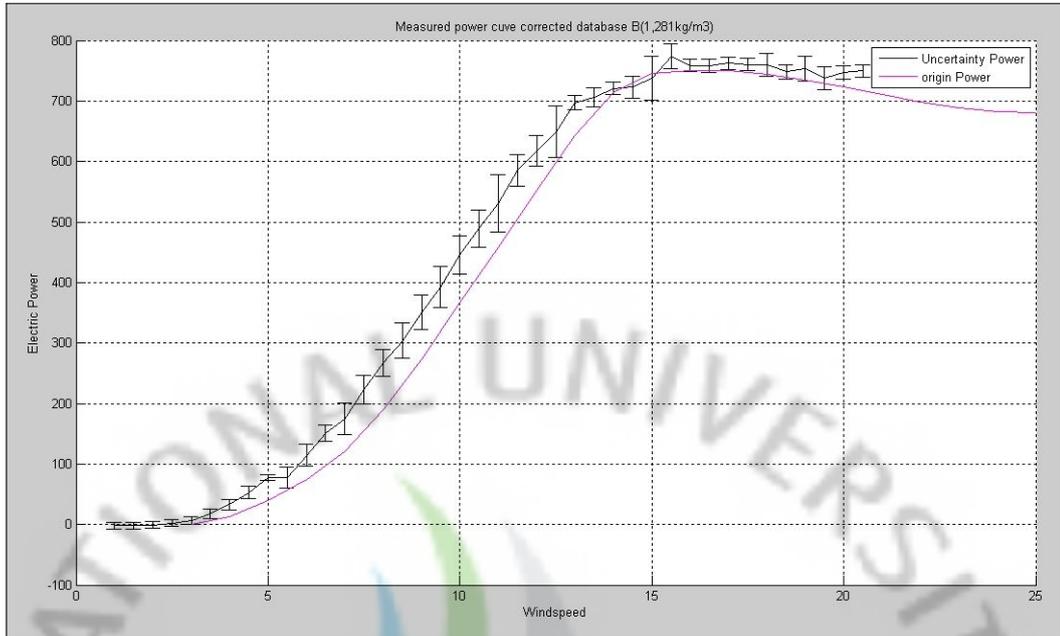


Fig. 29 Origin Power Curve and that with Standard Uncertainty Power Curve

Fig. 30을 보면 측정값들이 대부분 평균 보다 높게 나타나고 있다. 또한 풍속에 맞지 않게 상당히 높게 나타나는 값들도 있다. 모든 데이터가 불확실 부분에 포함되지 않고 있다.

