

碩士學位論文

소형 풍력발전기 성능 특성 평가에  
관한 연구



濟州大學校 大學院

機械工學科

林 致 運

2008年 8月

# 소형 풍력발전기 성능 특성 평가에 관한 연구

指導教授 許 鐘 哲

林 致 運

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 8月

林致運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

2008年 8月

**A Study on the Characteristics of the Performance  
for the Small Wind Turbine**

Chee-Woon Leem

(Supervised by professor Jong-Chul Huh)

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

Department of Mechanical Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHE-JU NATIONAL UNIVERSITY

2008. 8.

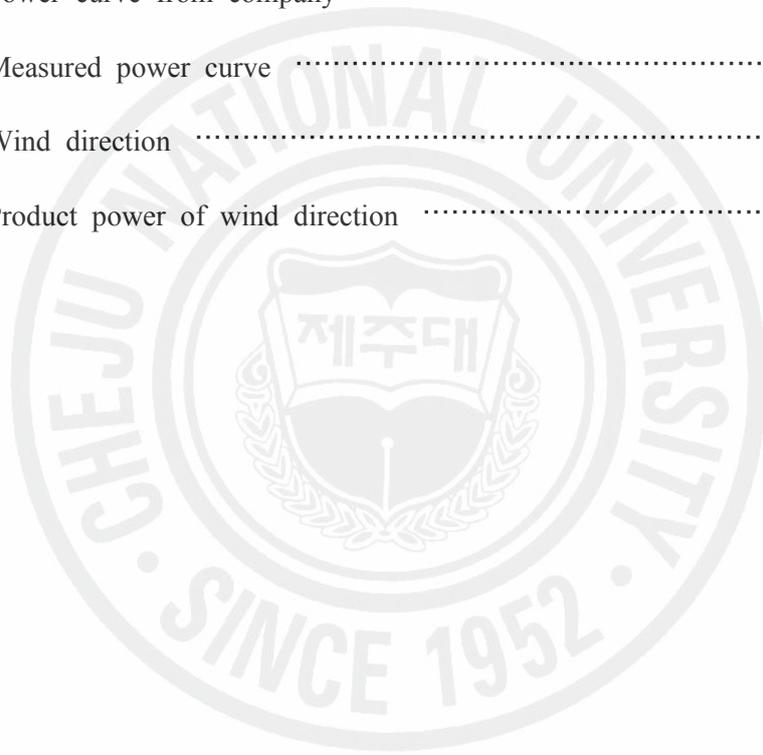
# 목 차

List of figures .....	ii
List of table .....	iv
Summary .....	v
1. 서론 .....	1
1.1. 연구배경 및 목적 .....	1
1.2. 소형 풍력발전기 기술규격(IEC 61400-2) .....	3
2. 실험장치 및 방법 .....	14
2.1. 소형 풍력발전기의 사양 및 설치위치 .....	14
2.2. 측정 장비 및 데이터 취득방법 .....	21
3. 실험결과 및 고찰 .....	29
3.1. WindPRO를 이용한 풍황분석 .....	29
3.2. WAsP를 이용한 분석 .....	37
3.3. 소형 풍력발전기의 출력성능 .....	41
4. 결 론 .....	47
5. 참고문헌 .....	48

## List of figures

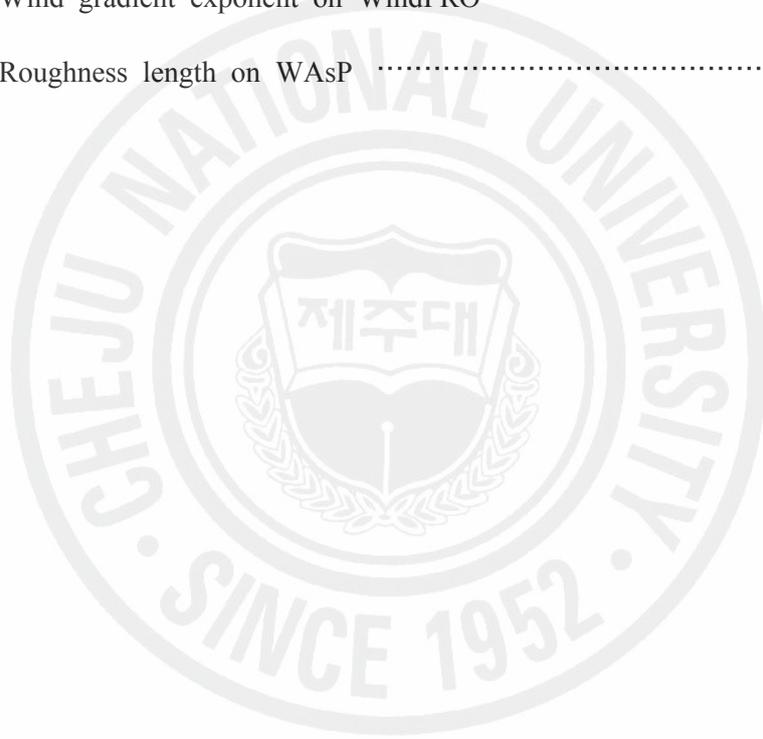
Fig. 1-1 The rod map of this study .....	2
Fig. 2-1 Install of small wind turbine .....	14
Fig. 2-2 Power curve .....	15
Fig. 2-3 Wind turbine blade .....	16
Fig. 2-4 Electric power converter .....	17
Fig. 2-5 Dump load system .....	18
Fig. 2-6 Brake system .....	19
Fig. 2-7 Diagram of small sind turbine system .....	19
Fig. 2-8 Installation site in hangwan wind farm .....	20
Fig. 2-9 Appropriation measurement sector of meteorological mast .....	22
Fig. 2-10 Small wind turbine and EZ-SCOPE system .....	23
Fig. 2-11 #9300 Wind data logger and meteorological mast .....	24
Fig. 2-12 The meteorological mast .....	27
Fig. 2-13 Consist of small wind turbine .....	28
Fig. 3-1 Wind speed VS. time .....	29
Fig. 3-2 Wind direction VS. time .....	30
Fig. 3-3 Hourly wind speed and wind direction .....	30
Fig. 3-4 Wind frequency and weibull distribution .....	31
Fig. 3-5 Wind roses .....	32
Fig. 3-6 Energy rose .....	32

Fig. 3-7 Average characteristic turbulence .....	34
Fig. 3-8 Wind profile on WindPRO .....	36
Fig. 3-9 WAsP Program .....	37
Fig. 3-10 The wind speed map of WAsP .....	40
Fig. 3-11 The wind power density of WAsP .....	41
Fig. 3-12 Monthly air density .....	43
Fig. 3-13 Power curve from company .....	44
Fig. 3-14 Measured power curve .....	44
Fig. 3-15 Wind direction .....	45
Fig. 3-16 Product power of wind direction .....	46



## List of Tables

Table 1-1. Design of load condition in small wind turbines .....	13
Table 2-1. Specification of small wind turbine .....	15
Table 2-2. Specifications of sensors .....	25
Table 3-1. Roughness class on WindPRO .....	35
Table 3-2. Wind gradient exponent on WindPRO .....	36
Table 3-3. Roughness length on WAsP .....	39



## Summary

For the fundamental study on a small wind turbine, the performance of the small wind turbine and wind resource were measured in Hangwon wind farm on Jeju island. The small wind turbine with rated power of 720W and 10m in height was installed in the wind farm. Also the meteorological mast with 10m in height was installed near the small wind turbine for measuring wind data. Using WindPRO and WAsP, wind characteristics such as average wind speed, wind direction and turbulence intensity were analyzed in detail. As a result, wind conditions in Hangwon wind farm were found to be suitable for the performance testing for the small wind turbine. The power measured from the small wind turbine was a little smaller than that from manufacturer. Since that came from a technical error, the measured power curve could be similar to manufacturer's. In this study, the problem about yawing of the small wind turbine occurred during performance testing. Accordingly, when a small wind turbine was installed at a site, it would be important to erect without having a tilt any directions. Also it is necessary to investigate on design, structure and weight for the fantails of small wind turbines.

# 1. 서론

## 1.1. 연구배경 및 목적

지구는 현재 오존층의 파괴로 인하여 이상기후현상이 발생하고 있으며, 심각한 지구 자연 파괴에 대하여 세계 각국은 여러 가지 대안을 강구하고 있는 실정에 있다. 화석연료의 고갈로 대두된 에너지 위기의식과 더불어 미래 에너지 자원에 대한 인류의 희망은 최종적으로 환경을 파괴하지 않고 에너지를 생산 할 수 있는 방안을 연구 개발하고 있는 실정이다.[1] 지구로 흡수되어진 태양에너지는 약 30%정도는 바람의 에너지로 변환되어 진다고 알려져 있다. 태양에너지의 약 30%의 바람에너지를 이용하면 지구온난화의 주범인 화석연료와는 정반대로 환경을 파괴하지 않고 에너지를 생성할 수 있으며, 그 에너지는 인류문명의 가장 중요한 전기에너지로 변환되어 인류에게 큰 이득을 줄 것으로 생각된다. 또한 풍력에너지는 에너지 위기 이후 학문적 이론과 신기술의 도입과 집중투자에 의하여 소형에서부터 MW급 발전시스템에 이르기까지 많은 연구 결과를 남겼으며 이러한 연구 결과들은 상업화로 이어져 그 수요가 날로 증가하고 있으며 여러 나라에서 자체 개발에 노력하고 있다. [2, 3, 4]

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 요구되어지고 있는데 특히 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 다량의 풍속 지역에 속하기 때문에 풍력의 이용이 유리하다고 하겠다. [5, 6]

그러므로 본 연구는 이러한 자연환경의 파괴와 에너지고갈의 문제점에 대처할 수 있는 대체에너지 중에서 풍력발전에 관심을 두고 있었으며, 이러한 관심의 산물로 소형 풍력발전기 연구에 임하게 되었다.

소형 풍력발전기는 일찍이 여러 나라에서 관심을 가지고 연구하였으며, 특히 일본, 유럽 지역과 중국지역에 다수의 소형풍력발전기가 도입되어 실용화 되고

있으나 우리나라는 지형의 유리함을 가지면서도 소형풍력발전기 연구 등이 활발히 이루어지지 못한 것이 사실이다. [7]

본 연구는 유사한 경험의 실험을 격어보지 못하여 실험의 진행에 있어 여러 가지 시행착오를 경험하리라 예상 되어, 최대한 시행착오를 줄이기 위하여 Fig. 1-1과 같은 절차로 연구 전반에 걸친 사전 로드맵을 작성 한 후 진행하였다.

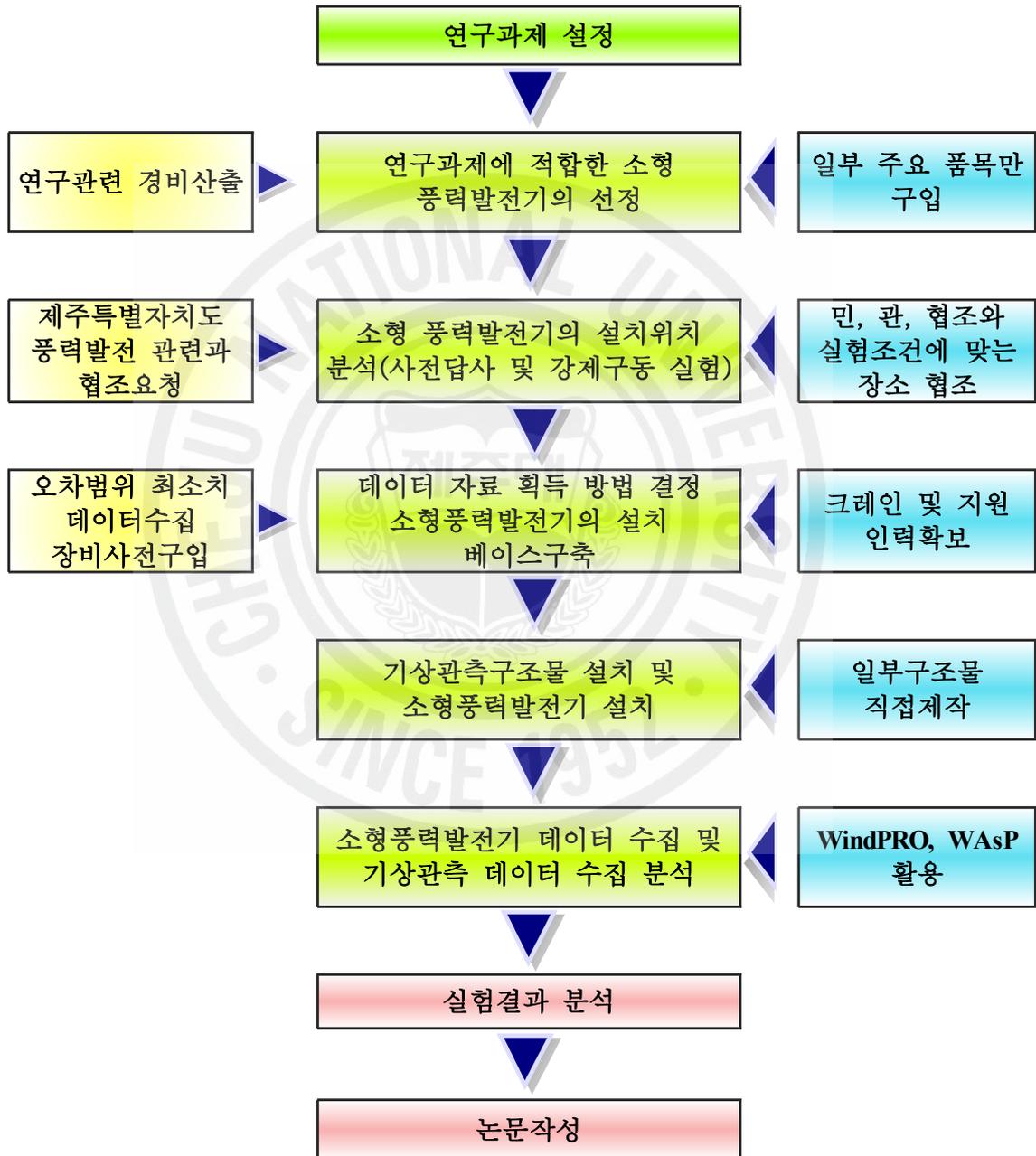


Fig. 1-1 The road map of this study

위 로드맵의 내용을 살펴보면 제일먼저 소형풍력발전기의 여러 가지 유형을 분석하는 것이 무엇보다도 우선이라고 생각하였고 본 연구에 맞는 기술력과 데이터 획득에 오차가 적은 소형풍력발전기의 선정을 최우선으로 하였다.

소형 풍력발전기의 설치 장소는 아주 중요하다. 요즘은 민원을 야기하는 소지가 있는 곳과 정부계획지역의 설치가 배제되어야 하는 이유로 사전 설치지역의 탐방이 무엇보다 중요하였으며 선정위치의 풍황분석의 데이터가 나올 가능성이 없는 숲 지역이나 지형지물의 다수지역을 벗어나는 것이 기본적인 연구를 수행함에 있어 중요한 요건이므로 장시간 설치장소의 탐방이 이루어지고서 현재 제주특별자치도가 추진하고 있는 행원지역 풍력발전 단지 내 10호기 옆에 최종적인 동의를 득하고 설치하였으며, 각각의 성능검사는 소형풍력발전기 국제 기술규격에 의해서 국내 실정에 적합하도록 만들어진 소형 풍력발전기의 설비심사기준에 따라서 설치를 하였다.

따라서 본 연구논문 에서는 소형풍력발전기의 설치과정, 측정 장비 및 데이터 획득방법, WindPRO, WAsP 등을 이용한 풍황분석, 소형 풍력발전기의 성능에 관하여 연구 하고자 한다.

먼저 소형 풍력발전기술의 성능평가를 위해서는 규격화나 표준화의 내용이 중요하며, IEC(International Electrotechnics Commission)에서 소형풍력발전기에 대한 기술규격을 규정하고 있다. IEC에서 제정한 풍력성능 시험 또는 기술규격의 표준목록을 살펴보고자 한다.

## 1.2. 소형 풍력발전기 기술규격(IEC 61400-2)

### 1.2.1. 적용범위 및 목적

이 기준은 소형 풍력발전기의 최소 안전 기준의 개요와 성능시험 방법을 명기한 것으로, 완성된 설계서 또는 사용 설명서로 이용하도록 의도된 것은 아니며, 이 규격에 따른다고 해서 어떤 설계자, 설계기관 또는 기업이 다른 관련 기준을 준수할 책임이 면제되는 것은 아니며, 아울러, 안전성 및 성능에 대해 포괄적인

면책권을 부여하는 것도 아니다. 이 규격은 소형 풍력발전기의 안전 개념, 품질 보증 및 기술의 다양성과 성능시험 방법을 다룬 것으로 설계, 설치, 정비 및 지정 환경 조건 하에서의 운전을 포함한 모든 안전 및 성능시험 기준을 규정한다. 이 기준의 목적은 소형 풍력발전시스템들의 계산 수명 기간 동안 생기는 모든 위험 요인에 대해 적절한 수준의 예방 조치와 최저의 기준 성능시험 방법을 규정하는 것으로 되어있다.[8]

이 기준은 소형 풍력발전기의 다음과 같은 모든 부속시스템에 대해서 규정하고 있으며, 부속장치로는 보호 장치, 내부 전기장치, 기계장치, 지지 구조물, 기초 및 부하 설비에 대한 전기적인 접속 장치 등을 의미한다. 이 규격은 회전자 회전 면적이 40m<sup>2</sup>이하, 교류 1000V 또는 직류 1500V 미만의 전압으로 발전하는 SWTGS에 적용하며, 이 규격은 적절한 IEC 및 ISO 규격과 함께 사용해야 한다.

