

工學碩士 學位論文

옥상용 소형풍력발전기의
실증 실험 연구

*On-site test of small wind power generator
for roof-top of building*

指導教授 金仁洙

2008年 7月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

土木環境工學科

梁鎮佑

本 論文을 梁鎮佑의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 鄭 柄 健 (印)

委 員 工學博士 宋 永 彩 (印)

委 員 工學博士 金 仁 洙 (印)

2008年 7月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

土 木 環 境 工 學 科

梁 鎮 佑

목 차

목 차	i
<i>List of Tables</i>	iii
<i>List of Figures</i>	iv
<i>Abstract</i>	v
1. 서 론	1
2. 문헌연구	3
2.1 소형풍력발전기의 개요	3
2.2 풍황해석	8
2.2.1 풍속의 도수 분포	8
2.2.2 풍력발전시스템의 성능과 지표	9
2.2.3 연간 발전량의 추정	10
2.3 외국의 풍력발전 동향	12
2.3.1 신재생에너지의 보급 현황	12
2.3.2 신재생에너지의 정책	17
2.4 국내의 소형풍력발전 동향	21
2.5 소형풍력발전기의 국제 경쟁력 분석	23
2.6 소형풍력발전기의 국제시장의 동향과 전망	25
2.7 소형풍력발전 기술개발의 요소	26
3. 실험 장치 및 실험	27
3.1 실험 장치	27
3.1.1 설치 시스템의 개요	27
3.1.2 발전부분 약도	28
3.2 측정 장비	34

3.2.1 측정기기	34
3.3 실험방법	35
3.3.1 풍속측정방법	35
3.3.2 발전 전압측정 방법	35
3.3.3 축전기 전압 측정 방법	35
3.3.4 진동 소음 측정 방법	35
3.3.5 부하램프의 소비전력	35
4. 실험 결과 및 고찰	36
4.1 연간 풍속의 변화	36
4.2 풍속과 발전전압	39
4.3 축전기 월 평균 전압 변화	40
4.4 풍속과 소음 변화	41
4.5 문제점 보완	42
5. 결 론	45
참고문헌	46

List of tables

Table 1. Gruping of small wind generation	6
Table 2. Relation of design and blade	6
Table 3 Status of supply new-renewable energy (2004)	13
Table 4 Cost of generation and invested to new-renewable energy	16
Table 5 Other country's goal of supply of new-renewable energy	18
Table 6 Analysis of competitive power of core technology	24
Table 7 Average wind speed(m/s) Busan/2008	36
Table 8 Survey wind speed of top building	36
Table 9 Average wind speed at monthly	37

List of figures

Fig. 1 Air flow through a wind turbine rotor	3
Fig. 2 Frequency distribution of wind speed(oshima, Japan 1967~1976)	8
Fig. 3 Relationship between power and wind speed	9
Fig. 4 Annual power generation by small wind generator type of 1 kW	11
Fig. 5 Status of power generation facilities	14
Fig. 6 Status of wind power generation	15
Fig. 7 EU's goal of supply of new-renewable energy	18
Fig. 8 Maturity and competitive power of wind power generation	21
Fig. 9 Circuit of all	27
Fig. 10 Part of generation	28
Fig. 11 Part of generation	29
Fig. 12 Circuit of converter system	29
Fig. 13 Converter system	30
Fig. 14 Generator of AFPM type	30
Fig. 15 Blade	31
Fig. 16 Converter	31
Fig. 17 Yawing	32
Fig. 18 Auto power supply	32
Fig. 19 Test lamp	33
Fig. 20 Average wind speed (2007)	38
Fig. 21 Max. wind speed (2007)	38
Fig. 22 Relation of wind speed and output voltage	39
Fig. 23 Change average voltage of battery	40
Fig. 24 Change of noise and wind speed	41
Fig. 25 Circuit of auto stop system	43

Abstract

As the demands of the renewable energy is going to be higher for overcoming the era of high oil prices, now we're facing totally new aspects of technologies in related with the wind power generation.

Due to the lack of related technologies and social, economical background with wind power generation in Korea as an early stages in this industry, we have to develop our own wind power system which is suitable into Korean environments.

In this study, we have introduced the micro generation from the small wind power generators which is built on the roof of building in the city and have performed on-site test in various conditions such as environmental, economical, and practical aspects after installing small wind power generator of 1 kW on the high storied building in the beach of Busan city for the commercialization of it. By those efforts, we have proposed the commercial model of small wind power generator that simply can be built on the roof of building after those tests and have suggested some important points to make up the weak points of current on-site test by comparing test results with the actual problems that could be occurred in the fields. The results of this study could be useful for the evaluating of the possibility of wind-power generation in the cities located in the beach that has a bit stronger winds than other cities inland, and this kinds of wind power generating on the buildings in the cities might suggest new concepts of own-generating buildings as an new source of environmental - friendly energies against the era of high oil prices.