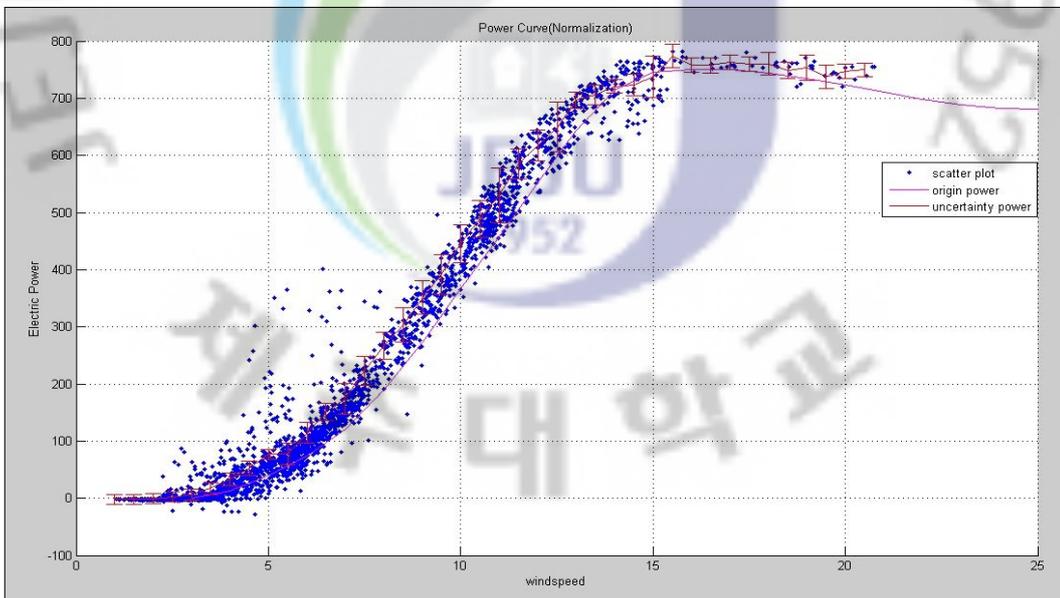


Fig. 30 Raw Power Data, Origin Power and Uncertainty Power Curve

이것은 여러 가지 이유가 있겠지만 그 중에 한 가지 이유는 기준공기 밀도가 제조사에서는 표준밀도( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )를 측정사이트에서는 평균밀도( $1.281$

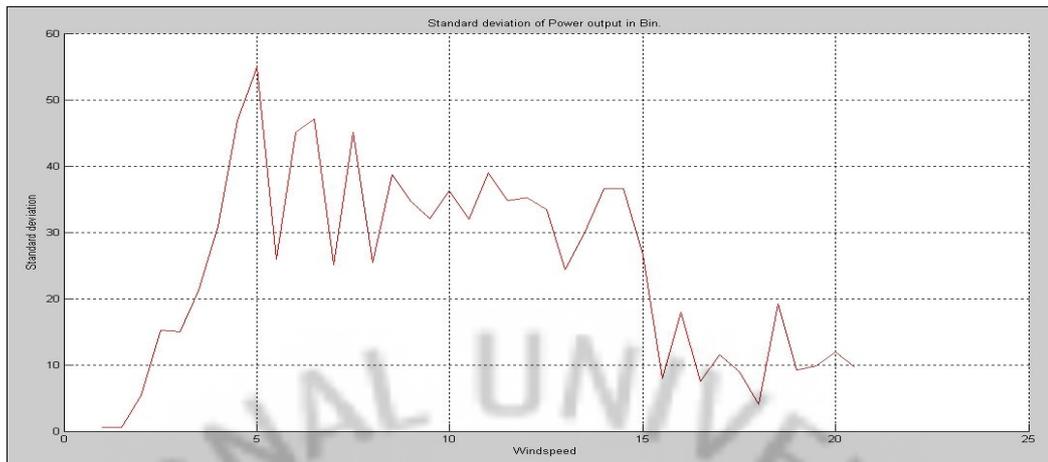


Fig. 31 Standard Deviation of Wind Speed

$kg/m^3$ ) 으로 다르기 때문인 것으로 사료되며 또 다른 이유는 데이터를 수집함에 있어 각 빈에 있는 데이터들이 산발적으로 분포하고 있어 정확한 값을 나타내고 있지 않기 때문이다. Fig. 31 을 보면 알 수 있듯이 빈 내에서 출력값에 대한 표준 편차 값이 높은 구간이 있다. 표준 편차는 값이 클수록 평균에서 떨어진 값이 많이 존재 하고 있다는 걸 나타내기 때문에 그래프 값이 높게 나타나는 구간에 빈 값은 정확하다고 볼 수 없다. Fig. 31 그림처럼 5m/s에서 15m/s 까지 표준 편차 값이 큰 걸 알 수 있다. 이 구간은 실제 측정값이 제조사에서 제공한 값보다 높게 나타난 부분과 일치 하는 걸 알 수 있다.