### 1.2.2. 용어의 정의

이 IEC 61400-2 규격에 이용되는 주요 용어의 정의는 다음과 같다.

- **제동장치(풍력발전기)[Brake(Wind turbines)]** 로터를 감속시키거나 회전을 정지시킬 수 있는 장치.
- **제어 시스템(풍력발전기)[Control systems(Wind turbines)]** 풍력발전기나 운전환경 상태에 대한 정보를 받아들여 풍력발전기의 운전 상태를(정해진) 한계 내로 유지하기 위해 조절하는 서브시스템.
- **시동 풍속(Vin)[Cut-in wind speed]** 허브 높이의 풍속으로서 풍력발전기가 발전을 개시하는 최저 풍속.
- **중단 풍속(Vout)[Cut-out wind speed]** 허브 높이에서의 풍속으로서 풍력발전기가 발전하도록 설계된 최대 풍속.
- **설계 한계[Design limits]** 설계에 사용되는 최대값 또는 최소값.
- **설계 조건[Design situation]** 풍력발전기 운전의 다양한 모드(예를 들어 발전, 정지 등).
- **외부 조건(풍력발전기)[External conditions(Wind turbines)]** 풍력발전기 운전에 영향을 주는 요소로서 바람의 조건 및 그 밖의 기상 조건(눈, 얼음 등), 전기적

부하 및 지내력(地耐力)등.

- **페일 세이프**[Fail-safe] 단순고장이 중대한 결함으로 발전하는 것을 방지하기 위한 설계상 특성.
- **돌풍**[Gust] 풍속의 일차적인 변화로, 상승 시간, 진폭 및 지속 시간으로 규정된다.
- **수평축 풍력발전기**[(Horizontal axis wind turbines(HAWT)] 날개 회전축이 바람의 흐름에 대하여 평행인 풍력발전기
- **허브**[Hub] 날개 또는 날개 조립 부품을 로터 축에 설치하는 고정부품
- **허브 높이**(풍력발전기)[Hub height(Wind turbines)] 지표면으로부터 풍력발전기 로터의 중심까지의 높이. 수직 축 풍력발전기인 경우 허브 높이는 적도면의 높이이다.
- **아이들링**(풍력발전기)[Idling(Wind turbines)] 풍력발전기가 저속 회전하고 발전을 하지 않는 상태.
- **한계 상태**[Limit state]구조물 및 그와 관련된 하중의 상태로, 이 상태를 넘으면 구조물이 설계 요구 사항과 맞지 않게 되는 상태(ISO 2394)[비고 : 설계 계산(즉 한계 상태에 대한 설계)의 목적은 한계 상태가 되는 확률을 해당 구조물에 정해진 어떤 값 이하로 억제하는 것이다.]
- **하중 조건**[Load case] 설계 상황과 외부 상태의 조합이며, 그 결과로서 구조에 일정한 부하가 걸리도록 설정된 조건.
- **평균 풍속**[Mean wind speed] 풍속의 순간 값을 일정 시간 내에서 통계적으로 평균한 것. 일정 시간은 수초에서 수 년 내의 시간이다.
- **나셀**[Nacelle] 수평축 풍력발전기의 타워 정상부에서 동력 전달 장치, 그 밖의 장치를 내장하는 동체.
- **파킹**[Parking] 풍력발전기가 평상 정지 후로 되돌아가는 상태.
- **출력**[Power output] 장치가 규정된 형태로 규정된 목적을 위해 공급하는 출력.
- **보호시스템**(풍력발전기)[Protection system(Wind turbines)] 풍력발전기가 설계 한도 이내에서 벗어나지 않도록 하는 시스템.
- **정격 출력**[Rated power] 설비의 일정 운전 상태에서 통상적으로 제조업자가 보증하는 출력의 양.[비고: 풍력발전기-정상 운전 조건 하에서 소형 풍력발전

- 기가 공급하도록 설계된 최대 연속 전력]
- 정격 풍속( $V_R$ )[Rated wind speed] 풍력발전기의 정격 출력을 생산하는 지정 풍속.
  - 기준 풍속( $V_{exr}$ )[Reference extreme wind speed] 10분 동안의 평균 풍속으로 높이는 허브높이, 재현시간은 50년 주기.
  - 날개 회전속도(풍력발전기)[Rotor speed(Wind turbines)] 풍력발전기 로터의 회전 속도.
  - 안전 수명[Safe Life] 중대한 고장에 대해서 안정적으로 정해진 실용적 수명기간
  - 정지(풍력발전기)[Shut down(Wind turbines)] 발전과 정지 또는 아이들링 사이에 있는 풍력발전기의 과도적 상태.
  - 지지 구조(풍력발전기)[Support structure(Wind turbines)] 타워와 기초를 구성하는 풍력발전기의 부분.
  - 회전자 회전 면적[Swept area(for HAWT)] 회전 중에 날개의 끝이 그리는 원을 풍속벡터와 수직인 면에 대해 투영한 면적
  - 난류 강도[Turbulence intensity] 풍속 표준 편차의 평균 풍속에 대한 비
  - 윈드 시어[Wind shear] 풍속과 수직인면 내에서의 풍속변화
  - 풍속[Wind speed] 공간 내 특정한 한 점에서의 풍속은 그 점을 둘러싸고 있는 소량의 공기의 운동 속도[비고 : 풍속이란 하나의 국소 풍속 벡터의 길이]
  - 풍력발전시스템[Wind turbine generator system] 바람의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 장치.
  - 요 운동(수평축 풍력발전기의)[Yawing(For HAWT)] 회전축이 지지구조상에서 수직방향의 축을 중심으로 회전하는 것.[9, 10, 11]

### 1.2.3. 품질 보증

품질 보증은 소형 풍력발전기 전체 또는 각 부품을 설계하고, 조달하고 제조하는 현장에서 또는 조립, 설치 및 운전, 정비에 관한 기록을 할 때 필수불가결한 요소로서, 품질 시스템은 ISO 9001, ISO 9002 및 ISO 9003의 요구에 만족하여야 한다.

#### 1.2.4. 안전

소형 풍력발전기의 안전 평가기준은 다음과 같이 기술한다.

##### 1.2.4.1 일반

일반기술의 안전성이란 구조, 기계, 전기 및 제어 시스템의 설계를 통괄하는 것으로서, 기술의 안정성을 달성하려면 이 기준의 설계, 제조 및 품질 관리에 관한 요구 사항을 준수해야 한다. 현재의 기술을 조합하여 소형 풍력발전기의 설치, 운전 및 정비에 이용하되, 이 기술에 확립된 안전 절차를 준수해야 한다. 소형 풍력발전기의 안전 설계 평가는 부하가 걸린 구성 부품의 구조적 안정성을 검증하는 것을 기본으로 하며, 소형 풍력발전기의 구조상 안전성이 적정한 수준에 있는지 나타내기 위하여 소형 풍력발전기의 강도부재의 파괴강도 및 피로 강도가 실험적으로 또는 계산상 검증되어야 한다. 구조 설계는 적용 가능한 경우 ISO 2394를 기본으로 하며, 구조 설계 또는 강도 시험에 따라 설계 하중이 대응 부재의 내력 이상이 아닌지 검증하고 안전 기준이 적정한지 확인한다.

##### 1.2.4.2 안전 설계 외부 조건

소형 풍력발전기의 설계 시, 각 조항별로 설명한 외부 조건에 대해 고려해야 한다. 엔지니어 또는 시스템 소유자는 실제 설치 예정지의 조건이 대상이 되는 풍력발전시스템의 설계조건으로 정한 조건보다 엄격하지 않다는 점을 확인해야 한다. 특수한 설계 조건이 필요한 경우, 특수 설계조건을 적용하며, 특수 조건의 외부 조건 값은 설계자가 결정하여 지정한다. 일반적인 표준상태에서의 외부 조건에 대해 다음 값을 고려해야 한다.

- 기준 풍속( $V_{\text{ext}}$ )은 허브 높이에서 35m/s
- 정상시의 시스템 가동 온도 범위는  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서  $40^{\circ}\text{C}$
- 이상시의 시스템 가동 온도 범위는  $-20^{\circ}\text{C}$ 에서  $50^{\circ}\text{C}$
- 상대 습도는 95%
- 대기의 함유물은 오염되지 않은 내륙부의 대기와 동일한 수준.
- 표준 공기 밀도  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

#### 1.2.4.3 안전 기능

안전 기능이 필요한 경우, 보호 시스템을 마련하여 소형 풍력발전기를 설계 한계에서 벗어나지 않도록 한다. 특히 적절한 수단을 강구하여 회전 속도 설계 한계  $n_{max}$ 를 넘지 않도록 한다. 소형 풍력발전기의 정지를 위한 안전 순서 또는 과정은 제조업자가 정해야 한다. 그러나 소형 풍력발전기의 보호를 위하여 다음과 같은 조건을 만족하여야 하며, 이를 보호 안전기능 평가의 조건으로 한다.

- 제어 및 보호 시스템을 조합할 때는 페일 세이프로 설계되어야 한다. 일반적으로 어떠한 단일 고장, 전원 고장 또는 보호 시스템 내의 교환 부품 고장으로 부터도 소형 풍력발전기를 보호해야 한다.
- 보호 기능이 제어 기능과 경합하여 충돌할 경우 제어 기능보다 우선해야 한다.
- 보호 시스템은 풍력발전기가 수동 또는 자동 제어 하에 있을 때 만족스럽게 작동해야 한다.
- 적절한 수단을 강구하여 보호 시스템이 우발적 또는 무단으로 개조 및 변경되지 않도록 해야 한다.

#### 1.2.4.4 지지구조

지지구조는 소형 풍력발전기의 주요 부분으로서, 앞서 언급한 안전율도 포함하여 적절한 설계 부하에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 지지구조는 인간 또는 가축이 소형 풍력발전기 가동부와 접촉되지 않는 구조로 설계/제작되어야 한다.

#### 1.2.4.5 타워

타워는 자립 상태이거나 또는 지선으로 지지되어 있다. 타워는 소형 풍력발전 시스템 설계에 적절한 최대 부하에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 모든 부품은 용도에 맞는 재료로 제작하며, 수명이 긴 환경처리, 예를 들면 도금 또는 양극 산화처리가 되어 있어야 한다. 모든 볼트 및 체결 부품을 준비하여 체결 토크를 지정해야 하며, 해당될 경우, 적당한 지침을 제시하여 체결 수단을 명기해야 한다. 종류가 다른 재료를 사용할 때에는 주의를 기울여 전기 접촉이 일어나

지 않도록 해야 한다.

#### 1.2.4.6 기초부 및 앵커

기초부 및 앵커는 소형 풍력발전기 설계 부하에 적합하게 설계해야 하며, 토양 조건도 고려해야 한다.

#### 1.2.4.7 그 밖의 지지 구조

고정 기구 및 설치 기구는 부하에 적합한 것을 사용하고 소형 풍력발전기를 현재의 구조물에 고정할 경우 주의를 기울인다. 이것도 마찬가지로 설계 부하 및 부식 보호 관점에서 고려해야 한다. 특수 환경의 소형 풍력발전기, 예를 들어 선박에 탑재되는 전지 충전용일 경우, 그 설계 및 장소에 적합한 고정 기구를 사용해야 한다. 이와 같은 특수 환경일 때에는 일반인이 근접하지 않기 때문에 작동하는 부근을 방호할 필요는 없다.

#### 1.2.4.8 전기시스템

소형 풍력발전기의 전기 시스템 및 여기에 사용할 각 전기장치는 관련 기준에 적합해야 한다. 각 전기장치는 설치 장소의 설계 환경 조건과 소형 풍력발전기가 운전 중에 받는 물리적, 화학적, 열적 응력에 견뎌야 한다. 그러나 만일 전기장치가 설계상 사용 장소에 맞는 성질을 가지지 못한 경우에도 다음과 같은 조건에서는 사용해도 된다. 즉 소형 풍력발전기의 전기장치 전체의 일부로서 적절한 추가 보호 장치가 마련되어 있을 때이며, 예상 전기적 부하 조건을 고려하여 선택해야 한다.

#### 1.2.4.9 전자(電磁) 방해

전기 부품은 전자 방해에 대해 적절한 수준의 방해 배제 능력을 갖추고 있어야 한다. 전기 부품을 선택할 때에는 전기 시스템 전체에 들어 있는 다른 전기 부품에 나쁜 영향을 주지 않는 것을 선택해야 한다.

#### 1.2.4.10 운전 조건

제조업자는 해당 범위 내에서는 풍력발전기 전기 시스템이 손상되지 않게 운전할 수 있는 다음에 대한 자료를 제시하여야 한다.

- 정격 전류
- 정격 전압 및 풍력발전기에 연결 시 허용되는 편차
- 풍력발전기 정격 회전 수

#### 1.2.4.11 직 · 간접 접촉에 대한 보호

인간 및 가축은 소형 풍력발전기의 충전부에 직접 또는 간접적으로 접촉할 위험으로부터 보호되어야 한다. 모든 충전부에 대한 직접 접촉은 적어도 IP23으로 보호되어야 한다.

#### 1.2.4.12 스위치 장치

적절한 장치에 구비되어 있어 소형 풍력발전기의 전기 시스템 또는 서브시스템을 발전부에서 분리할 수 있어야 한다. 이것은 방호, 정비, 시험, 고장 발견 또는 수리시 필요하다.

#### 1.2.4.13 전기 시스템의 기능 불량

소형 풍력발전기의 전기 시스템은 적절한 장치를 갖추어 소형 풍력발전기 및 연결된 전기 시스템의 기능 불량으로부터 보호되어야 한다. 특히 필요한 것은 과부하 및 단락에 기인하는 과전류에 대한 보호이다.

#### 1.2.4.14 전선

설치와 운전에 전력선이 꼬여 발생하는 것을 비롯한 기계적인 응력이 전선에 미치는 영향에 대해 고려해야 한다.

#### 1.2.4.15 소형 풍력발전시스템 안전 설계 평가

##### 1.2.4.15.1 설계 방법

설계방법 기술의 안전성이 달성되었는지에 대한 검증은 강도 계산 또는 강도

시험을 통해야 한다. 시험 하중을 포함한 시험 조건의 설정 시 적절한 안전 기준을 고려해야 한다. 계산검토는 적절한 설계 법을 이용해서 해야 하며, 검증시험에서 이용하는 하중의 크기는 대응하는 계산에 의한 검증에서 이용되는 안전 기준을 고려하여야 한다. 소형 풍력발전기의 설계는 하중 조건이 설정되는 소형 풍력발전기의 설계(운전) 조건과 외부 조건의 수치(설계 값)가 조합되어 이루어지며, 관련된 하중 조건 모두가 기술의 안전성을 고려해서 해석되어야 한다. 설계 시 유의점은 극한 상태가 쉽게 일어나지 않도록 억제가 필요하다는 것으로서, 고려해야 할 최종 극한 상태로서는 다음과 같다.

- 구조물 또는 강체(剛體)로 간주되는 소형 풍력발전기 부위에서의 균형 상실
- 과도 변형이나 파손(피로에 의한 것을 포함) 또는 지지물을 포함하는 구조물이나 부품의(탄성적인) 안정성 상실에 따른 파손

#### 1.2.4.15.2 설계 하중

설계 시 다음과 같은 내용의 하중을 고려해야 한다.

- 공력(空力) 하중 : 공력 하중에는 정적 하중 및 동적 하중이 있고, 공기류 그 자체 및 소형 풍력발전기의 가동부와 정지 부, 공기류와의 상대 속도에 의해 발생한다. 공기류는 로터의 회전 속도, 로터면을 통과하는 풍속의 평균값, 난류도, 공기 밀도 및 공력 탄성 효과를 포함하는 공력 형상과 간섭 효과에 의해 지배된다.
- 관성력 및 중력 : 정하중 및 동하중으로서 소형 풍력발전기에 작용하는 관성력과 동력, 진동과 회전, 중력 가속도에 기인하는 것을 포함한다. 동적인 공진 현상도 하중 계산에 영향을 미치는 것은 고려한다.

#### 1.2.4.15.3 설계 하중 조건

소형 풍력발전기의 설계 하중의 정의에 대해서 언급하고 있으며, 필요한 최소 하중에 대해 규정하고 있다. 설계를 진행하기 위해서 소형 풍력발전기에 접하는 가장 일반적인 조건에 의한 설계 조건을 조합하여야 한다. 하중 조건은 외부 조건도 포함한 설계 조건의 조합으로 정의 되어야 하며, 소형 풍력발전기의 형식 및 충분히 일어날 수 있는 모든 가능성을 바탕으로 모든 적절한 하중조건의 제

어와 보호시스템의 진동도 포함하여 설계되어야 한다.