1. 서 론

고유가시대에 부응하여 신재생에너지에 관한 관심이 범세계적으로 고조되고 있는 추세에 따라 풍력 발전에 관련된 제반 기술도 획기적인 발전의 전기를 맞고 있다. 풍력발전은 자연에서 얻을 수 있는 무한한 무공해 에너지원 중의 하나로 산간이나 해안오지, 낙도 등의 전력 미공급 지역에 손쉽게 전기를 공급할 수 있는 획기적인 대체에너지원으로 평가되고 있다. 풍력발전의 기본원리는 다양한 형태의 풍력터빈을 이용하여 바람의 운동에너지를 기계적 에너지로 변환하고, 이 기계적 에너지로 발전기를 구동하여 전력을 얻어내는 시스템으로 무한한 청정에너지인 바람을 주 동력원으로 사용하므로 기존의 화력발전이나 원자력발전에 비해 발열에 의한 열 공해나 대기오염 그리고 방사능 누출이 없는 무공해 발전방식이다. 2007년 기준으로 약 74 GW 용량의 풍력발전시스템이 전 세계적으로 설치되어 운전되고 있으며 매년 약 15 GW 용량의 풍력발전시스템이 새로이 설치되고 있다. 이러한 발전량의 증가는 같은 해 건설된 원자력발전소의 용량을 초과하는 것으로 2010년에는 전 세계 풍력발전이 142 GW에 달할 전망이다.

우리나라도 현실적인 에너지문제에 대응하기 위하여 대체에너지 발전시스템에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 특히 풍력발전시스템은 구조가 간단하고 설치, 운영 및 관리가 용이하며 무인자동화 운전이 가능한 시스템으로 지방자치단체들의 적극적인 장려정책에 힘입어 태양열 발전과 함께 소규모 사설 풍력발전소의 설치가 급속히 증가하고 있는 중이다. 그러나 아직까지 우리나라는 풍력발전 보급의 초기단계로 극복해야 될 수많은 경제적, 사회적 제반 문제와 한국의 환경에 적합한 풍력시스템을 개발해야 하는 기술적인 문제를 안고 있다. 유럽이나 미국 캐나다 등 풍력발전의 선두주자들은 국가차원의 지속적인 지원과 노력으로 풍력발전시스템의 연구 개발에 많은 투자를 해 오고 있으며 소형풍력 발전기의 부품 및 완성품에 대한 산업규모가 나날이 커지고 있으므로

향후 관련 산업의 세계시장도 비약적으로 성장할 것이 예상된다.

본 연구에서는 도심의 빌딩 옥상에 풍력발전기를 설치하여 자가 전력을 생산하는 분산형 소규모발전의 개념을 도입하여 풍력 발전의 조건이 비교적 좋은 부산광역시의 해안가에 위치한 고층 건물위에 상용화가 가능한 1 kW급의 소형 풍력발전기를 설치하여 환경성, 경제성, 및 실용성 등의 여러 가지 조건에 대하여 다각적인 실증실험을 수행하였다. 실험을 통하여 수집된 데이터를 실제 일어날 수 있는 여러 가지 문제점과 비교하여 실증 실험에 대한 보완점을 제시하였으며 고층 빌딩의 옥상에 간편하게 설치하여 운영할 수 있는 소형풍력 발전기의 상용 모델을 제시하였다. 본 연구의 결과는 비교적 풍력이 센 해안가 도심지역의 풍력발전가능성을 가늠해 볼 수 있을 것이며 고유가시대의 친환경적 에너지원으로서 풍력발전이 옥상에서 가능한 자가 발전형 빌딩의 새로운 개념을 정립하는데 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 문헌연구

2.1 소형풍력발전기의 개요

바람을 이용하는 풍력발전은 풍속에 의해 발생된 풍력에너지를 1차적으로 풍력터빈의 회전날개에 의해 기계적 에너지로 변환하고, 이 변환된 기계적 에너지를 이용하여 발전기의 회전을 구동하여 최종적으로 전기에너지를 출력한다.

풍력발전기 시스템은 회전축의 방향에 따라서 크게 수평축 풍력터빈과 수직축 풍력터빈으로 분류되며 수평축 방식이 공력 및 구조적인 관점에서 편리함과 동시에 효율성이 높기 때문에 현재 상용화되어 가동되고 있는 풍력시스템 대부분은 수평축이며 블레이드 제너레이터 전력변화장치로 대별되어진다.

풍력발전 시스템에서 단위 면적당 공기 역학적 출력과 이로부터 회전자축에 얻어지는 이상적인 기계 출력(P)은 풍속(V)의 세제곱에 비례하는 베틀(Betz)의 이론으로 나타낸다.

*Betz*의 이론

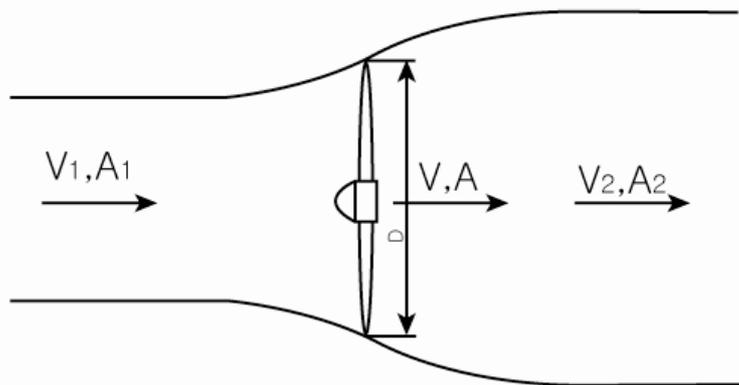


Fig. 1 Air flow through a wind turbine rotor

Fig. 1과 같이 풍력터빈의 회전 단면을 전후한 유동에 대하여, 풍력터빈으로부터 먼 상류에서 풍력터빈의 회전 단면을 지나는 유관의 단면적을 A_1 이곳에서 풍속을 V_1 , 풍력터빈의 회전 단면적을 A , 회전 단면을 지나는 유속을 V , 풍력터빈으로부터 먼 하류에서 유관의 단면적을 A_2 , 그리고 이곳에서의 유속을 V_2 라고 하면 다음과 같은 식들이 질량 보존 및 운동량 보존 관계로부터 유도될 수 있다.