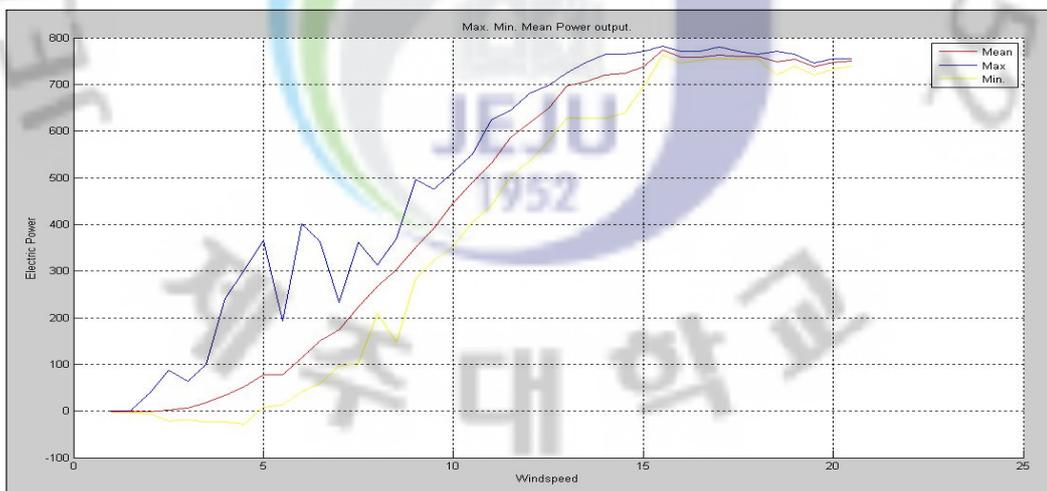


Fig. 32 Maximum, Minimum, and Mean Power Curve

Fig. 32을 통해서도 최대값과 최소값 사이가 너무 큰 차이를 보이는 구간이 있다는 걸 알 수 있다. 따라서 추후 발전기 성능을 평가 할 때에는 각 빈에 편차 범위를 정해 편차가 큰 데이터인 경우 신뢰성에 나쁜 영향을 주기 때문에

배제하는 게 평가에 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

앞에서 언급한 신뢰성에 악 영향을 주는 데이터를 배제하고 하기 위해서 적용한 것이 (44) 이다.

$$\sqrt{\frac{\sum(\overline{d}_i - \overline{\overline{d}})^2}{bin}} \quad (44)$$

$$\sqrt{\frac{\sum(P_i - \overline{P}_i)^2}{N}} = \overline{d}_i \quad (45)$$

여기서,

$P_i$  : bin 내 출력

$\overline{P}_i$  : bin 내 출력 평균

N : bin 내 데이터 수

bin : bin 데이터 세트 수

이다.

(44) 를 통해 계산한 결과 각 bin들의 표준편차가 24.81 값이 계산 되었다. 이 값을 통해 각 bin에 있는 데이터들 중 bin들의 표준편차 구간 내 ( $\overline{P}_i \pm 24.81$ ) 값들만 성능평가와 불확실성 평가에 적용하면 Fig. 33과 같다.