일반적으로 소형 풍력발전기의 구조적 안전성을 결정하기 위해 이용되는 설계 하중 조건은 표준 설계 상태와 표준 외부 조건의 조합 및 표준 설계 상태와 이상 외부 조건과의 조합으로 규정하며, 소형 풍력발전기가 고장 났을 때에는 고장 상태의 설계조건과 가장 발생 가능성이 높은 타당한 외부 조건과의 조합으로 하중 조건을 규정하여야 한다.

다음과 같이 간략화된 하중 계산 순서의 과정을 권장하고 있으며, 이 방법은 일반적으로는 강성 체 허브 및 단엽(날개 1개) 수평축 형 풍력발전기에 적용될 수 있다. 계산을 간소화하기 위해 하중 조건 일부만 적용할 수도 있으며, 동적 거동의 영향에 대해서는 계산중의 안전율에 포함되는 것으로 간주한다. 소형 풍력발전시스템에 적용될 수 있는 간략한 계산을 위해 검토된 하중 조건은 Table 1과 같다. 어떤 소형 풍력발전기 특유의 설계 요건에 따라 필요한 경우에는 이외의 하중 조건도 고려할 수 있다.

#### 1.2.4.15.4 하중 계산 평가

Table 1-1 에 제시한 하중 조건의 계산 방법은 다음과 같아야 하며, 평가 시 이를 적용하여 안전하게 설계되었는지를 평가한다.

본 성능시험에서도 독자적인 기술의 적용보다는 국제적인 기준에 의거하여 이미 국제성인증 기관 등에서 공포해 놓은 성능시험이나 측정분석 방법 등을 적용하여 소형 풍력발전기의 성능특성 평가에 임하였다.[12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]

Table 1-1 Design of load condition in small wind turbines

설정조건	하중조건	풍속	해석구분	비고
발전시	A	정상 운전 시의 주기적인 풍속 변동	$V_R$ 주변의 주기적 변화	피로 출력은 $1.5P_R \sim 0.5P_R$ 사이에서, 로터 회전 속도는 $1.5n_R \sim 0.5n_R$ 사이에서 변동된다.
	B	요잉(Yawing)	$V_{hub}=V_R$	극한 하중 최대 요잉각 속도
	C	(전기적)부하 차단	$V_{hub}=V_{exr}$	극한 하중 정상 풍속으로 로터 회전 속도를 측정하는 $V_{exr}$ 에 외삽한다.
정지	D	정상 정지	$V_{hub}=V_R$	극한 하중 제동 토크
대기	E	회전자 회전 면적 최소화	$V_{hub}=1.4V_{exr}$	극한 하중 정상 대기상태
	F	회전자 회전 면적 최소화	$V_{hub}=V_{exr}$	극한 하중 최대 회전자 회전 면적

# 1. 실험장치 및 방법

## 1.1. 소형 풍력발전기의 사양 및 설치위치



Fig. 2-1 Installation of small wind turbine

Fig. 2-1은 행원풍력발전단지 내 소형 풍력발전기 설치 방법에 크레인을 사용하여 설치하는 장면이다. 동체의 길이는 블레이드를 포함 소형 풍력발전기본체를 Pole에 조립 하였을 때 최대 길이가 10m이며, 기상측정마스터를 설치 할 때와 같이 와이어를 이용하여 설치하는 방법을 사용하였으나, 소형 풍력발전기와 Pole의 하중이 과다하여, 와이어 고정 팩들이 소형 풍력발전기와 Pole의 하중을 견디지 못하고 휘어지거나 또는 팩 전체가 뽑아져 버리는 현상이 일어나 소형 풍력발전기 설치작업을 더 이상 진행할 수 없었다. 그래서 소형 풍력발전기와 Pole의 하중에 견딜 수 있는 이동용 크레인 차량(3톤)을 이용 소형 풍력발전기의 Pole에 직물와이어를 이용 소형 풍력발전기의 어셈블리를 들어 올려 설치하는 방법을 사용하였다.

Table 2-1 Specification of small wind turbine

Generator	3 Phase Permanent Magnet
Rated Power	720W (28Vdc)
Rated speed	640rpm
Load	Switching Dump-Load
Rotor Diameter	1.75m
Number of Blades	3
Blade Material	PAG Glass Reinforced Polyamide
Cut in Wind speed	3.2 m/s
Rated in Wind speed	10.5 m/s
Gear Ratio	Direct Drive
Yaw System	Tail Vane (Brush)
Turbine Brake	Short Circuit Switch on Generator
Battery	24V-400Ah(Min)
DC-Converter	Battery Charge

Table 2-1의 사양을 살펴보면 Generator는 3상 영구자석으로 구성되어 있어 자력자석의 발전기형식을 갖추었고 Rated Power는 720W (28Vdc)로 컨버터에 의하여 정류된 전기는 직류임을 보여주고 있으며, Rated speed는 640rpm으로 과충전 시 부하를 Switching Dump-Load로 보내어 소모시킨다. Cut-in Wind Speed는 3.2m/s로 일반적인 소형 풍력발전기의 사양과는 별다른 차이가 없음을 볼 수 있다.

Rated in Wind speed의 경우 10.5m/s 이다. Yaw System의 제어방식은 Tail Vane으로 흔히 소형 풍력발전기에서 적용시키는 형식이다. 회전자의 지름은 1.75미터이고 소형 풍력발전기기의 정격전압은 24V이다.

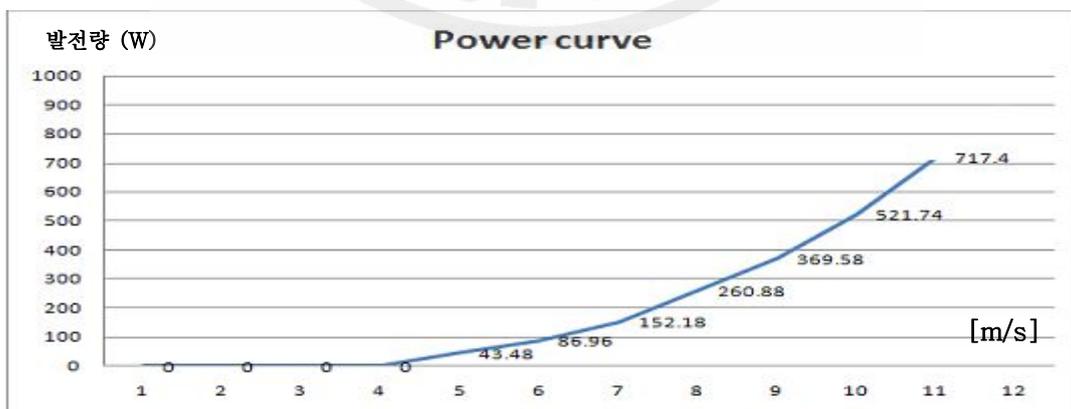


Fig. 2-2 Power curve

Fig. 2-2는 소형 풍력발전기의 제작사 Power curve이며 Cut-in wind speed는 3.2m/s이며, 11m/s에서 정격출력인 717.4W의 전력이 발생하는 Power curve임을 보여주고 있다.

### 1.1.1. 소형 풍력발전기의 구성요소

#### 2.1.1.1. Wind turbine blade



Fig. 2-3 Small wind turbine blade

소형 풍력발전기의 블레이드는 Fig. 2-3과 같이 3개 블레이드로 구성되어 있으며, 연결부분은 블레이드가 풍향에 가장 잘 작동할 수 있는 최적형상각도를 유지하기 위하여 각각의 블레이드에 특수플라스틱 키를 설치하여, 블레이드 방향각이 바람의 영향에 따라 변화되는 것을 방지 하도록 하였고 플레이트 재질은 무게가 가벼운 알루미늄 으로 제작된 양면 플레이트로 설계되어 6개의 볼트와 너트로 결합 하였다.

블레이드는 바람의 영향에 따라 진동이 발생할 것으로 예측되어 각 보울트와 너트는 회전진동에 따른 풀림방지 기능이 있는 것을 사용하여 블레이드가 회전

중에 결합부분의 풀림에 의한 파손을 방지하였다. 블레이드는 CATIA로 설계하였고 블레이드재질은 적층형 복합소재로 제작되었다.

### 2.1.1.2 Wind power converter

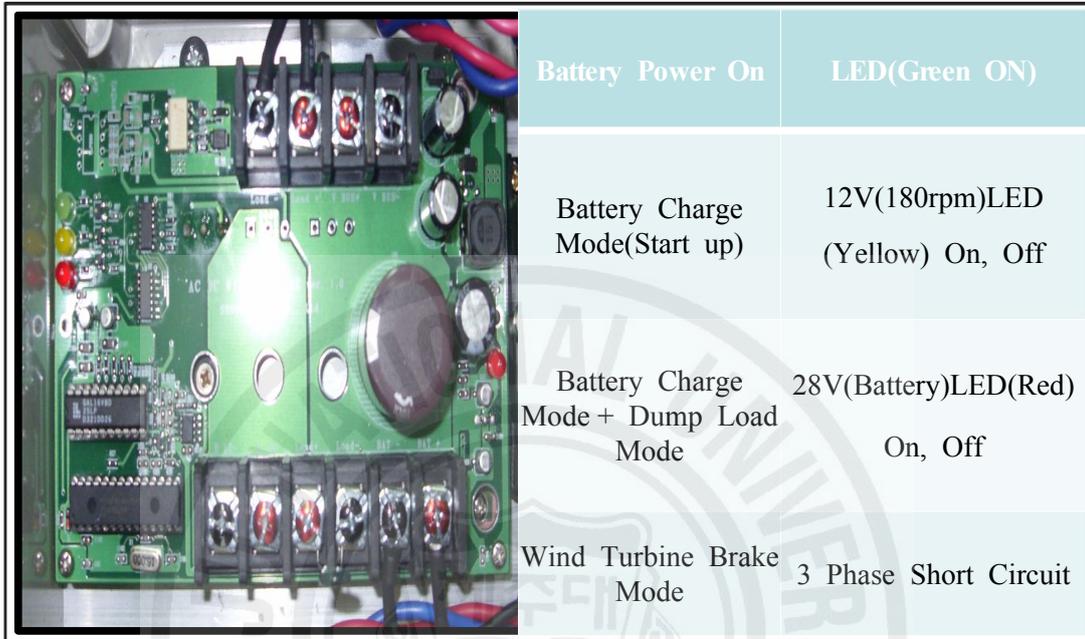


Fig. 2-4 Electric power converter

Fig. 2-4는 Electric power converter로 지상에서 1.2m에 설치되어 지면에서의 습기가 장치내부에 흡수될 수 없도록 하였다. Battery 충전모드에서는 Yellow LED다이오드가 On되고 소형 풍력발전기가 충전하지 않을 때 Yellow LED다이오드가 Off되어 소형 풍력발전기의 충전상태와 소형 풍력발전기의 발전되지 않는 상태를 연구자에게 시각화시켜 소형 풍력발전기의 작동유무를 짧은 시간 내에 파악할 수 있도록 되어 있으며, 소형 풍력발전기에서 생산된 교류는 Electric Power Converter를 거치면서 직류로 정류되고 이 직류는 12V 직렬 접속되어 있는 배터리에 12V에서 28V까지 충전된다.

### 2.1.1.3. Dump load

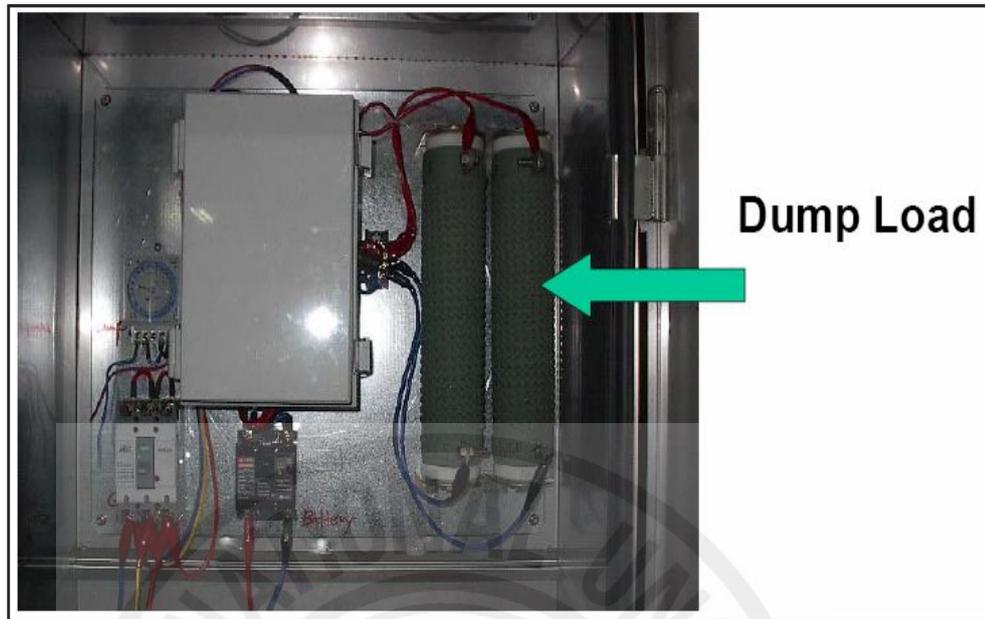


Fig. 2-5 Dump load system

Fig. 2-5는 덤프로드 시스템으로 소형 풍력발전기가 지속적인 바람의 힘으로 계속 충전이 이루어 질 경우 배터리는 최대 충전전압인 28V이상 충전이 될 경우 배터리의 수명이 짧아지는 현상이 발생하므로 과충전 방지회로를 구성하여야 한다. 그러므로 덤프로드 시스템의 기능은 배터리의 과충전 으로 인한 배터리의 보호와 필요 이상의 발전전기를 소모하여 소형 풍력발전기와 배터리에 무리한 작동을 방지하기 위한 장치이다.

Fig. 2-6은 Wind turbine brake mode는 브레이크 역할을 한다. 소형 풍력발전기 기능의 최소화 에 따라 수동조작으로 작동할 수밖에 없는 시스템으로 강한 바람이 장시간 지속하여 불어올 경우 또는 태풍의 영향권에 들어 소형 풍력발전기의 안전에 대한 문제가 예상될 경우 수동조작 하도록 설계되었다.

다소 아날로그 형태이긴 하나 본 연구의 진행에는 차질이 없을 것으로 판단되었고, 최악의 상태에서는 소형 풍력발전기가 견딜 수 있는 최대 풍속을 실험하는데 용이한 조건임에 Fig. 2-6과 같이 수동조작의 블레이드 브레이크 방식을 택하였다.