$$\text{연속 방정식 : } A_1 V_1 = AV = A_2 V_2 \quad (1)$$

$$\text{축 방향 힘 : } F = \rho AV(V_1 - V_2) \quad (2)$$

$$\text{축 방향 동력 : } P = FV = \rho AV^2(V_1 - V_2) \quad (3)$$

$$\text{운동에너지 차이 : } \Delta K.E. = \frac{1}{2} \rho AV(V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$

$P = \Delta K.E.$ 인 관계로부터 $V = (V_1 + V_2)/2$ 이 되므로 축 방향 힘과 출력은 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho A(V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \quad (6)$$

최대출력을 구하기 위하여 하류 속도 V_2 로 (6)식을 미분한 값이 '0'이 되는 조건을 구하면 $V_2 = V_1/3$ 또는 $V_2 = -V_1$ 이 된다. 여기서 두 번째 결과는 무의미하므로 $V_2 = V_1/3$ 을 적용하면 최대출력은 다음식과 같다.

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 = 0.37 A V_1^3 \quad (\text{for } \rho = 1.25 \text{ kg/m}^3) \quad (7)$$

따라서 풍력터빈의 이론 최대 동력 계수는 다음과 같고, 이를 Betz계수라 하며 모든 풍력터빈의 동력 계수는 이 값 보다 작아야 한다.

$$C_{p \max} = \frac{P_{\max}}{1/2 \rho A V_1^3} = \frac{16}{27} = 59.3\% \quad (8)$$

여기서 출력계수 $C_{p \max}$ 는 블레이드 단면 형상에 의해 결정되며 그 최대값이 0.593을 넘지 못하며 주속비(λ)의 함수로 나타난다. 바람의 운동 에너지 중에서 최대 59.3%까지 전기 에너지로 변환될 수 있지만, 풍력 발전기 날개와 기기의 효율을 고려하면 그 값은 더 낮아진다.

수평축 소형 풍력 시스템은 타워, 로터 블레이드, 발전기, 요잉(Yawing)과 꼬리날개(Tail vane)로 구성된다. 일반적으로 수평축 발전기에는 보통 3개의 로터 블레이드를 사용하고 날개 끝 속도비(Tip speed ratio)는 5~8이며 에어포일은 종전에 NACA 계열을 그대로 사용하거나 개선하여 사용 하였는데 최근에는 풍력 발전 전용으로 개발된 여러 가지 에어포일들이 사용된다.

수평축 로터 블레이드는 항력과 양력을 이용하여 회전력을 얻기 때문에 무게, 강도, 재질, 표면처리에 따라서 특성이 달라진다.

소형 풍력 발전기란 용량의 크기가 100 kW 이하 또는 10 kW 이내로 정확한 규정이나 범위가 명확하지 않지만 수평축(Horizontal axial wind turbine)에 서는 구조적으로 꼬리 날개(Tail vane)를 이용하여 풍향을 추종하는 시스템을 소형이라 할 수 있다. 또 다른 분류로 IEC에서는 로터 회전면적 40 m²(로터직경 7.1m)이하를 소형풍력발전으로 정의해 왔지만 2000년부터 로터 회전면적 200m²(로터직경 16 m)이하로 정의 범위가 확대되었다.

현재 일본에서는 Table 1과 같이 소형풍력발전을 세분화하여 나타내고 있으

며 그중에 마이크로풍력과 미니풍력이라고 분류하는 5 kW 이하가 압도적으로 많이 설치되고 있다.

Table 1. Kinds of small wind generation

Section	Generation (kW)	Rotate R (m)	MAX. (rpm)	Expenses	Type of generator
Micro	1	1.5	700	Light yacht	pm.
Mini	5	2.5	400	Garden house	pm, Induction
Small	20	5	200	Island untapped area	pm, Induction

Table 2. R-dependent with factor of design

Factor of design	R-Dependent
Reynolds number	R
Output	R ²
Centrifugal load	R ³
Starting torque	R ⁴
Blade inertia	R ⁵

이 소형풍력발전에서는 Table 2에서 나타내는 것과 같이 그 설계 운전 요소가 로터 블레이드 반경에 의존하게 된다. 단 여기서는 각각의 블레이드의 기하학적 형상이 거의 동일하고 재료 밀도도 균일한 블레이드가 같은 주속비로 운전되고 있다고 가정하고 있다.

블레이드의 에어포일은 풍력발전기의 여러 가지 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 일반적으로 에어포일을 선정하는 기준은 레이놀즈수 변화에 따른 압력의 변화가 적을 것, 최대의 양력 계수 및 실속 받음각이 클 것, 최대 양항비가

클 것, 구조적 강도 보강을 위해 두께가 비교적 두꺼울 것 등이 있다. 또한 출력제어방법에 따라서도 각각 목적에 맞는 에어포일이 선정된다.

Table 2에서 나타낸 것과 같이 레이놀즈수의 영향이 작다고 할 수 있는 마이크로 풍력발전에서는 기동 토크가 과제로 되는 것이다. 영구자석을 이용하여 코킹(cogging)이 있는 마이크로 풍력발전에서는 블레이드의 회전 효율을 높여 기동을 용이하게 하고 있다. Table 1의 분류대로 미니풍력발전은 마이크로풍력발전 보다 블레이드 반경이 크기 때문에 기동 토크가 크게 되어 용이하게 가동되지만 그 반면에 관성도 크기 때문에 회전수가 증가 하는 데는 시간이 마이크로 풍력발전보다 더 걸린다.