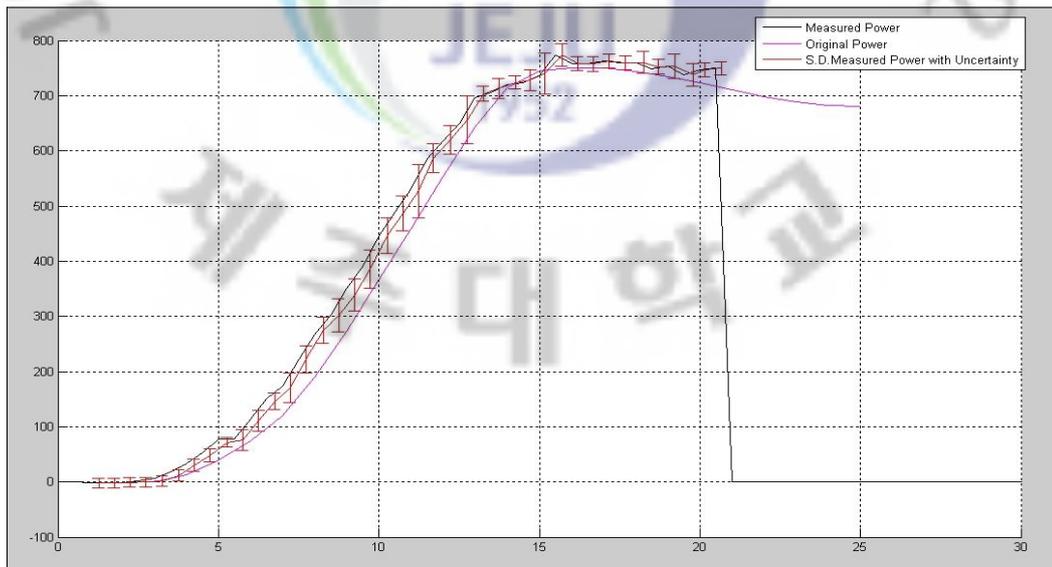


Fig. 33 Comparison of Power curves

기존 측정된 값 보다 전체적으로 낮게 나타나고 있고 불확실성 적용 그래프에 제조사제공 출력곡선이 포함되어 있다. 약간에 차이는 공기밀도차이 때문이다. 앞에서 언급했던 출력계수 값을 신뢰성을 낮추는 데이터를 제거한 후 출력계수를 보면 Fig. 34 와 같다. 신뢰성을 낮추는 데이터를 제거한 후 출력계수 최고 값을 보면 약 0.5 정도 이며 이 값은 행원지역이 상당히 좋은 풍황자원을 가지고 있음을 나타낸다. 신뢰성을 낮추는 데이터 제거 전 출력 계수 값은 너무 현실성이 떨어지는 값이었다.

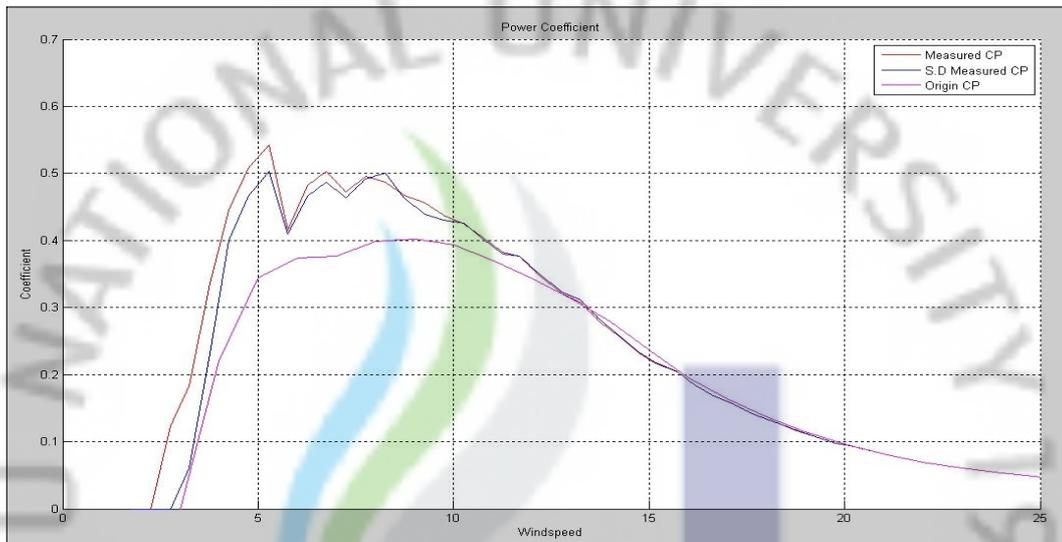


Fig. 34 Comparison of Power Coefficient curve

Table. 12 는 각 빈에 대한 모든 정보를 나타냈다. 빈에 서의 최대 출력과 최소 출력 그리고 표준 편차 등등 이다. 불확실성 평가에 있어 표준편차 범위에 따른 신뢰성이 부족한 데이터에 대한 불확실성 증가는 추후 더 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Table. 12 Information of Data set