#### 2.1.1.4. Brake

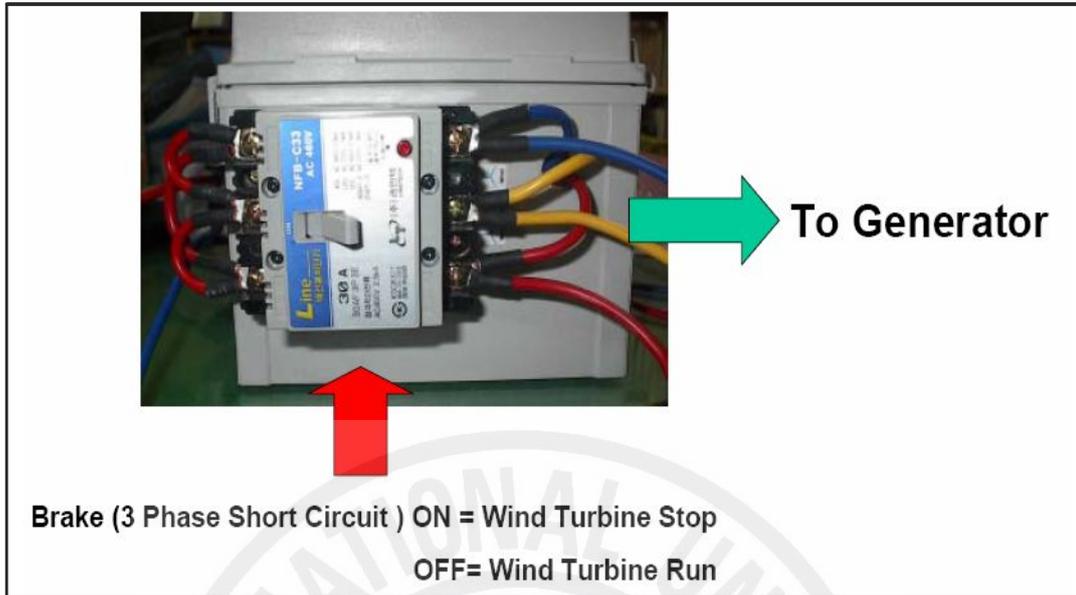


Fig. 2-6 Brake system

#### 2.1.1.5. 소형 풍력발전기 기본회로도

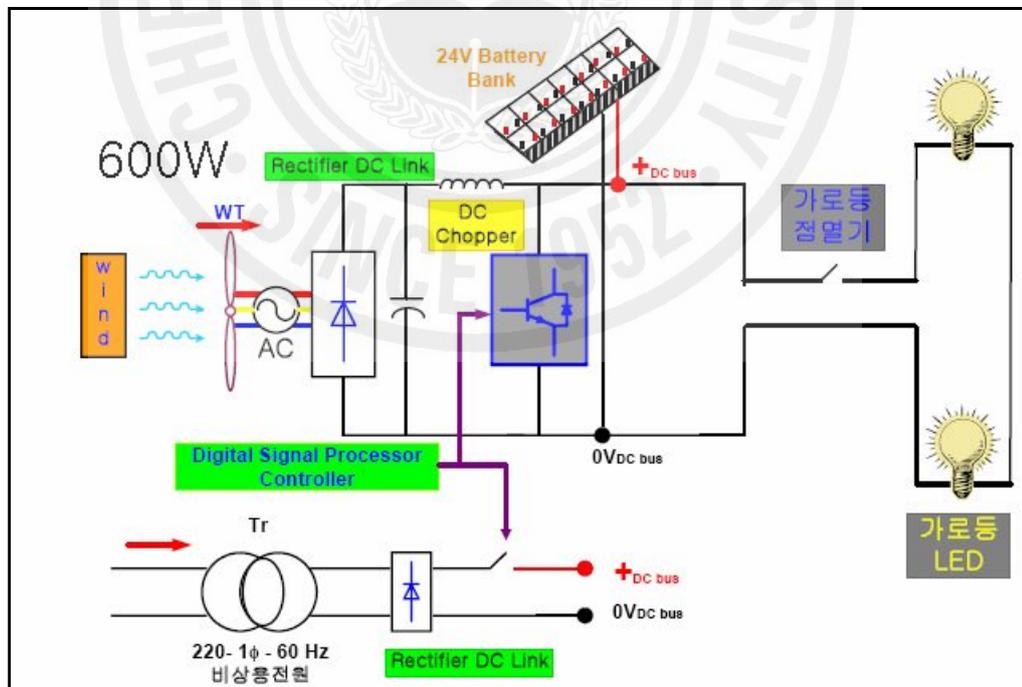


Fig. 2-7 Diagram of small wind turbine generator system

Fig. 2-7은 소형 풍력발전기의 기본회로 시스템을 나타낸다. 600W 교류발전기로 DC컨버터를 통하여 정류된 직류는 Battery에 실시간 충전되며, 가로등은 타이머에 의하여 일몰 시간 ON, 일출시간에 맞추어 OFF를 반복토록 설정되어 있으며, 과충전의 경우 Controller에 의하여 28V이상의 감지가 되면 Digital signal processor controller에서 TR 베이스에 전압을 보내어 Dump load로 소형풍력발전기에서 발전된 전력이 소모토록 되어 있고, 바람이 불지 않을 경우를 대비하여 자체 충전회로를 구성하여 언제나 가로등을 작동시킬 수 있는 시스템으로 구성 하였다.

위 와같이 과충전 방지회로와 비상용전원의 구성을 하고 있고 브레이크 작동으로 태풍이나 강한 풍속이 지속 될 경우 소형 풍력발전기의 보호를 위하여 안전장치 등 이 있으나 수동 조작으로 기상의 상태에 따라서 연구자가 판단하여 수동 Brake를 작동해야 하는 불편함은 있을 것으로 판단된다.

### 1.1.2. 설치 위치



Fig. 2-8 Installation site in hangwan wind farm

Fig. 2-8에서 보여주는 바와 같이 소형 풍력발전기는 제주특별자치도 행원 풍력발전단지 내에 설치하였으며, 행원 풍력발전단지 내 풍력발전기 10호기와 약 10m거리를 두고 설치하였고, 기상측정마스트 위치도 본 연구에 사용된 소형 풍력발전기와 약 7m가량 떨어진 곳에 소형 풍력발전기 높이와 동일하게 풍향, 풍속계를 설치하여 소형풍력발전기의 성능평가 연구에 이용되는 기상데이터를 획득하고자 사전 베이스작업을 실시 후 설치하였고, 소형 풍력발전기는 크레인 차량을 이용하여 파이프와 소형 풍력발전기의 블레이드가 크레인에 접촉 손상이지 않도록 일정 이격을 주어 70도 각도를 유지하면서 소형 풍력발전기 어셈블리를 들어 올려 베이스 앵커볼트(30mm) 8개와 연결 하였고, 프레임의 상단부분에서 아래로 1.8m 위치에 4개의 고정 와이어를 동, 서, 남, 북, 각각 90도 간격으로 설치하였고, 다시 베이스 위치인 아래에서 위로 6m에 4개의 고정 와이어를 동, 서, 남, 북, 각각 90도 간격으로 설치, 총 8개소의 와이어 고정 팩을 지상에 고정 소형 풍력발전기의 Pole을 견고하게 지지하게 하여 만약에 발생할 수 있는 안전사고에 사전 대비 조치하여 소형풍력발전기를 설치하였다.

## 1.2. 측정 장비 및 데이터 취득방법

### 1.2.1. 기상측정마스터의 위치선정

이 연구를 위하여 풍력발전기의 출력성능 시험에 관한 IEC 61400-12를 사전에 검토하였고 그 주요 내용은 다음과 같다. 즉, 풍력발전기 앞에서 풍속은 저하므로 풍력발전기에 너무 가까이 위치해서는 안 된다. 또한 풍력발전기로부터 너무 멀리 떨어져 있으면 풍속과 출력사이의 상관관계가 감소한다. 기상마스터는 풍력발전기 회전자 직경(D)의 2배에서 4배 사이에 위치해야 하며, 일반적으로 회전자 직경의 2.5배정도가 권장되고 있다. 수직축 풍력발전기의 경우에는 등가 회전자 직경D는  $2\sqrt{A/\pi}$  로 결정되며, 여기서 A는 회전자의 회전 면적이다. 기상마스터와 풍력발전기 사이의 거리는  $L+0.5D$ 로 결정되며 여기서 L은 발전기

타워 중심과 수평축 풍력발전기 기상마스터 사이의 거리이다. 측정 장비는 장애물이나 풍력발전시스템에 의해 발생하는 유동왜곡현상이 발생하지 않는 측정 영역 안에 반드시 위치해야 한다.

인접한 다른 풍력발전기와 장애물이 존재하는 경우, 후류 영향으로 인해 제외되어야 하는 방위각은 부속서 A에 명기된 절차에 의해 결정되어야 한다. 평가대상 풍력발전기의 후류 영향권에 위치한 기상 탑으로 인해 제외되어야 하는 방위각은 Fig. 2-9에서 보는 바와 같이 풍력발전기 회전자 직경의 2배, 2.5배, 4배에 대하여 명기되어 있다. 측정 제외대상 방위각의 범위는 특정 지형적 요인 또는 제외 대상 방위각 내에 위치한 복잡 형상의 구조물로 인해 예상치 않았던 측정 자료를 획득할 수 있는 경우에는 축소될 수 있으며, 이 경우 그 사유가 상세히 기록되어야 한다.

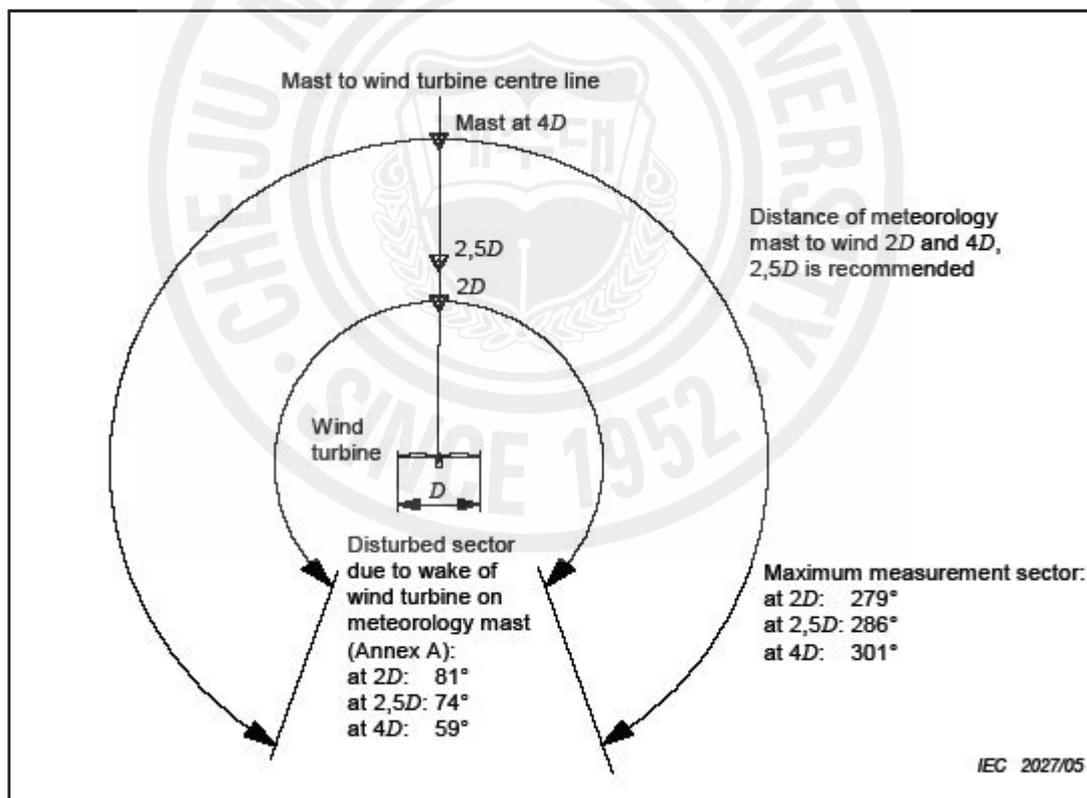
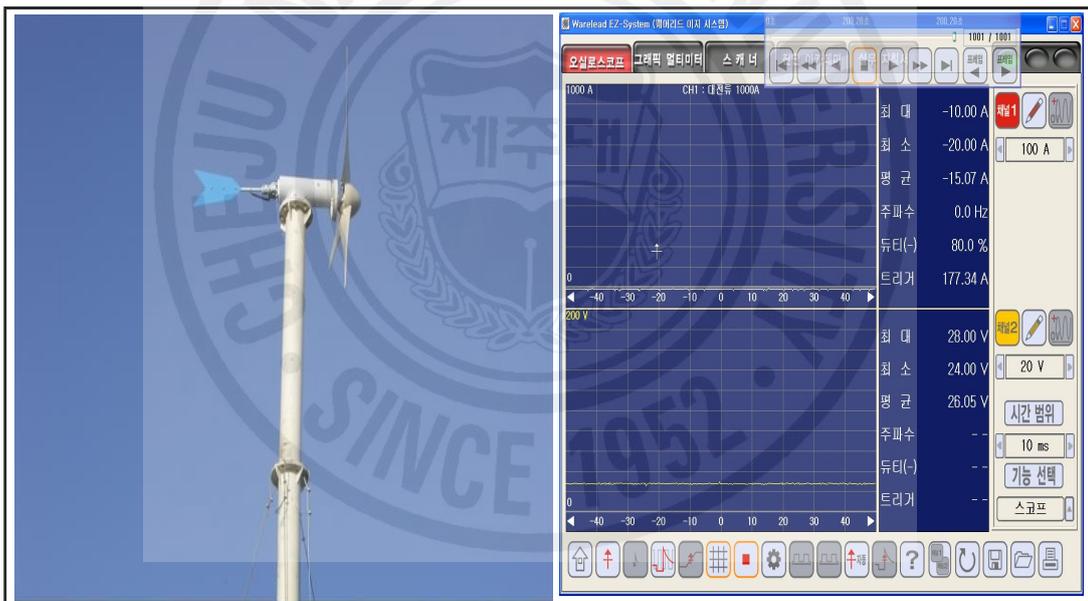


Fig. 2-9 Appropriation measurement sector of meteorological mast

### 1.2.2. 데이터 취득방법

소형풍력발전기의 성능 평가에 있어 무엇보다 계측장비의 중요성이 가장 우선이라고 생각되므로 전압과 전류측정을 동시에 할 수 있는 2채널 방식의 계측기인 EZ-SCOPE를 사용하였다. 이장비의 특징으로는 2ms에서부터 10초까지 정밀측정이 가능한 장비로 성능시험에서 요구하는 저장기능과 데이터 분석기능을 그래프로 나타내 데이터를 획득 할 수 있는 장비이다. 전류는 소전류 2A에서부터 대전류1000A를 측정 저장 할 수 있고, 전압은 50V로 설정하여 아래 Fig. 2-10(b)와 같이 수집하여 노트북에서 저장과 분석을 동시에 실시 전력을 산출하였으며, 본 연구에 사용된 소형 풍력발전기의 설치 높이는 10m로 Fig. 2-10(a)은 설치 완료된 모습을 보여준다.



(a)

(b)

Fig. 2-10 Small wind turbine and EZ-SCOPE system

기상측정마스트에 부착된 계측장비에 의해 측정되는 Data는 풍속, 풍향, 일사량, 온도, 대기압, 습도이다. 측정된 데이터들은 Sensor a wire에 의해 미국 NRG사의 #9300 Wind data logger를 통해 지속적으로 풍속 및 풍향 등의

데이터들을 저장하게 되며, 일정기간 후 Data logger에서 data가 저장된 메모리 카드를 회수하여 컴퓨터를 통해 자료를 읽고 분석하는 과정을 거치게 된다. 다음의 Fig. 2-11은 이번 연구를 위해 설치되어 운용된 Wind data logger이다.



Fig. 2-11 #9300 Wind data logger and meteorological mast

기상측정 마스트 하단부에 설치된 Data logger는 Shelter box에 의해 보호되며, 측면에 각종 센서로부터 신호선이 연결되며, 전면 상단부에 메모리 카드가 삽입되며, 하단부에 컴퓨터와 연결하여 자료를 전송하는 통신 Port가 있다. Data logger는 9V의 알카라인 축전지로 작동되며, 별도로 외부의 전원에 연결도 되고 내부에 큰 용량의 2차 축전지로도 작동이 가능하다.[20, 21, 22, 23]

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 3.0m이

고, 보정상수는 0.7658m/s/Hz로서 선형적으로 신호가 변하는 특성을 지니고 있다.

풍향센서는 일반적으로 많이 이용되는 가변저항식의 200P 모델을 이용하였고, 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. 일사량 계는 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. Table 2-2는 본 연구에 사용 계측센서들의 사양을 정리하였다.

Table 2-2 Specifications of sensors

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%
110S Temperature Sensor	0 to 2.5V	-40°C to 52.5°C	0.271%
LI-200SA Li-Cor Pyranometer	93.7microamps/1000 watts m <sup>-2</sup>	0 to 3000 W/m <sup>2</sup>	0.271%
BP-20 Pressure Sensor	0 to 10.55kPa	15 to 115kPa	0.271%

풍력자원측정에서 가장 중요한 풍속센서와 풍향센서는 이번 연구에 사용된 소형발전기의 허브높이와 같은 10m에 각각 1개씩 설치하여 실제데이터를 이용한 비교를 할 수 있게 하였다. 이 센서들은 9300 Data logger에 연결하여 10분 평균데이터를 지속적으로 메모리 카드에 저장한다. 여기서도 센서를 9300 Data logger에 연결하였다. 풍속, 풍향 및 센서 설치 그림과 센서의 높이

는 Fig. 2-12에 도시하였다.

Fig. 2-13은 본 연구에 사용된 소형 풍력발전기로 블레이드의 회전지름은 1.7m로 3개의 블레이드로 구성되어 있고 블레이드와 연결된 3상 교류 발전기는 영구자석의 자려자식 발전기이다. 기둥의 총길이는 10m로 두 부분의 용접부와 한부분의 보울트, 너트 결합부로 구성되어 있으며, 요 운동 부분은 기둥의 상단부에 분해와 조립이 자유롭도록 설치되어 고장 발생 시 기둥 전체를 분해하지 않고 요 운동부부터 발전기 몸체까지 탈거하여 수리할 수 있도록 장착하였다.