소형 풍력 발전기는 도서 산간이나 계통에 접근이 용이 하지 않은 지역 및 도시 근교에 설치되고 있다. 수 kW급 이하의 소형 풍력 발전기는 저 비용으로 개인이 직접 설치하여 에너지 절약 효과를 느낄 수 있는 장점이 있기 때문에 대형 시스템과는 별도의 시장을 확보 하고 있으며, 지속적으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 소형 풍력 발전기 설치 시 요구되는 사항 및 사용자에게 실용적이고 경제성을 갖추기 위해서는 아래와 같은 요구 조건을 갖추어야 한다.

소형 풍력발전기 설치 조건(경제성 및 실용성을 감안 할 경우)

- △ 바람 자원이 풍부한 곳
- △ 용지 확보가 용이한 곳
- △ 고도 제한, 기타 규제가 없는 지역
- △ 계통 접근이 불가능 지역
- △ 건물의 에너지 절약형 구조
- △ 소용량 소비전력 장비 운용
- △ 무인 자동화 시스템 관리

2.2 풍황해석

2.2.1 풍속의 도수 분포

일정 기간에 각기 다른 풍속의 변화를 보여 주는 것으로 도수로써 시간수를 이용하거나 %를 이용하며 모든 관측 자료에 대한 비율로서 나타내며 이를 상대도수 또는 출현확률이라고 한다.

Fig. 2에 풍속의 도수분포에 대한 예를 보인다.

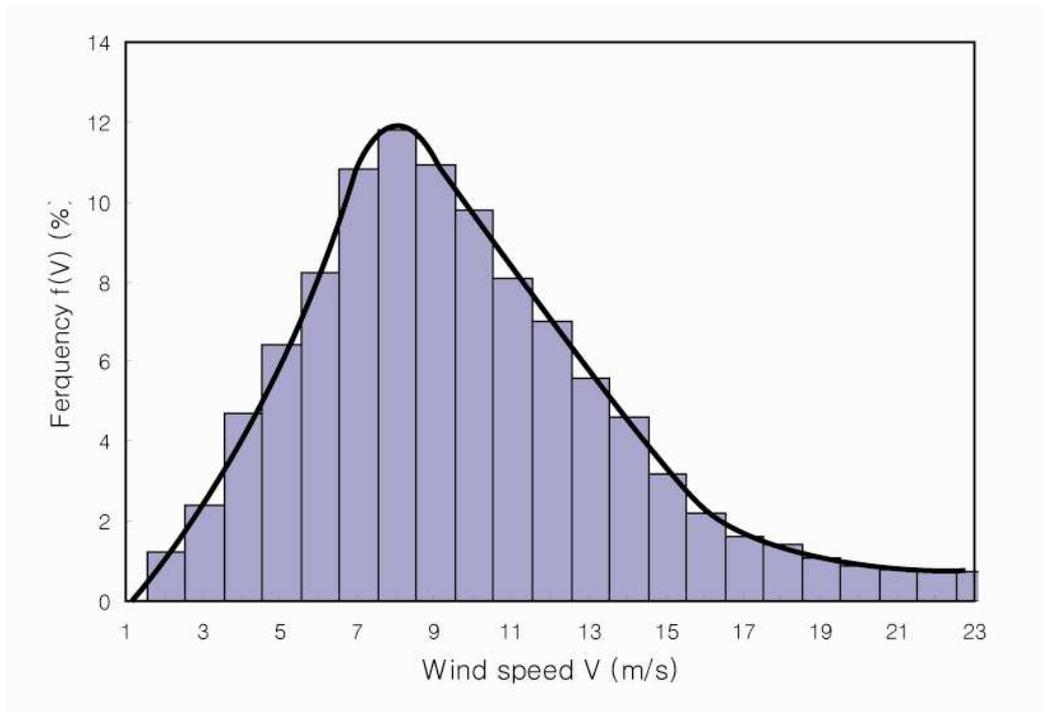


Fig. 2 Frequency distribution of wind speed(Oshima, Japan 1967~1976)

상대도수를 풍속의 크기에 따라 일정한 방향으로 차례로 가산한 것을 상대누적도수라 하고, 풍속과 상대누적도수의 관계를 그림으로 나타낸 것을 풍황곡선이라한다. 풍속의 도수분포는 Fig. 2에서도 알 수 있는 바와 같이 좌우 비대칭으로 도수의 최대는 약풍 쪽인 좌측으로 치우쳐져 있다. 도수분포를 수직으로

나타내는 연구가 지금까지 많이 행해져서, 포아송 분포, 오류송 분포, 피아송 3 분포, 와이블 분포, 카이(레일리) 분포, 야코부스의 분포식 등이 제안되고 있지만, 이 중에서 풍속의 도수 분포에 잘 맞고 도수 분포를 조사 하는 경우나 품질관리 등에 압도적으로 많이 사용되고 있는 것이 확률밀도함수인 와이블 (weibull) 분포 함수이다.