Bin. no	Wspeed	Items	Sum	Mean	StDev.	Max.	Min.
1	1.279813	16	-30.057	-1.878	0.527	0	-3.11749
2	1.756169	65	-127.654	-1.96	0.539	0	-4.28511
3	2.248506	83	-44.7197	-0.538	5.42	37.89276	-5.37814
4	2.749191	115	286.3497	2.49	15.19	86.35246	-22.5999
5	3.253611	126	778.0758	6.17	14.99	62.93019	-18.8273
6	3.765455	121	2113.535	17.46	21.16	99.70984	-23.2167
7	4.245613	119	3945.389	33.15	30.9	242.2736	-23.8383
8	4.740513	117	6169.522	52.73	46.87	302.2862	-28.6321
9	5.267327	156	12034.99	77.15	54.93	364.2773	7.848224
10	5.756781	151	11682.44	77.367	25.96	193.6332	13.42145
11	6.25021	143	16401.55	114.6962	45.0919	400.882	41.8097
12	6.752349	126	18995.34	150.7566	47.11075	363.3105	58.01872
13	7.238188	117	20394.42	174.3113	25.13982	232.6697	96.15533
14	7.738125	56	12502.71	223.2626	45.1498	362.3083	101.0993
15	8.256778	45	12019.68	267.1039	25.4666	312.3846	208.4508
16	8.7436	70	21263.83	303.769	38.70079	369.227	147.1042
17	9.250746	71	24953.1	351.4521	34.60928	495.8706	284.9316
18	9.725406	64	25116.33	392.4427	32.10291	474.9452	323.0577
19	10.25703	68	30288.9	445.425	36.22848	511.9945	351.794
20	10.74538	125	61136.11	489.0889	31.92971	549.6253	404.622
21	11.24723	103	54633.67	530.424	39.02381	623.3643	440.1346
22	11.69426	47	27510.36	585.3268	34.77728	644.4714	501.7728
23	12.22176	54	33357.32	617.7281	35.20277	681.1583	535.6339
24	12.75987	52	33771.38	649.4496	33.4273	697.748	577.5172
25	13.24772	39	27191.98	697.2304	24.41905	725.2822	628.7148
26	13.73288	42	29648.07	705.9064	29.96087	747.5158	627.6581
27	14.25412	33	23783.82	720.722	36.59578	765.0436	626.5928
28	14.719	28	20251.77	723.2773	36.60416	764.5119	638.2518
29	15.1735	18	13272.69	737.3715	26.55325	770.3146	695.3869
30	15.70514	7	5417.303	773.9004	7.91727	781.878	762.2005
31	16.1835	2	1516.427	758.2133	17.91849	770.8836	745.543
32	16.6766	5	3789.32	757.864	7.565906	770.3117	751.427
33	17.16625	4	3049.841	762.4602	11.57623	779.6508	754.4317
34	17.69067	3	2281.029	760.3431	9.00561	770.5852	753.6648
35	18.24825	4	3040.052	760.013	4.081498	764.0787	754.8352
36	18.71257	7	5236.688	748.0982	19.1807	770.7067	720.9493
37	19.2046	5	3768.216	753.6431	9.253	763.765	738.981
38	19.7792	5	3687.962	737.5925	9.884956	745.0964	720.9704
39	20.149	3	2241.475	747.1582	11.92942	754.7578	733.4087
40	20.66167	3	2248.909	749.6362	9.648525	755.7217	738.5115

## 4. 결 론

본 연구는 풍력 발전기 출력성과 그에 따른 불확실성을 평가하기 위해 수행 하였다. 연구를 수행하기 위해 출력성과 불확실성을 평가할 수 있는 프로그램을 개발했고 그 프로그램을 통해 행원발전단지 내 6호기 인 NEG-MICON 750kW에 출력성을 조사 하였다. 풍력 발전기에서 데이터를 수집하기 위한 수집 장치를 설치하고 수집한 데이터와 마스터에서 측정된 기상 데이터를 이용하여 성능평가를 수행 하였다. 또한 성능 평가와 불확실성 평가를 위한 패키지를 개발하였으며, 이를 이용하여 불확실성을 평가함으로써 좀 더 성능평가에 신뢰성을 확보하였다. 불확실성 평가에 대해서는 ISO에 의한 불확실성 가이드를 기본으로 수행 하였지만 결과 값 분석하는 과정에서 성능평가에 신뢰성을 떨어뜨리는 데이터들로 인해 출력성이 너무 높게 나오는 경향이 있어 출력에 대한 신뢰성 확보 구간을 정해 구간 내 데이터만 성능 평가에 적용하여 성능을 평가하였다.

6호기 NEG-MICON 750kW를 평가한 결과 성능이 상당히 양호한 것을 알 수 있었다. 발전기 성능을 말하는 지표인 출력계수는 약 0.5 정도로써 상당히 높은 값이다. 그러나 이것은 행원지역 공기 밀도는 기준 공기밀도 보다 높게 측정되었기 때문에 에너지 밀도가 높아서 일수도 있기 때문일 수도 있다. 공기 밀도는 공기온도에 대한 함수로서 계절에 따라 변하기 때문에 항상 위 값과 같은 출력계수를 보이지 않을 가능성도 있다.