팬 태일 부분은 난류 특성이 좋은 지역임을 고려하여 일반 소형 풍력발전기 사양규격과 같은 팬 태일을 설치 연구 하였다.[24, 25, 26]



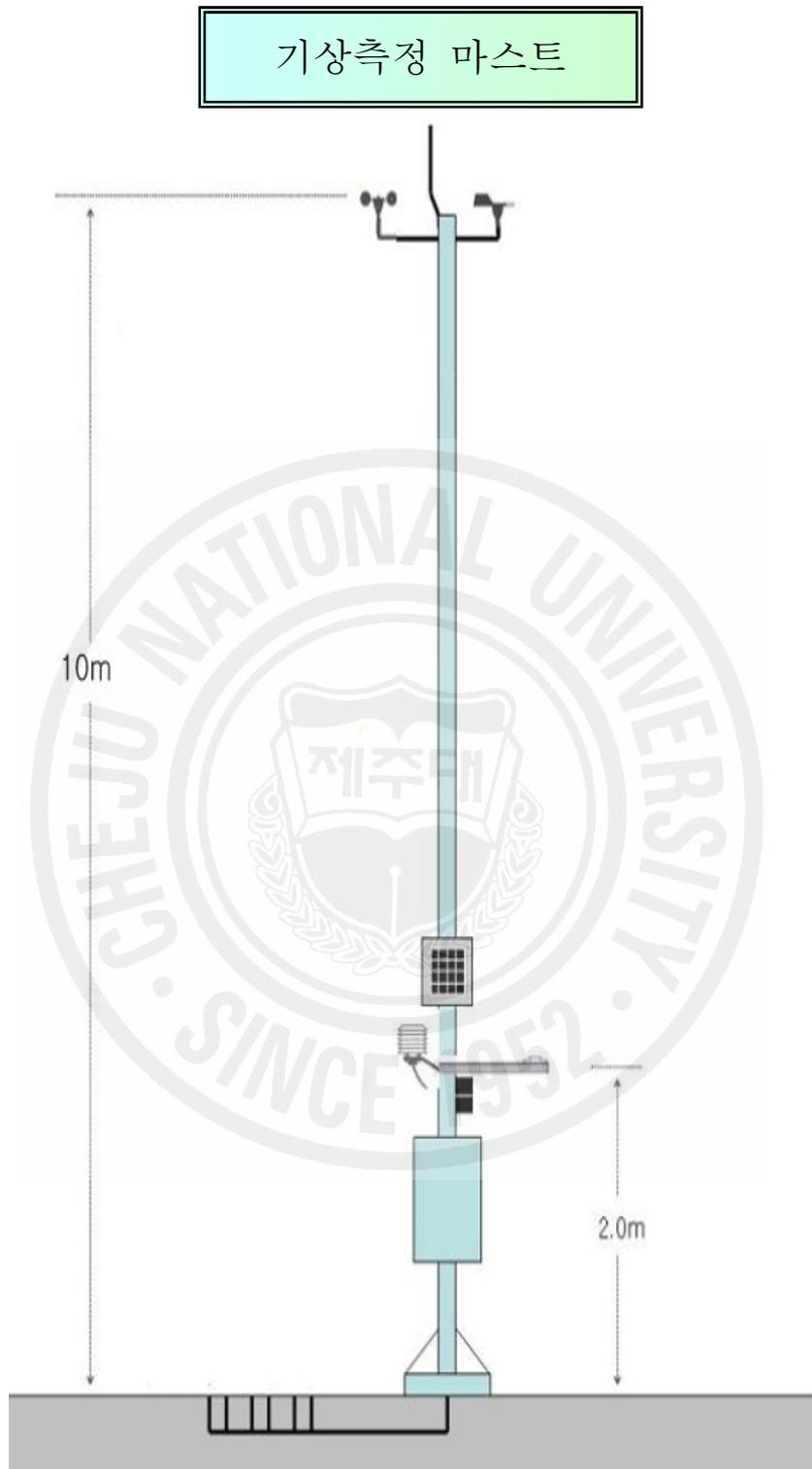


Fig. 2-12 The meteorological mast

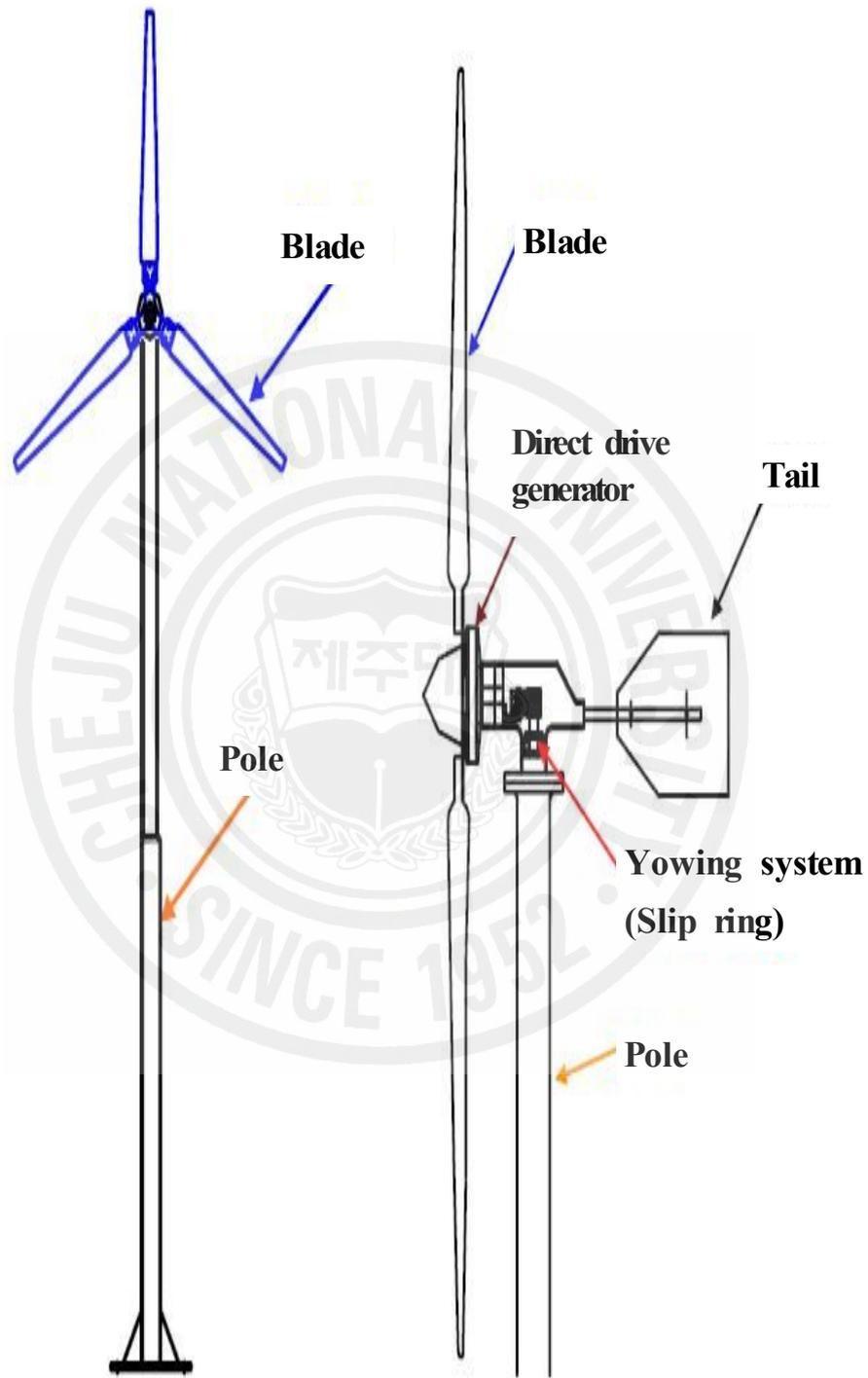


Fig. 2-13 Components of small wind turbine

## 2. 실험결과 및 고찰

### 2.1. WindPRO를 이용한 풍황분석

세계적으로 널리 사용되는 WindPRO를 본 연구에서도 사용하여 풍황분석을 하였으며, 기간은 데이터 취득과 관련한 2008년 5월 6일 ~ 2008년 6월말까지 구좌읍 행원리에 풍속, 풍향, 온도, 대기압, 일사량 등의 자원을 측정하기 위해 실제 소형 풍력발전기의 허브높이와 같은 10m의 높이에 기상측정마스트를 설치 운영하였다. 데이터 저장 간격은 10분으로 하고 2주에 한번 씩 기상데이터를 수거하여 데이터를 확보하였으며, 데이터의 수거와 동시 데이터 저장 메모리카드를 교환하는 방식으로 저장 하였다. Data logger에서 data가 저장된 메모리 카드를 회수하여 컴퓨터를 통해 자료를 읽고 분석하였으며, 2008년 5월 6일부터 2008년 6월 28일까지 데이터를 EMD사의 WindPRO ver 2.5를 이용하여 분석하였고, Fig. 3-1은 데이터수집기간 동안 평균풍속의 변화를 도시하였으며, Fig. 3-2는 풍향의 변화를 도시하였다. 데이터수집기간 중 5월 10~11일, 6월15~16일, 6월 18일의 풍속이 다른 날짜보다 높았음을 알 수 있다.

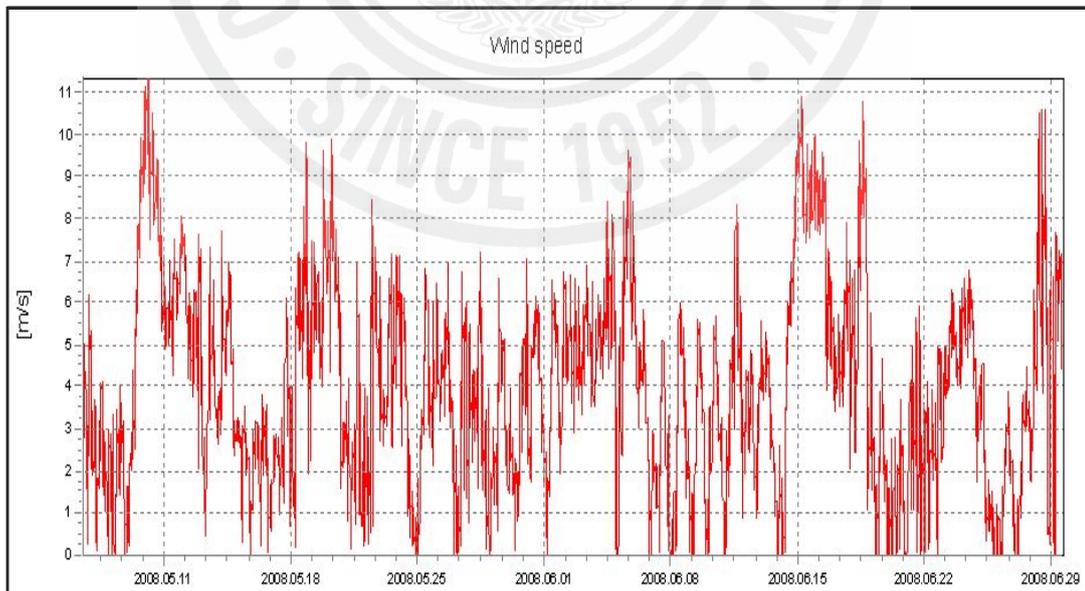


Fig. 3-1 Wind speed vs. time

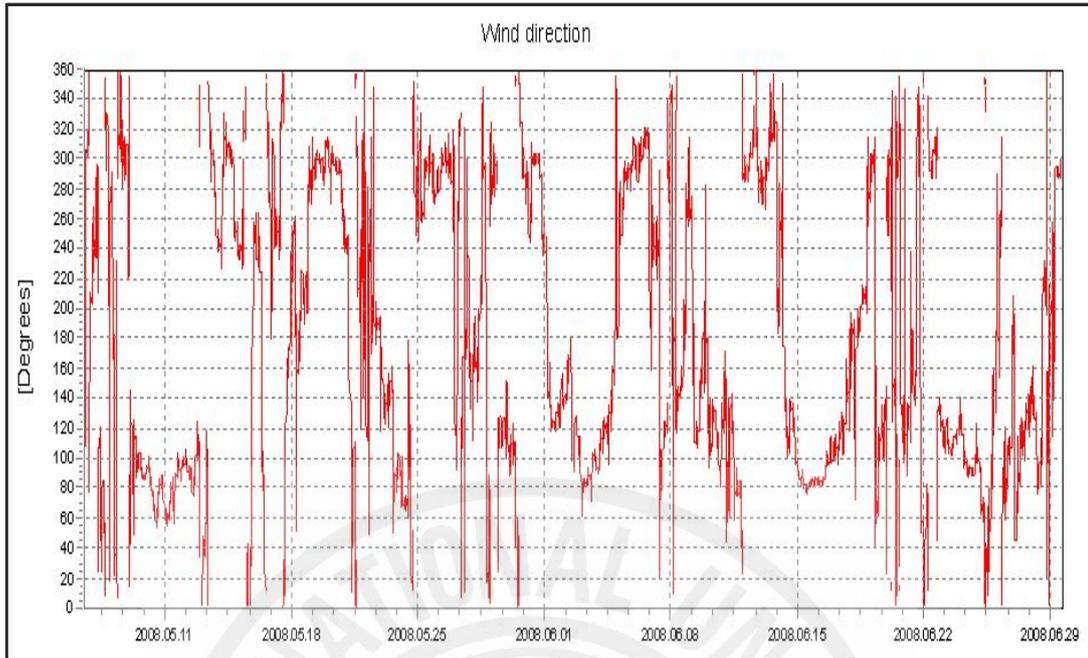


Fig. 3-2 Wind direction vs. time

Fig. 3-3은 시간대별 평균풍속 및 풍향을 나타낸다. 4m/s 이상의 평균풍속은 오전 8시에서 오후 7시 사이였으며 낮 시간대가 밤 시간대보다 풍속이 높아 낮 시간대에 더 많은 발전량을 기대할 수 있다.

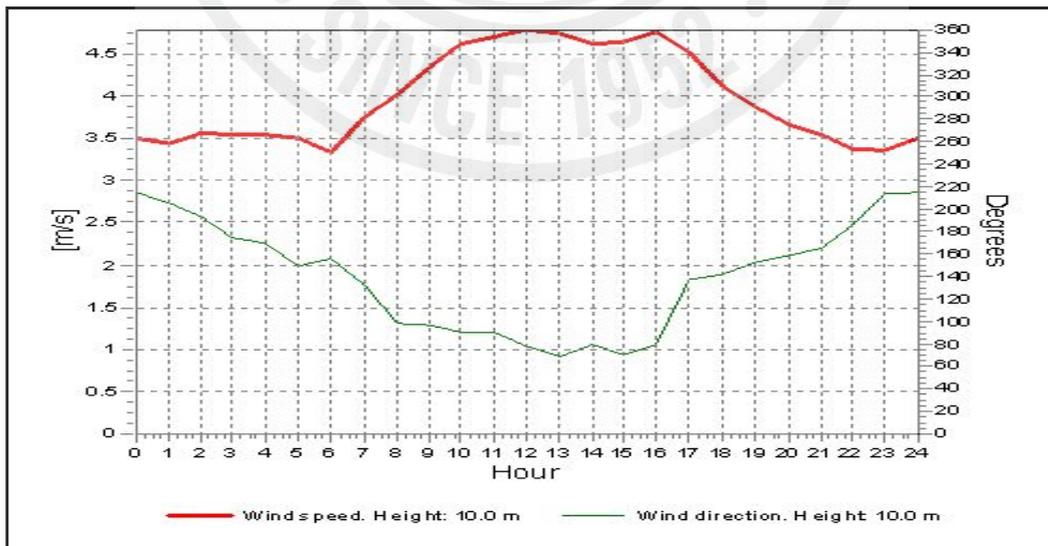


Fig. 3-3 Hourly wind speed and wind direction

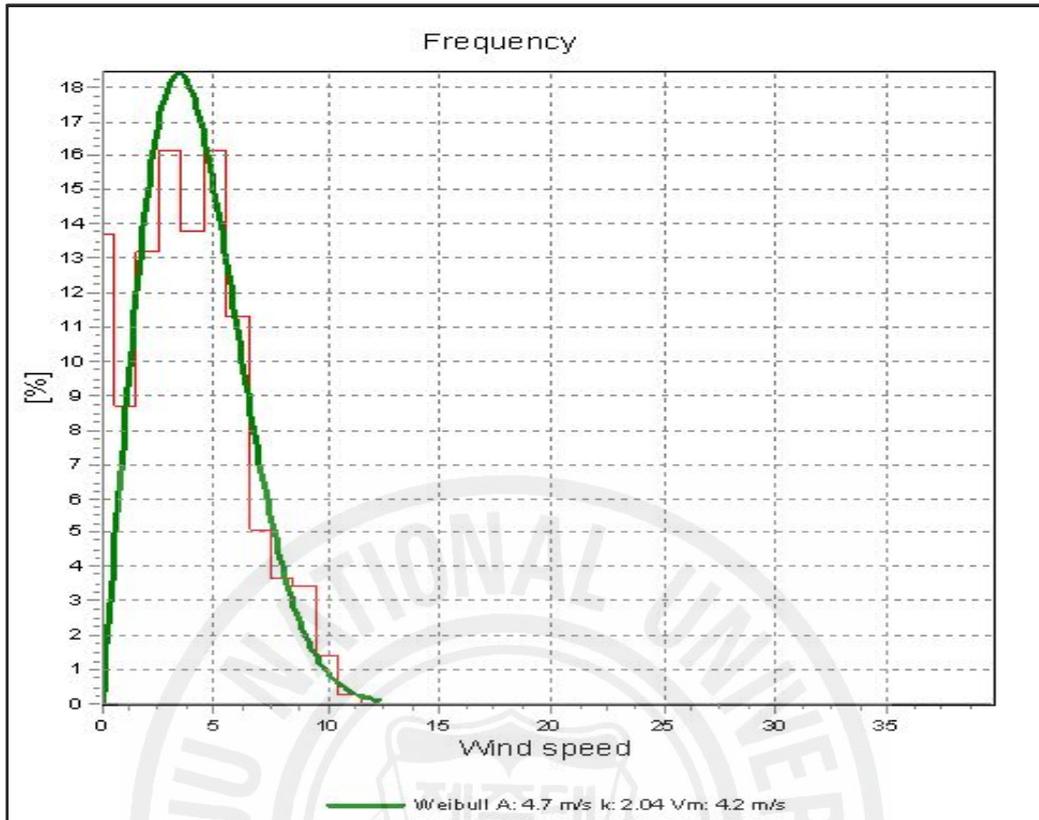
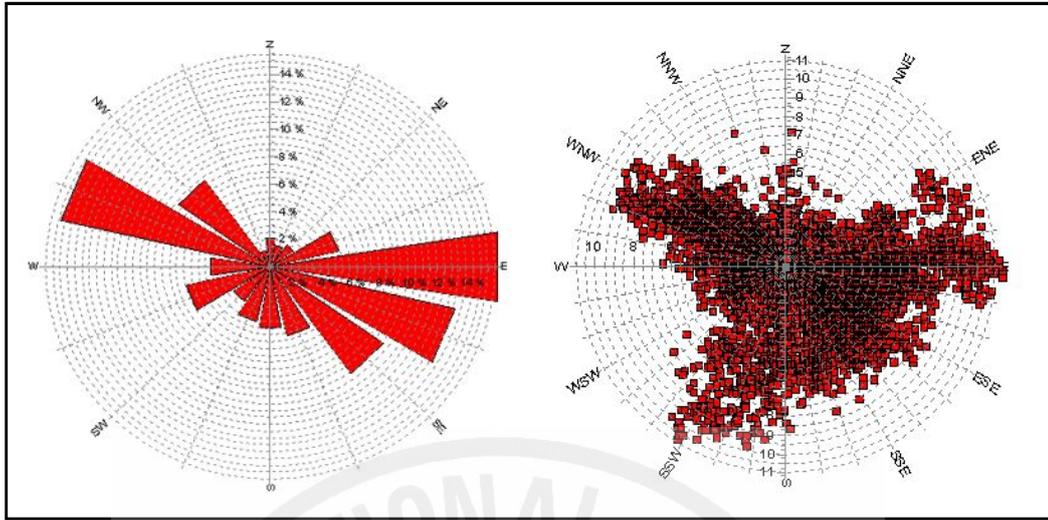