2.2.2 풍력발전시스템의 성능과 지표

정격풍속이란 설계상의 최대연속 출력을 나타내어 정격출력이 얻어지는 풍속을 말한다. 정격출력은 일반적으로 풍속의 출현 확률 분포로부터 풍력 에너지를 가장 많이 뽑아 낼 수 있는 풍속으로 통상 12~14 m/s 정도이다. 시동풍속은 제너레이터가 발전을 개시 할 때의 풍속이며 3~5 m/s 정도이다. 종단풍속은 강풍으로 인한 제너레이터 및 시스템의 보호를 위한 과속 방지와 발전을 정지하는 풍속으로 20~25 m/s 정도이다.

Fig. 3은 풍속과 출력의 관계를 개념적으로 나타내고 있다.

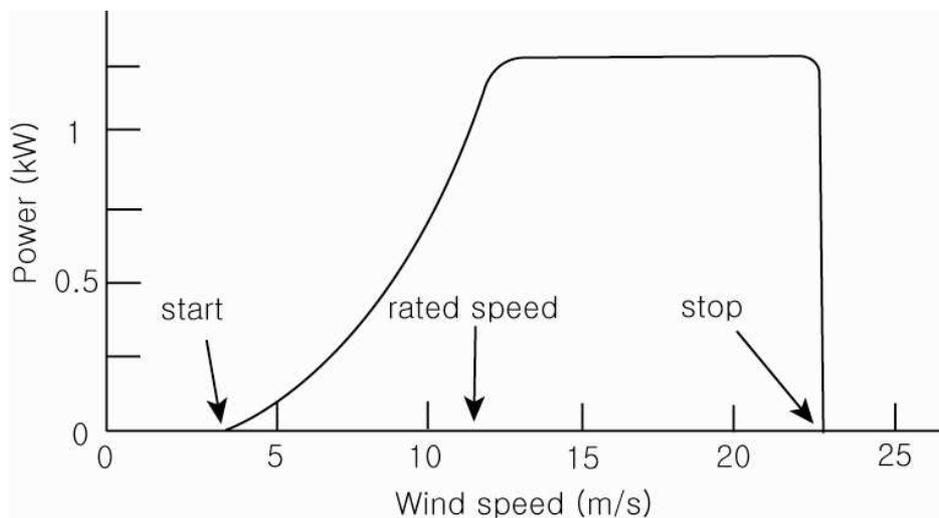


Fig. 3 Relationship between power and wind speed

2.2.3 연간 발전량의 추정

소형풍력발전에서는 연간 발전량을 간이 추정하는 방식으로 유효 발전율을 설비 이용률로 계산하여 대체적으로 20~25% 정도를 유효한 발전 가동으로 보고

$$AkWh = (CF) \times (GS) \times 8760 \quad (9)$$

AkWh; 연간 발전량[kWh/년]

CF; 설비 이용률

GS; 발전기 정격 용량

8760; 연간 시간 수(365일×24시간)

풍량이 보통인 곳에 1 kW 용을 설치하였을 때를 가상해 보면

$$0.20 \times 1 \times 8760 = 1,750$$

$$0.25 \times 1 \times 8760 = 2,190$$

따라서 연간 1752 kWh에서 2190 kWh 정도 발전 할 수 있다고 추정한다.

대부분의 소형풍력발전기 제작사들은 연간 평균 풍속을 이용하여 풍속에 대한 레일리분포(Rayleigh distribution)를 계산하여 이 풍속 분포와 제작사의 제너레이터 출력 곡선으로부터 Fig. 4에 나타난 것과 같은 연간 발전량의 추정 곡선을 얻고 있다