실속 제어형 풍력발전 방식은 너무 심한 바람이 불 경우 회전자가 시스템이 안전 범위 이상으로 회전 할 수 있기 때문에 이것을 방지하기 위해 날개 형상에서 스톨을 발생 시켜 어느 이상 풍속에서 기체를 보호해야 된다. 하지만 본 실험에서 출력 값을 통해 분석해 본 결과 20m/s 이상 되는 풍속에서 실속이 발생 하여 기체를 보호해야 함에도 불구하고 실속 발생이 잘 되고 있지 않는 것으로 나타났다. 이것은 추후 장기간 운전을 함에 따라 기체에 상당한 피로를 주고 안전에 문제가 될 수도 있을 것 같다.

행원지역 바람 데이터를 통해 바람 확률 분포포를 분석해 본 결과 평균 풍

속은 7.13m/s 이고 5m/s ~ 8m/s 에 바람이 가장 많이 불고 있는 것으로 나타났다. 이것을 통해 풍력발전기 Cp 값을 비교해 행원 지역에 가장 적합한 풍력발전기를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 NEG Micon750 과 비슷한 출력을 내는 3기종(E48, EW750, FL800)을 분석해 본 결과 Fuhrland 사의 FL800 이 가장 적합한 기종으로 분석됐다.

이번 연구를 계기로 만약 단지 내 모든 기종에 대해 본 연구에서 개발한 패키지를 이용하여 성능을 평가한다면 기종별 특성을 파악 할 수 있고 더 나아가서는 단지에 대한 평가 그리고 단지 설계와 외래 기종 선택 시 제주 지역에 맞는 기종 선택에 중요한 데이터가 될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 발전기들 간에 후류영향으로 인한 발전량 감소 값을 좀 더 구체적으로 연구 할 수 있을 것으로 예상된다.



## 5. 참고문헌

- [1] 김현구, 최재우 (2002) 풍력에너지 이용 및 개발현황, RIST 연구논문, 16(4), 479-485.
- [2] Breeze, P. (2004) The Future of Global Offshore Wind Power: The technology, economics and impact of wind power generation, Reuters Business Insight.
- [3] 김현구의, “한반도 바람지도 구축에 관한 연구” 한국대기환경학회지 제 21 권 제 1 호  
J. KOSAE Vol. 21, No. 1 (2005) pp. 63~72
- [4] 足利工業大學大學院教授牛山泉 일본 풍력에너지협회회장 “일본 풍력발전의 현황과 표준화 동향”
- [5] J.F Manwell, J,G McGowan A.L Rogers, Wind Energy Explained, JOHN WILEY &SONS,LTD, 2002
- [6] 이영호 1999, “ISO에 의한 불확실성 해석의 기초 및 적용” 대한기계학회 1999년도 춘 계학술대회논문집 B pp. 8 ~ 19
- [7] 경남호, 윤정은, 정문석, 장동순, 허종철, 2003, "복잡지형에서의 WASP 예측성 향상 연구" 한국태양에너지학회 논문집 Vol. 23, No. 4, 2003.
- [8] IEC, KS C IEC 61400-1 : 2004 Wind turbine generator systems - Part 1 Safety requirements.
- [9] KS C IEC 61400-12-1: 2007 Wind turbines - part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- [10] 고경남, 허종철, 2006, “풍력공학입문”, 문운당 출판사.
- [11] 김건훈외, 제주도내 풍력발전 단지 성능 모니터링 및 평가(I), 20023. 김건훈외, 풍력 자원 정밀조사 및 분석, KIER,1999,
- [12] 김건훈외, 중형급 풍력발전시스템 운영기술개발(I), 전력연구원, 19975. 김건훈외, 중형급 풍력발전시스템 운영기술개발(II), 전력연구원, 1998
- [13] IEA, 1990, IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation-Power Performance Testing, 2nd Ed.
- [14] IEA, IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation-Measurement of Noise Emission from Wind Turbines and Fatigue Loads, 2nd Ed., 1988
- [15] Germanischer Lloyd, Testing of Wind Turbines, 1994
- [16] 허종철외,2004,“제주도내 풍력발전 단지 성능 모니터링 및 평가”, 제주도청

## 감사의 글

2009년 1월 논문을 마치

며...