Fig. 3-4 Wind frequency and weibull distribution

Fig. 3-4은 풍속분포도와 와이불 분포이다. 풍속분포도는 해당지역에서 풍속별로 바람이 부는 빈도수를 잘 보여준다. 여기에서 볼 수 있듯이, 4~6m/s의 바람이 40.5%를 차지하며 7~10m/s의 바람은 14.5%정도를 차지하고 있다. 시동풍속 밑인 4m/s의 바람은 44%정도로 나타나고 있다. WindPRO에서 계산된 Weibull분포의 형상계수(shape parameter)와 척도계수(scale parameter)는 각각  $K=2.04$ ,  $A=4.7\text{m/s}$  이고 평균풍속은  $4.2\text{m/s}$ 이다.

Fig. 3-5는 바람장미와 풍향별 풍속분포를 나타낸다. 이 지역의 주 풍향은 뚜렷한 동풍과 서북서풍이며 4m/s이상의 바람도 양호하게 불고 있다. Fig. 3-5(a)에서 남서풍의 경우 적은 분포를 가지고 있으나 그 대부분이 풍속이 높은 데이터들로 이루어져 있다.



(a)

(b)

Fig. 3-5 Wind roses

Fig. 3-6은 연간 풍향별 풍력에너지밀도를 나타낸다. 이 지역은 동풍에서 가장 많은 발전량을 생산할 수 있음을 알 수 있으며 동풍보다 빈도가 높았던 서북서풍의 경우 풍속이 빠르지 않아 기대보다 적은 발전량을 예상할 수 있다.

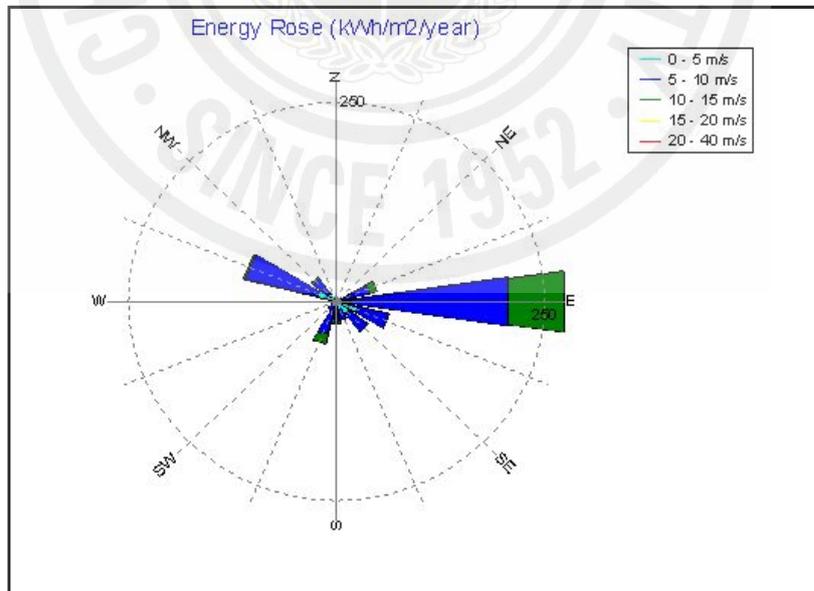


Fig. 3-6 Energy rose

Fig. 3-7은 난류강도 특성을 나타낸다. 난류강도  $I$ 는 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$I = \frac{\sigma}{V}$$

(3-1)

여기서  $\sigma$ 는 표준편차이고,  $V$ 는 허브 높이에서의 10분 평균풍속이다. 난류특성을 분석하기 위해 IEC 61400-1 안전요구사항의 난류특성 값이 그림에 삽입되어 있다. IEC 규격에서 난류강도  $I$ 를 정의하기 위한 표준편차  $\sigma$ 는 다음 식과 같다.

$$\sigma_1 = I_{15}(15\text{m/s} + aV_{hub})/(a + 1)$$

(3-2)

여기서  $a$ 는 기울기 파라메타(Slope parameter)이고, IEC 규격에서 제시된 값을 취한다. 그림에서 두 곡선에 의해 난류특성을 구분 할 수 있는데, 두 곡선의 위쪽은 고 난류특성 구역을 나타내고, 아래쪽은 저 난류특성 구역을 나타낸다.

IEC 규격에서 풍력발전시스템 클래스를 정의할 때, 풍속 15 m/s에서의 난류강도 값으로 고 난류특성 및 저 난류특성을 구분한다. Fig. 3-7의 (a)에서 난류강도 값들은 거의 모두가 고 난류특성인 곡선의 아래쪽 구역에 속한다.

고 난류는 저 난류보다 재료의 피로를 증가시키고, 터빈의 수명을 보다 감소시키므로, 측정기간 동안 풍력발전시스템들은 고 난류로 인한 악영향을 거의 받지 않으며 운전되었다고 할 수 있다. Fig. 3-7의 (b)를 통하여 풍향별로 비교해 봤을 때 풍속이 좋은 동풍과 서서북풍의 경우 난류 또한 상대적으로 낮은 것을 알 수 있으며, 난류강도가 상대적으로 높게 나타난 북북서풍은 바람이 거의 불지 않는 풍향이다.

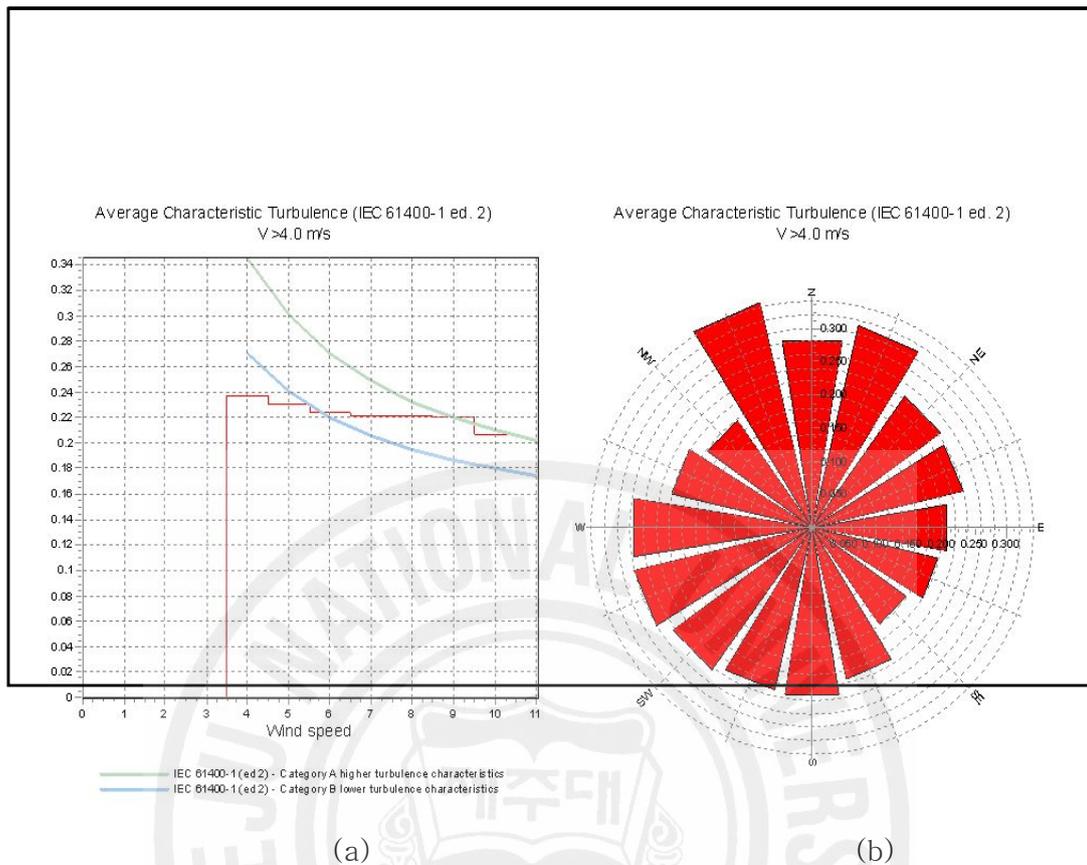


Fig. 3-7 Average characteristic turbulence

소형 풍력발전기를 설치한 주변지역의 풍황을 분석하기 위해 수치지도에 주변 환경여건을 고려하여 거칠기 클래스를 입력하였다. 입력 값은 WindPRO에서 제시한 Table 3-1을 참고 하였다.

소형풍력발전기가 세워진 지역은 제주도 제주시 구좌읍 행원리 행원풍력발전단지 내 10호기 주변이며 해안도로에서 50m 정도 내륙으로 들어와 있다. 이 지역은 8m이하의 건축물과 나무들이 간헐적으로 들어서 있으므로 거칠기 클래스를 1(Roughness length=0.03m)을 입력하였다.

Table 3-1 Roughness class of WindPRO

Roughness class	Roughness length	Relative energy %
0	0.0002	100
Water areas.		
0.5	0.0024	73
Mixed Water and land area or very smooth land.		
1	0.03	52
Open farmland with no crossing hedges and with scattered buildings. Only smooth hills.		
1.5	0.055	45
Farmland with some buildings and crossing hedges of 8m height and about 1250m apart.		
2	0.1	39
Farmland with some buildings and crossing hedges of 8m height and about 800m apart.		
2.5	0.2	31
Farmland with closed appearance and dense vegetation - crossing hedges of 8m height and about 250m apart.		
3	0.4	24
Villages, small towns, very closed farmland with many or heigh hedges, Forrest, many abrupt orographic changes, etc.		
3.5	0.8	18
Large towns, cities with extended build-up areas.		
4	1.6	13
Large cities with build-up areas and high buildings.		

이 지역에 풍력발전시스템에 의한 에너지 취득 량의 예측을 위해서는 시스템의 허브높이(회전중심)에서의 풍속을 정확히 알 필요가 있다. 따라서 관측 높이와 허브높이가 다른 경우에는 풍속데이터의 보정이 필요하며, 이 지역의 기상측정 마스터를 통해 얻어진 풍속데이터는 10m에서 측정된 데이터를 통해 높이별 평균풍속 그래프(Wind profile)를 얻어냈다. WindPRO는 높이별 평균풍속 그래프 생성 시 멱법칙을 사용하며 멱지수( $\alpha$ )는 수치지도에 입력된 거칠기 클래스에서 계산되어 대입된다.

$$V_z = V_h \left( \frac{z}{h} \right)^{\alpha} \quad (3-3)$$

여기서,  $V_z, V_h$  : 지상으로부터의 높이  $z$  및  $h$  에서의 풍속  
 $\alpha$  : 멱지수이다.

멱지수  $\alpha$ 의 값은 다음 관측지점 주위의 지표 상태에 따르는 보정계수이며 Table 3-2에 나타내었다.

Table 3-2 Wind gradient exponent on WindPRO

Roughness Class	Roughness Length	Wind Gradient Exponent
0	0.0002	0.1
1	0.03	0.15
2	0.1	0.2
3	0.4	0.3

떡법칙을 이용하여 WindPRO file을 계산하는 WindPRO프로그램에서 Fig. 3-8과 같은 WindPRO file을 얻었다.

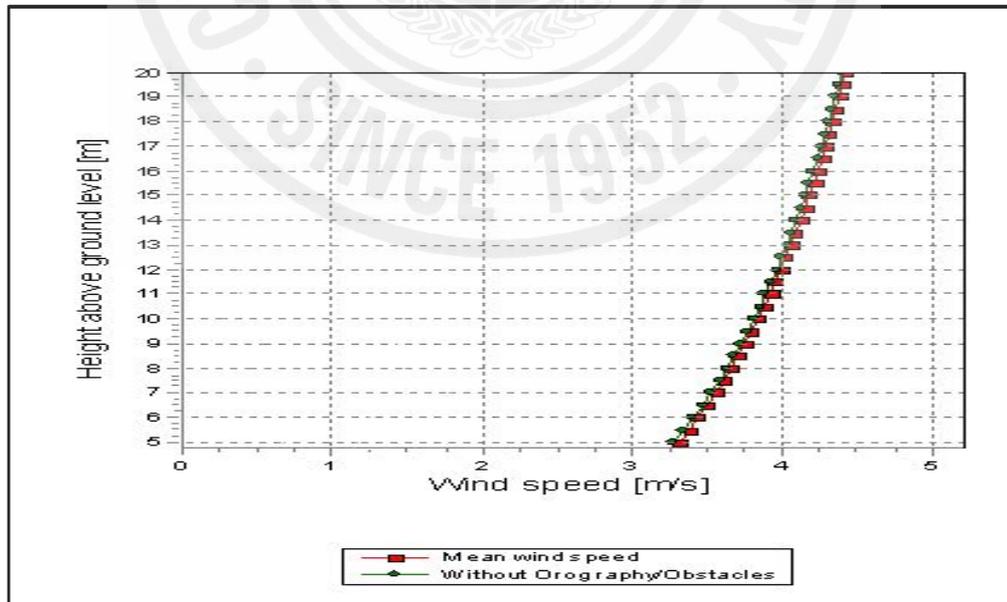


Fig. 3-8 Wind profile from WindPRO

## 2.2. WAsP를 이용한 분석

풍력자원을 분석한 값을 비교하기 위하여 본 연구에서는 덴마크 RISØ 국립 연구소에서 개발한 WAsP ver.9버전의 프로그램을 사용하였다. WAsP(Wind atlas analysis application program)은 현재 세계 70여개의 나라에서 풍력자원 평가를 위한 프로그램으로 사용하고 있다. 프로그램 사용 예를 Fig. 3-9에 나타낸다.