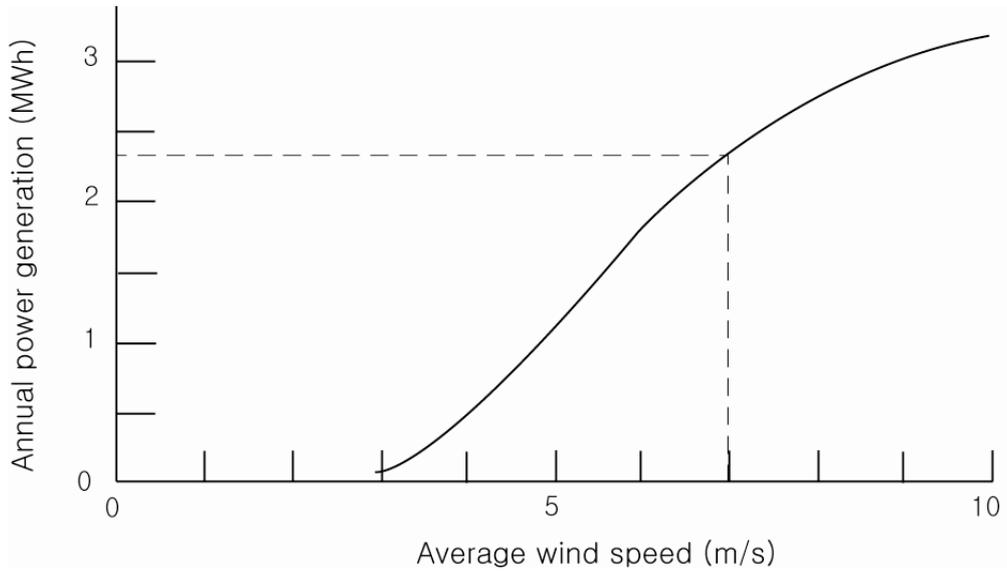


Fig. 4 Annual power generation by small wind generator type of 1 kW

2.3 외국의 풍력 발전 동향

2.3.1 신재생에너지의 보급 현황

2004년 세계 신재생 에너지 공급량은 1,876백만toe로서 세계 총 1차 에너지 공급량 11,234백만toe의 약 16.7%를 차지하고 있다. 비율로 살펴보면 신재생에너지 중에 88%를 전통 바이오매스(54%)와 대수력(34%)이 차지하고 있는데, 전통 바이오매스에는 농촌지역의 취사용 또는 난방용으로 신탄 및 농업폐기물이 포함된다. 나머지 12% 정도를 지역난방용 및 발전용으로 바이오매스(6.1%)와 풍력(1.2%), 소수력(3.0%), 지열(1.0%)이 차지하고 있다. 이렇게 볼 때, 바이오매스와 도시쓰레기, 그리고 수력을 합한 것이 94%로 대부분을 차지하는 반면, 풍력과 소수력, 지열, 태양광, 조력 등의 비중은 5% 미만으로 극히 저조하다. 특히, 태양광 발전과 태양열 발전, 조력 발전은 각각 0.1% 미만을 차지하여 기여율은 거의 없는 것으로 나타났다.

신재생에너지는 Table 3과 같이 4개 분야의 시장에서 전통 에너지와 경쟁하고 있다. 즉, 발전부문, 온수/난방부문, 수송부문, 그리고 농촌부문(주로 독립형)이 그것인데 우선 발전부문에서는 신재생에너지(대수력 제외)는 총 발전 용량에서 4%를, 총발전량에서 3%를 차지한다. 온수와 난방 부문에서는 현재 수만 개의 빌딩에서 태양열과 바이오매스, 지열이 보급되어 있다. 태양열 온수기만 하더라도 세계적으로 약 4천만 주택에 설치되어 있다. 바이오매스와 지열 또한 산업과 주택, 농촌의 난방열원으로 사용되고 있다. 수송부문에서는 바이오매스에탄올과 바이오디젤이 적게나마 보급되고 있으며 매우 빠른 속도의 성장세를 보이고 있다. 농업부문에서는 주로 개도국을 중심으로 취사용과 조명, 난방용으로 바이오가스가 보급되어 백등유와 기타 화석에너지원을 대체하고 있다.

가장 성장이 빠른 신재생에너지원은 계통 연계형 태양광 발전으로 총 설비용량은 2000년에 160 MW에서 2004년 1,800 MW에 이르러 연평균 60%의 초고속 성장을 보였다. 같은 기간에 다른 신재생에너지원도 빠른 증가를 나타내고 있는데, 풍력이 연평균 28%, 바이오디젤이 25%, 태양열온수 및 난방이 17%,

독립형 태양광 발전 시스템이 17%, 지열 난방이 13%, 수송용 에탄올이 11%의 신장률을 보이고 있다. 이에 반해 과거 신재생 에너지 기술의 주종을 이루었던 수력과 전통 바이오매스, 지열 발전 등은 2~3%에 그침으로서 증가율이 둔화되거나 오히려 감소하는 경향을 보였다.

Table 3 Status of supply new-renewable energy (2004)¹³

Section	New-renewable	Primary energy datum point(million toe)	Specific Gravity(%)
Generation	Biomass	35.8	6.9
	Wind power	22.7	
	Small water power	57.3	
	Geothermal	14.3	
Hot water /Heating	SunboSola energy	6.9	3.9
	Geothermal heating	4.8	
	Biomass heating	62.1	
Bio fuel	ethanol	16.7	1.0
	Bio diesel	1.9	
Other ect.	Original Biomass	1,010	53.8
	Water power	644	34.3
Total		1,876	100

Fig. 5에서와 같이 제2세대 신재생 에너지기술이라고 할 수 있는 풍력과 태양광 등의 비약적 신장은 주로 OECD 국가에 국한된 현상이다. 1980년과 2004년 사이 OECD 국가에서 풍력과 태양광의 연평균 증가율은 23%에 이른다. 그러나 출발점이 0에 가까운 낮은 보급률이라는 점을 감안해야 한다.(IEA, 2005)

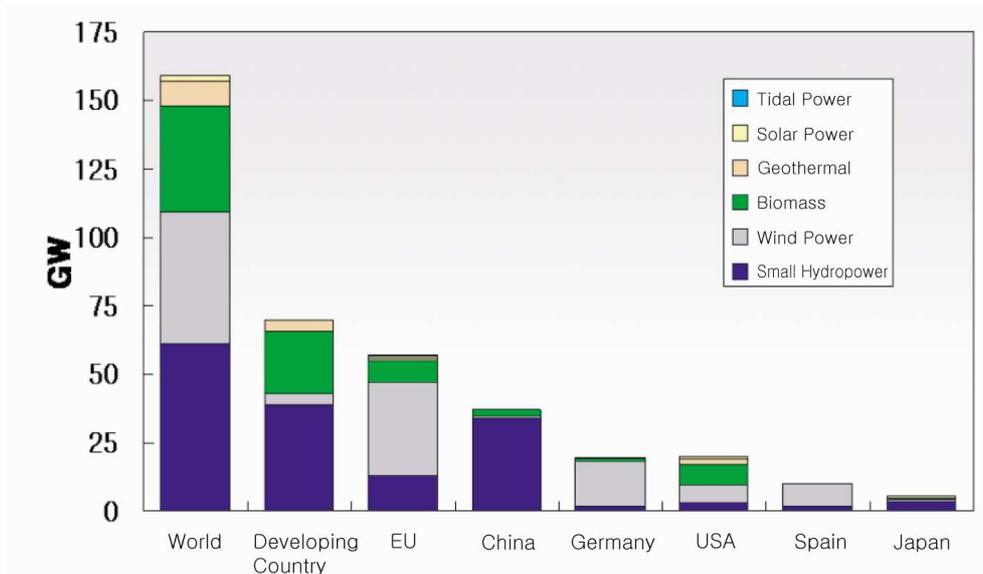


Fig. 5 Status of New-Renewable energy

Fig. 6에 나타난 것과 같이 풍력 시장은 몇몇 나라에 집중되어 있는데, 대표적인 국가가 덴마크와, 독일, 스페인, 인도, 미국, 이탈리아 등으로 이들 국가가 산업과 시장을 주도하고 있다. 기타 후발국인 러시아와 중국, 남아공, 브라질, 멕시코도 시장진입을 서두르고 있다. 중국의 경우, 그동안 공여 또는 정부지원에 의존해 왔던 것이 최근 민간부문의 투자가 활성화되고 있으며, 기타 국가들은 풍력단지 시범사업을 추진하여 조만간 상업시장 단계로 진입할 계획이다. 해상풍력은 최근 부상하기 시작하였으며 2005년 현재 679 MW 정도가 설치되어 있다. 유럽은 1991년 덴마크 Vindeby의 최초 해상풍력 단지 건설을 시작으로 2010년까지 7.5 GW 규모의 해상풍력을 포함하여 육·해상 총 87.7 GW의 풍력설비 용량을 확보할 계획이다.

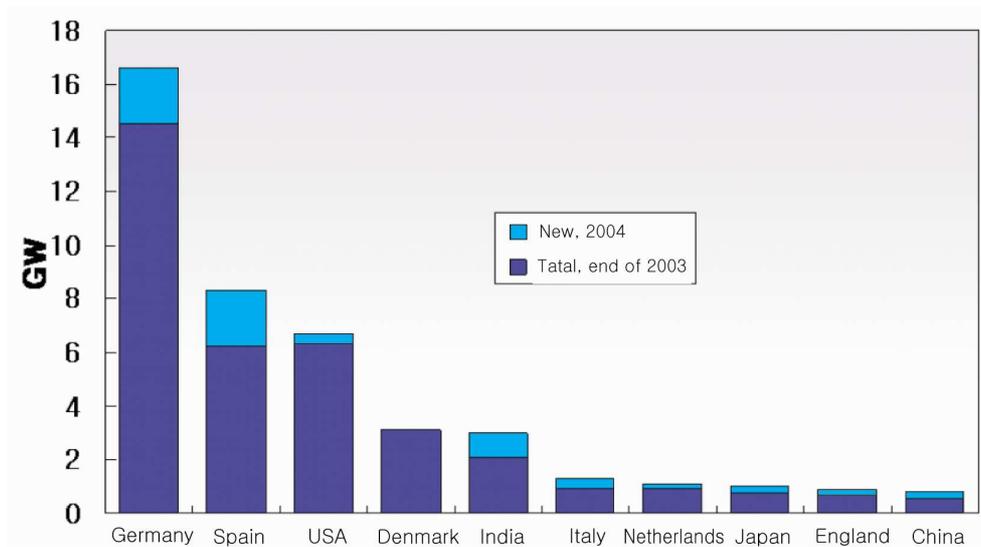


Fig. 6 Status of Wind power generation¹⁵

2.3.2 신재생에너지설비 규모 및 생산비용 추이

전 세계적으로 신재생에너지의 생산단가가 전통 에너지원에 비해 상당히 높은 편이다. 전통에너지원의 경우 최저 2~5 cent/kWh이며 최대부하나 독립형 디젤발전의 경우는 이보다 훨씬 높은 단가를 나타낸다. Table 4 에서와 같이 신재생에너지의 생산단가가 이보다 더 높다는 사실은 정책적 지원이 없으면 신재생에너지 개발의 경제성이 없다는 것을 의미한다. 그러나 신재생 에너지의 비용이 하락하면 전통 에너지기술도 하락하기 때문에 경제적 경쟁관계는 고정적이 아닌 변화하는 환경에서 결정된다고 볼 수 있다. 현재 신재생에너지 기술의 비용 하락폭이 더 크게 나타나고 있고 또한 화석연료의 가격 상승 추세가 계속되고 있으므로 신재생에너지 개발의 경제성이 유리하게 개선되고 있다.

Table 4 Cost of generation and invested to new-renewable energy¹⁸

section	investment (\$/kW)	cost(min.\$)	cost(max.\$)	cost(2010,\$)
small hydropower	1,000~5,000	2~3	9~15	2
solar power	4,500~7,000	18~20	25~80	10~15
biomass	500~4,000	2~3	10~15	2
geothermal	1,200~5,000	2~5	6~12	2~3
wind power	850~1,700	3~5	10~12	2~4