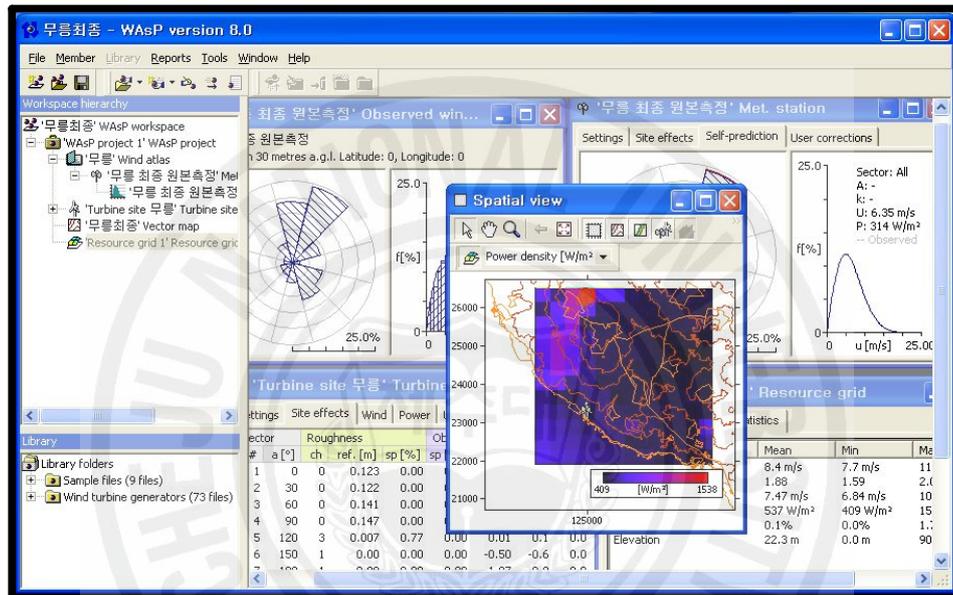


Fig. 3-9 WAsP

WAsP 내에는 OWC Wizard, map editor, Turbine editor라는 각각의 프로그램을 수행하여 데이터를 분석하고, 통합하여 원하는 Simulation을 수행하게 된다. 즉, WAsP을 통해 각 지점의 폴(Pole)에서 측정된 데이터와 유동에 영향을 주는 지역적 특성을 분석하여 풍력에너지 자원량을 예측할 수 있고, 지역의 원하는 위치에 임의의 풍력발전기나 풍력 발전단지를 조성하였을 때 어느 정도의 출력을 생산할 수 있는지를 예상할 수 있다.

실제 측정된 풍향 데이터를 가지고 풍향을 도식화 하고 풍속 빈도 분포의 수학적 모델 중 가장 적절하게 이용되고 있는 두 변수로 묘사되는 Weibull 분포 함수를 통해 A 값과 K 값을 구함으로서 측정 구간의 풍속 정보를 할 수 있다.

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right] \quad (3-4)$$

여기서  $u$ 는 풍속을 나타내고  $A$ 는 Scale parameter로 분포되는 풍속의 평균치와 관계하며,  $k$ 는 Shape parameter로 분포된 풍속의 편차와 관계하는 상수이다.  $k$ 는 클수록 높은 속도 구간에서 높은 풍속 빈도를 가지며, 풍속의 정규분포는 넓게 분포하는 것을 의미한다.

$$\overline{V} = \int_0^{\infty} P(V) \cdot V dV \quad (3-5)$$

식 (3-5) 처럼 평균 풍속을 정의 하면, 위의 관계에서 다음과 같은 일반식이 도출된다.

$$\overline{V^n} = C^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{K}\right), \quad 1 + \left(\frac{n}{K}\right) > 0 \quad (3-6)$$

따라서, 위의 관계식에서 풍속의 측정된  $\overline{V}$  및  $\overline{V^3}$  값에 의해  $C$ 와  $K$ 의 값이 계산된다.  $C$ 와  $K$  값을 알면 풍력에너지가 갖는 에너지 밀도를 식(3-7)에 의해 계산 할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} V^3 P(V) dV \\ &= \frac{1}{2} \rho A C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right) \end{aligned} \quad (3-7)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기의 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $A$ 는 공기의 투과면적 [ $\text{m}^2$ ],  $\Gamma$ 는 Gamma 함수이다.

단위면적당 바람이 갖는 풍력에너지  $P/A$ 를 풍력에너지밀도라 하고 (3-8)식과 같다.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3-8)$$

이 식은 바람의 파워해석에 있어서 중요한 식으로 바람의 에너지는 로터 회전 면적(A)에 비례하고 풍속(V)의 3제곱에 비례함을 알 수 있게 한다. 따라서 풍력 에너지를 활용하기 위해서는 조금이라도 바람이 강한 곳을 선택하는 것이 중요하다.

소형풍력발전기가 설치된 지역에서 지상으로부터 10m높이의 풍속과 풍력에너지밀도를 구해보았다. 우선 고도 값이 입력되어 있는 수치지도에 다음 Table 3-3을 참조하여 WindPRO에서 입력한 값과 대비되는 WAsP의 거칠기 길이를 선택하여 지도 작업을 하였다. 단지 내에 가동 중인 15개의 풍력발전기는 45m의 허브 높이를 가지고 있어 후류효과에 영향이 없을 것으로 판단되어 고려 대상에서 제외하였다.

Table 3-3 Roughness length of WAsP

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

Fig. 3-10은 수치지도 내의 풍속지도를 나타냈으며 풍력발전기의 바람장미도 같이 나타내고 있다. 지면에서 10m 높이의 평균풍속이 4m/s인 곳은 해안선 주변으로 나타나고 있으며 시가지역 및 중 산간 지역으로 올라갈 수 록 거칠기 길이가 커져 평균풍속이 감소하고 있다.

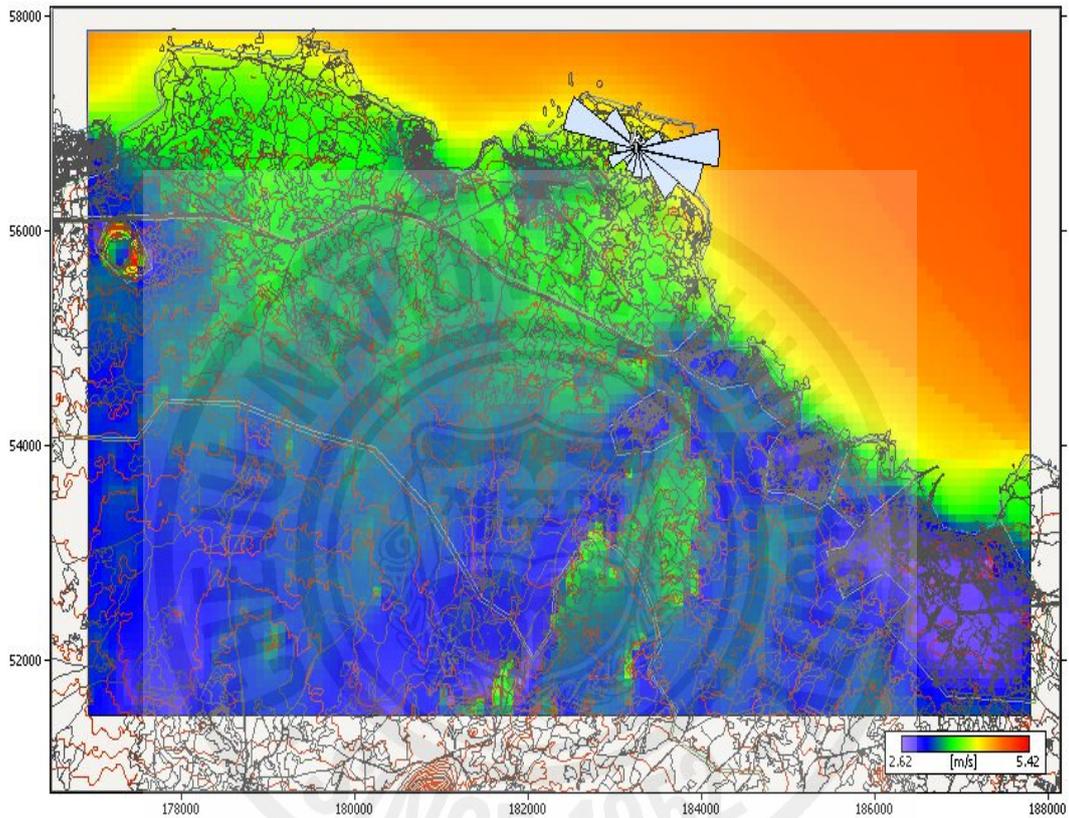


Fig. 3-10 The wind speed map from WASP

Fig. 3-11은 수치지도 내의 평균풍력에너지밀도를 나타냈으며 풍력발전기의 풍향별 예상발전량도 같이 나타내고 있다. 평균풍력에너지밀도가 평균풍속에 많은 영향을 받으므로 Fig. 3-10과 비슷한 결과를 나타냈다.

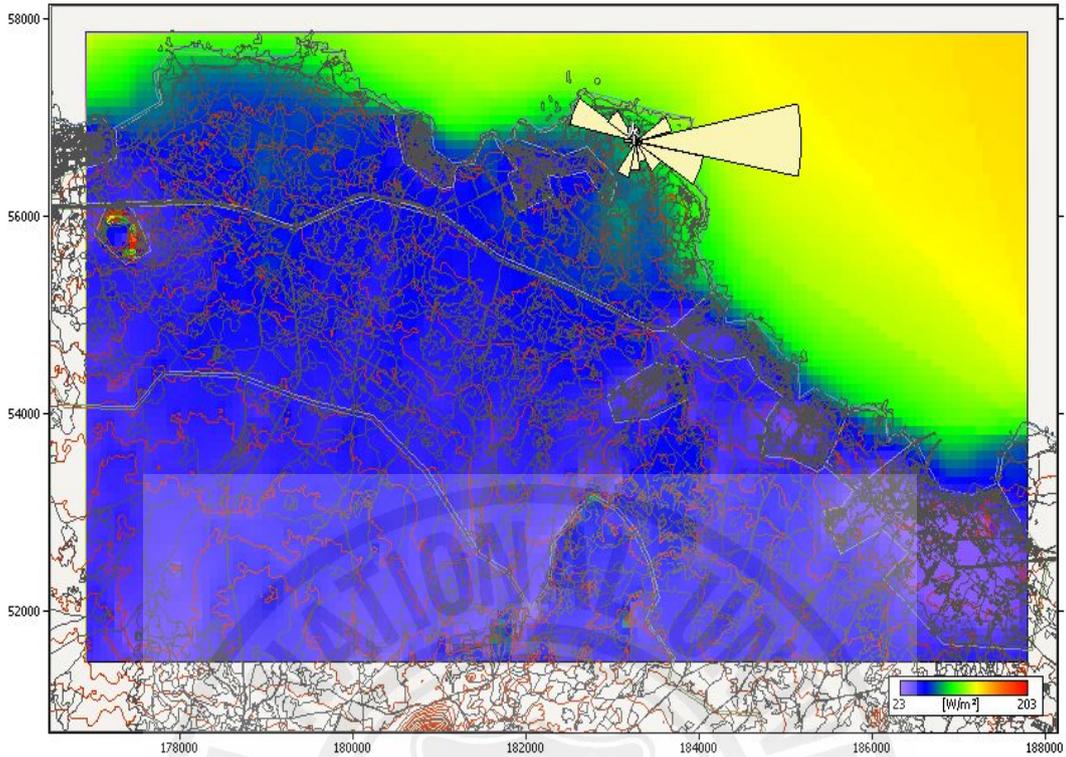


Fig. 3-11 The wind power density from WASP

### 2.3. 소형 풍력발전기의 출력성능

풍력발전기의 출력성능특성을 정확하게 평가하기 위해서는 충분한 양(Quantity)과 질(Quality)의 입력 파라메타들을 확보해야 한다. 입력(Input)파라메타 값은 평균출력, 풍속, 풍향이다. 측정 자료는 1Hz 또는 그 이상의 주기로 획득 및 저장되어야 한다. 자료군은 연속 측정된 자료의 10분 평균값을 기본으로 하였다.

시험평가를 위한 분석에 사용된 자료는 풍력발전기가 정상운전중인 상태에서 획득되어야 하고 외부요인에 오염되지 않아야 한다. 이를 위해 다음 환경에서 획득된 자료는 고려하지 않는다.

- 풍속 이외의 외부조건에서 운전 범위를 벗어난 경우
- 장애로 인해 운전 불능인 경우

- 인위적으로 운전 중단 혹은 유지/보수 중인 경우

### 2.3.1. 자료 보정

#### 3.3.1.1. 높이 보정

풍속은 지표높이 및 주변의 지형상태에 따라 값이 다르기 때문에 보정이 필요하다. 본 패키지 개발에 사용된 방법은 대수법칙을 이용해 풍속과 임의의 높이에서의 풍속을 구할 수 있다.

$$V_z = V_h \left( \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_0}} \right) \quad (3-9)$$

여기서,  $V_z$ 는 높이  $Z$ 에서의 풍속이고  $V_h$ 는  $h$  높이에서 풍속이다.  $Z_0$ 는 조도계수로서 지표면 상태에 따라 정해진다. 식(3-9)을 통해  $V_h$ 의 값으로  $V_z$ 의 값을 구하게 된다. 하지만 복잡지형에서는 위 법칙에 크게 벗어나므로 정확한 값은 실측을 통해서 구해야만 한다. 본 실험에서는 소형 풍력단지 허브 높이와 같은 높이에서 풍황을 분석해 높이 보정이 필요 없다.

#### 3.3.1.2. 공기밀도 보정

측정된 데이터는 두 가지 기준 공기 밀도에 대하여 IEC61400-12에 의거해 표준화 하여야 한다. 하나는 허용편차가  $0.05\text{kg}/\text{m}^3$  인 범위 내에서 사이트에서 측정된 공기 밀도의 평균이고 다른 하나는 ISO 표준대기( $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ ) 표준 해수면 공기밀도이다. 표준화는 식(3-10)로 수행한다.

$$P_{10\text{min}} = \frac{B_{10\text{min}}}{R_0 T_{10\text{min}}}$$

(3-10)

$T_{10\text{min}}$  : 10min Averaged Absolute Temperature[K]

$B_{10\text{min}}$  : 10min Averaged Air Pressure [Pa]

$R_0$  : Specific Gas Constant 287.05[J/kg.K]

만약 시험평가 현장의 평균 공기밀도가  $1.225 \text{ Kg/m}^3 \pm 0.05 \text{ Kg/m}^3$  의 범위를 벗어난 경우 또는 사전에 정의된 표준 공기밀도가 적용되어야 하는 경우에는 표준 해수면 공기밀도에 대한 경우와 같이 측정 출력곡선이 보고되어야 하기 때문에 반드시 평가 현장의 공기밀도에 대해 표준화되어야한다.

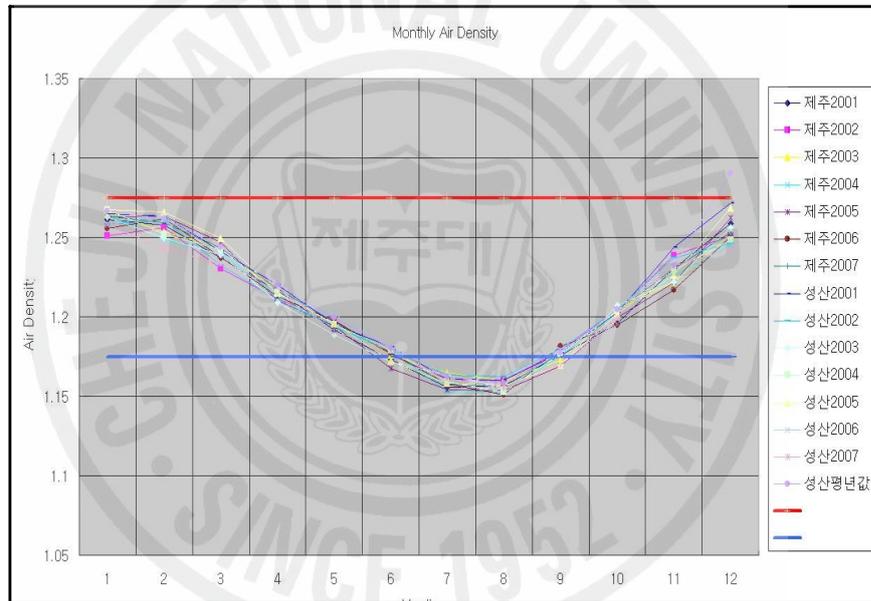


Fig. 3-12 Monthly air density

본 연구의 시험 사이트는 행원으로서 제주기상대와 성산기상대 중간에 위치해 있어 Fig. 3-12처럼 두 곳의 공기밀도를 이용하여 행원 공기밀도를 추정하였다. 겨울철에는 허용편차 내에 있고 여름철에는 허용 편차 밖에 위치하고 있다. 본 실험을 수행한 시기가 6월 달이므로 표준화된  $1.225 \text{ Kg/m}^3$ 를 사용 하였다.

### 3.3.2. Power Curve

소형 풍력 발전기 제작사로부터 받은 파워 커브와 실제 설치된 소형 풍력 발전기에 파워커브를 보면 Fig. 3-13, Fig. 3-14와 같다.

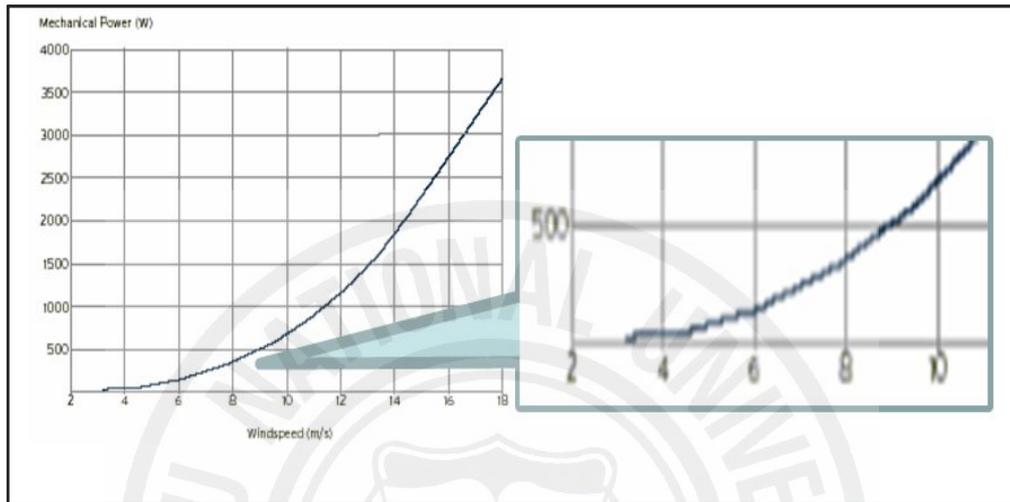


Fig. 3-13 Power curve from manufacturer

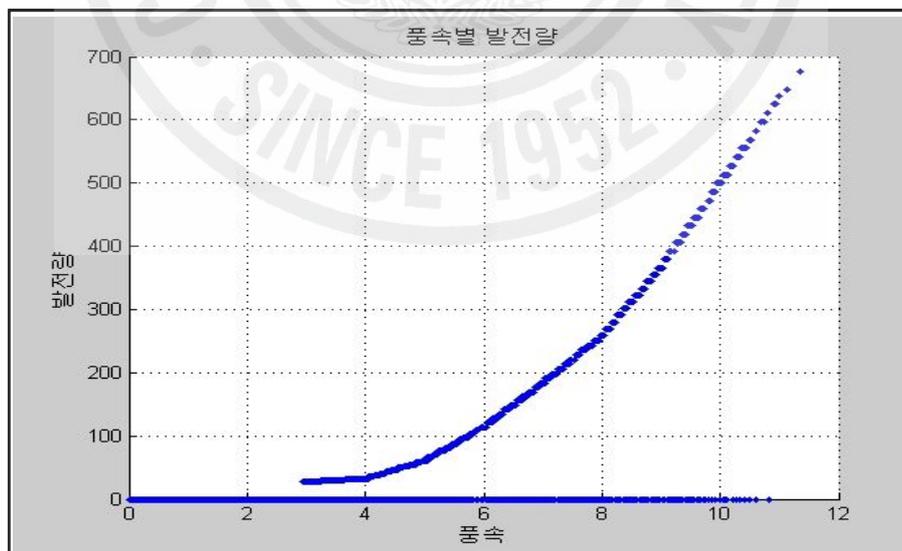


Fig. 3-14 Measured power curve

Fig. 3-13은 제작사에서 제공한 파워 커브와 Fig. 3-14는 실제 측정한 파워 커브이며, 이 두 그래프를 비교해 보면 제작사에서 제공한 파워 커브에서 10m/s는 700W 정도 출력이 나타나고 있으나, 실제 측정한 파워 커브는 10m/s에서는 약 500W 정도의 출력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Generator의 내부 영구자석의 문제로 추측되며, 원인은 영구자석의 개수의 부족으로 오는 현상으로 보인다. 이로 인한 또 다른 현상 중 풍속이 증가 하여도 발전이 안 되는 구간도 볼 수가 있다.

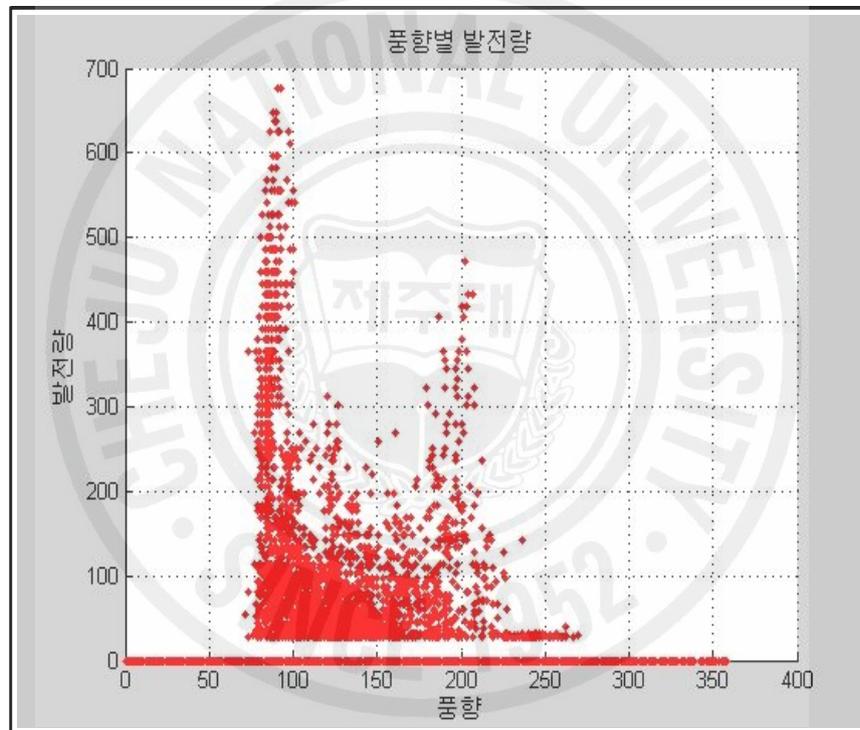


Fig. 3-15 Product power of wind direction

실제 기상 탐에서 측정된 풍향별 발전량 그래프를 보면 70~220 도 사이의 풍향에서만 발전이 되고 있다는 걸 알 수 있다. Fig. 3-16은 바람장미를 나타낸 것이며 실 풍향의 분포 분석과 발전량에 대한 비교하여 볼 수 있다.

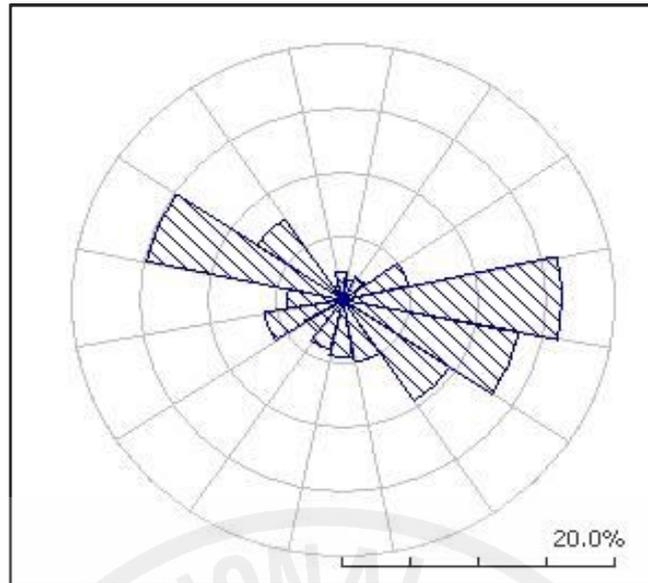


Fig. 3-16 Wind direction

이 그림으로부터 동풍과 서풍의 빈도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 3-15로부터 동풍 계열 바람과 남남서, 남서풍 계열의 바람에서 발전이 되어야 한다. 그러나 동풍, 남서풍 및 남남서풍 쪽에서의 발전은 일어나고 있으나 서북서쪽으로 불어오는 바람에 대하여 소형 풍력발전기의 발전은 일어나지 않고 있다. 이는 최초 소형 풍력 발전기를 설치 할 때 정확한 균형을 맞추지 못해 풍력 발전기가 남동쪽으로 기울어져 있고 소형 풍력발전기의 하중이 남동쪽으로 치우쳐있어 다른 방향에 대해 요 동작이 정확히 이루어지지 않았기 때문이다. 향후 발전기의 설치시 수직, 수평에 대한 수정이 있다면 제작사 파워커브와 동일한 발전데이터를 충분히 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

### 3. 결 론

제주도 행원 풍력발전단지 내에서 소형 풍력발전기의 성능을 평가하기 위하여 풍황분석 및 성능측정이 이루어졌다. 측정기간은 2008년 5월과 6월로 약 2개월 간이었다. 소형 풍력발전기의 정격출력은 720W였고, 허브높이는 지상으로부터 10m였다. 허브높이와 같은 높이의 기상측정마스트가 세워졌고, 이로부터 10분 평균 바람 데이터가 얻어졌다. 또한 WindPRO와 WAsP을 이용하여 풍황분석을 하였고, 현장에서 직접 소형 풍력발전기의 출력 데이터를 수집하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 행원 풍력발전단지 내의 측정기간 동안 평균풍속은 4.2m/s였고, 주풍 향은 동풍과 서북서 풍이었다. 난류강도 특성은 IEC 규정에 의거하여 저 난류특성을 보였다. 따라서 행원지역은 소형 풍력발전기의 성능시험을 하기에는 좋은 풍황 조건을 갖추었다고 생각된다.

2. 소형 풍력발전기의 성능은 제작사에서 제시한 출력곡선 보다 조금 낮게 측정되었다. 이것은 소형 풍력발전기 설치 시 시행착오로 인한 결과로 사실상 제작사의 출력곡선과 비슷하게 측정되었다고 할 수 있다.

3. 이 연구에서 소형 풍력발전기의 요잉(Yawing)은 공기 역학적으로 방향이 제어되는 팬 테일 형식이었다. 소형 풍력발전기 설치 시 남동쪽으로 10도 가량 기울어져 있었기 때문에, 남동풍 계열에서는 제작사에서 보내온 파워커브와는 비교적 정확한 풍속에 따른 발전량을 보였다. 그러나 북풍 계열에서는 낮은 풍속일 때는 요 시스템이 동작을 하지 않아 발전이 되지 않고 서풍 계열일 경우 요 시스템이 정확히 서풍 쪽으로 움직이지 않고 중간쯤의 남서쪽으로 움직여서 발전을 하게 되어 실제 발전량 보다 훨씬 적은 양이 발전되었다. 추후 소형 풍력발전기 설치 시 폴의 수직, 수평이 중요한 문제가 될 것이고, 팬 테일의 설계와 구조, 설치각도, 무게, 넓이 등의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 참고문헌

- [1] 김은일. “세계 2005 풍력발전시장 동향과 시사점” 2006년도 추계학술발표대회 논문집, pp. 182~187, 2006.
- [2] 이춘식의 “소형 수평축 풍차 및 풍력발전시스템 개발에 관한 연구” 한국과학기술원, 1989.
- [3] 이재결, 박민희, 김정주. “전력시장 측면에서 제주지역 풍력발전의 도입에 따른 영향” 한국풍력에너지학회 춘계국제학술대회 논문집, pp. 15~18, 2007.
- [4] 김만응, 음학진, 원종범. “풍력발전설비의 인증제도에 대한 최근동향” 한국풍력에너지학회 춘계국제학술대회 논문집, pp. 89~93, 2007.
- [5] 김건훈의 "소형풍력발전기기 성능평가 사업 Kier", 1998.
- [6] 김건훈, 주영철. “풍력발전단지 경제성에 미치는 영향 분석” 한국풍력에너지학회 춘계국제학술대회 논문집, pp. 113~120, 2007.
- [7] 고경남, 허종철 "공역 풍력공학입문 기초이론부터 풍력발전기술까지" 2006.
- [8] 김건훈, 장문석, 김은일, 경남호, 김석우, 김성완, 김홍우, 주영철, 허종철, 김세호. “풍력발전단지 건설 타당성 조사” 2006.
- [9] IEA, “IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation-Power Performance Testing, 2ND ED”. 1990.
- [10] IEA, “IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation-Measurement of Noise Emission 2ND ED”. 1988.
- [11] Germanischer Lloyd, "Testing of Wind Turbines", 1994.
- [12] IEC 34 : "Rotating electrical machine"
- [13] IEC 269-12 : "Low-Voltage fuses - part 2: Supplementary requirements for fuses for use by authorized persons(fuses mainly industrial application)" 1986.
- [14] IEC 439 : "LV switch gear and control assemblies"
- [15] IEC 617 : "Graphical symbols for diagram"

- [16] IEC 721-2-1 : "Classification of environmental condition - Part 2: Environmental conditions appearing in nature. Temperature and humidity" 1982.
- [17] IEC 755 : "General requirements for residual current operated protective devices" 1983.
- [18] IEC 896 : "Stationary lead-acid batteries. General requirements and methods of test"
- [19] IEC 898 : "Electrical accessories - Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations" 1995.
- [20] 강문중, 고경남, 허종철. "풍력발전시스템의 연별 운전특성 및 고장분석" 2006년도 추계학술발표대회 논문집, pp. 194~200. 2006.
- [21] 허종철, 조경호, 외 "제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구" 2000.
- [22] 허종철, 김세호, 조경호, 김일환, 김태일, 김홍수, 양영철. "제주도내 풍력발전단지 종합건설 계획수립에 관한 연구" 1998.
- [23] 허종철, 임종환, 김귀식, 김세호, 김일환, 강철웅, 고경남. "풍력발전시스템의 실증평가 기술개발" 2006.
- [24] 김상진외, "산업자원부 최종보고서 10KW급 소형풍력발전기 표준형 상용시스템 개발"
- [25] 김건훈, 장문석, 김은일, 경남호, 김석우, 김성완, 김홍우, 주영철, 허종철, 김세호. "풍력발전단지 건설 타당성 조사" 2006.
- [26] 이화윤, 김동혁, 이순환, 최현정, 임현호, 김현구, 정우식. "한반도 저해상도 바람지도의 풍향정보 해석에 관한 연구" 한국풍력에너지학회 춘계국제학술대회 논문집, pp. 101~106, 2007.

## 감사의 글

주경야독 참으로 힘든 시간 이었습니다. 나이 들어 이 어려운 공부의 시작 또한 만만한 일은 아니었습니다. 하지만 보람도 있고, 의미도 있고, 실망도 있고, 무지도 있고, 눈물도 있는, 이 논문은 저에게 아주 소중한 것인 것만은 분명합니다. 나이 들어 공부한다고 미안해하시며 학비를 건네며 눈시울 붉어지던 어머니께 가장 먼저 감사드리며, 언제나 아이들 교육과 가정의 화목을 위해 항상 구김 없는 모습으로 이연구가 끝나는 이날까지 저에 곁에서 사랑으로 안아주었던 아내 이해자 씨에게도 감사드리며, 그리고 아직까진 공부가 무언지 어려움이 무언지를 알지 못하지만 항상 착하고 바른 우리 쌍둥이 그동안 놀아주지도 못하고 맨 날 퇴근과 동시에 사라지는 아빠를 위하여 열심히 응원하여준 사랑하는 다정 이 한빈이 에게 감사의 글을 먼저 드립니다.

2년 전 처음 유체실험실의 문을 두드렸을 때 따스하게 안아주신 허종철 교수님 무엇하나라도 저희들에게 주시려고 만 하신 교수님 언젠가 실험실 학우들과 식사를 하시면서 “난 욕심 없다 너희들과 내가 연구할 수 있는 이 일만 있으면, 돈도, 명예도, 그 무엇도 필요 없다.” 라고 하신 말씀이 생각납니다. 그때 저는 허종철 교수님이 진정 사랑 하시고 아끼는 것이 무엇인지 알 것 같았습니다.

본 논문이 완성되기까지 많은 시행착오가 있었습니다. 하지만 정성을 다하여 지도하여 주시고 이끌어 주신 허종철 교수님께 가장 먼저 감사드립니다.

그리고 학문이란 어떤 것인가를 잘 일깨워주신 권기린 교수님, 항상 바쁘시지만 웃으면서 저희들을 가르쳐 주신 현명택 교수님께 감사드리며, 그 외에 많은 관심을 가져주시고 조언해 주신 김귀식 교수님, 정동원 교수님, 박윤철 교수님, 임종환 교수님께 감사의 마음을 전합니다.

또한 이 논문의 실험 장치부터 설치, 논문작성까지 열심히 저를 이끌어주신 우리 실험실 고경남 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 이 논문이 만들어 지기까지 저와 동행하면서 실험실에서 잠을 청하며 고생한 우리 실험실 살림꾼 현석균, 승건균, 정식균, 수윤양, 경국균, 우리 실험실이 아니지만 너무 힘

들어 포기하려 하였을 때 곁에서 아주 중요한 도움을 준 김준철군에 진심으로 감사하며 잊지 못할 도움에 이렇게 몇 자의 글로 감사 인사드립니다. 유체역학 실험실에서 그동안 함께한 시간은 짧아도 몇 십 년을 같이한 것처럼 느껴지는 정말 소중한 좋은 친구 김경보와, 박윤범 친구에게 감사드리며, 지금은 필리핀 유학중인 강문중군에게도 감사 인사드립니다. 또한 직장 동료 여러분 제가 연가내고 학교가면 덤으로 제가 할 일을 처리하느라 고생 많이 하셨습니다. 이제 직장으로 돌아왔으니 그간 다하지 못한 업무까지 열심히 노력하여 배우고 익힌 내용을 조금씩 적용시키며 업무에도 충실 하겠습니다. 그동안 감사합니다.

끝으로 저를 도와주신 저에 친인척 여러분, 우리 실험실 선 후배님들, 학우님들께 감사의 글을 올립니다. 진심으로 감사하며 언제나 가정에 행복만이 가득하시길 간절히 기도하면서 이만 감사의 글을 마치고자합니다.

여러분 사랑합니다.

2008년도 8월 임 치운 배상