현재, 대수력 및 가연 재생에너지와 폐기물 발전을 제외하고는 신재생 에너지 평균 발전단가는 전력 도매시장 가격과 경쟁할 수 있는 단계는 아니다. 그러나 기술과 응용분야, 입지조건에 따라서 상업용이나 가정용의 난방열원이 기존 에너지 생산비와 경제성이 비교되기도 한다. 최적의 시스템 설계와 입지, 자원 부존 상황이 갖추어졌을 때, 바이오매스와 소수력, 풍력, 지열을 이용한 발전이 2~5 cent/kWh로 가능해 진다. 일부 특정 지역에서는 바이오매스와 지열 발전을 이용하는 냉난방이 기존 에너지원과 경쟁하고 있다. 또한 기후 조건과 함께 기술 향상과 생산기반이 잘 갖추어진 곳에서는 태양열 온수시스템이 경쟁력을 확보하고 있으며, 이러한 경향은 최근의 고유가 장기화 및 천연가스, 석탄 가격의 동반상승으로 더욱 심화되고 있다. 계통연계 태양광 발전은 아직 초기 투자비가 극히 높기 때문에 경쟁력이 없으나 소형풍력발전과 병행으로 미전력 오지의 독립형 태양광발전이라면 고유가에 대체에너지로는 경쟁이 가능하다. 브라질에서는 에탄올이 휘발유와 대등한 경쟁력을 확보한 상태이다. 풍력의 경우 2010년에는 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상되며, 태양광 발전의 경우도 입지가 양호한 지역에서는 조만간 경쟁력을 확보할 것으로 기대된다.

2.3.2 신재생에너지의 정책

1970년대 그리고 1980년대 초 신재생에너지의 괄목할만한 성장은 무엇보다도 1970년대 석유파동 이후 세계 각국에서 적극적으로 추진되었던 연구개발과 보급, 정책적 지원에 힘입은 바 크다. 당시에는 신재생에너지 기술개발 및 보급대상은 주로 대수력과 바이오에너지, 지열발전이었다. 그러나 1990년대에 들어서 이러한 제1세대 신재생에너지기술은 점차 성장세가 둔화되고 제2세대 신재생에너지원인 태양광발전과 풍력 등이 새롭게 등장하여 주력 신재생에너지원으로 각광을 받으며 보급이 확대되기 시작하였다. 이것은 선진국 내에서 환경문제가 크게 대두되면서 좀 더 청정하고 환경 친화적인 그리고 기술집약적인 에너지원을 선호하면서 정부차원에서 R&D 투자와 시장 확대정책을 적극적으로 전개한 결과로 해석된다. 1980년대와 1990년대 초반만 하더라도 신재생에너지 기술 개발과 보급을 위한 정책을 펴고, 관련법제도를 마련한 국가는 몇몇 선진국에 한정되었었다. 그러나 1990년대 후반과 2000년대에 들어와서는 개도국을 포함하여 더욱 많은 국가들이 신재생에너지기술 개발과 보급에 관심을 갖기 시작하고, 지원 정책을 전개하기 시작하였다. IEA의 연구보고서(2005)에 따르면 신재생에너지 시장 확대는 개별정책수단의 개별적 추진보다는 종합적으로 추진함과 동시에 정책수단의 지속성과 예측가능성이 보장되고, 중앙정부와 지방정부가 참여함으로써 가능하다는 사실이 밝혀졌다.

1) 신재생에너지 정책목표

현재 세계적으로 적어도 48개국에서 신재생에너지 정책목표를 설정하고 시책을 전개하고 있다. 이 중 43개국이 신재생에너지 공급목표를 설정한 상태이다. Fig. 7과 같이 유럽연합(EU)의 경우 연합 전체 공급목표와 함께 회원국 각각의 목표를 가지고 있다. Table 5 와 같이 EU 전체의 신재생에너지 정책 목표로서 2010년까지 발전량의 21%, 총에너지 소비량의 12%를 설정 하고 있다.

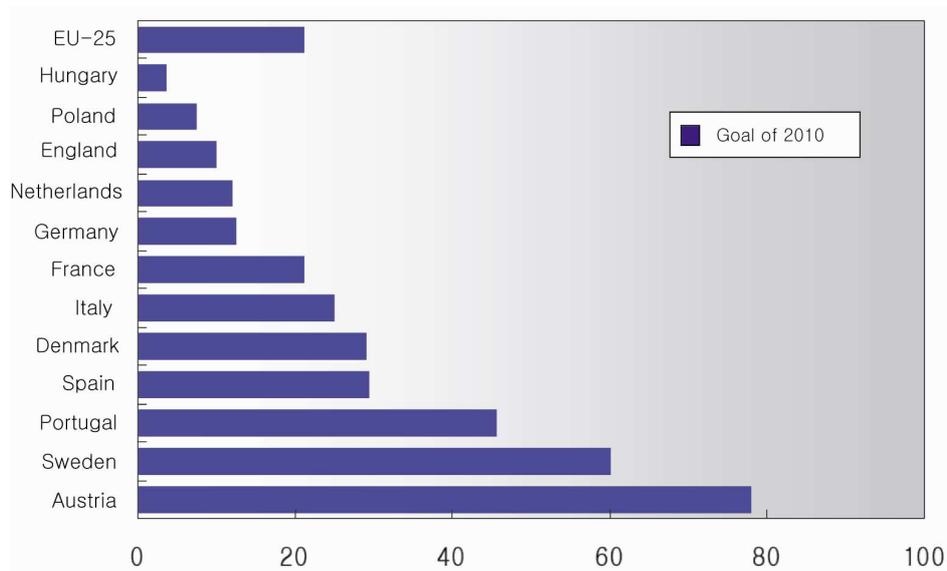


Fig. 7 EU's Goal of supply of new-renewable energy¹³

Table 5 Supply goals of new-renewable energy in the world¹⁴

Country	Goal	Supply(2004)	
		Total energy	Generating plant
Austria	9.5TWh Power supply, 2010	5.4%	7.8%
China	10% of Generating plant, 2010	-	-
Egypt	3% of electricity until 2010, 14% until 2020	-	-
India	10% of generating plant add, 2012(10 GW)	-	-
Israel	2% of Generating plant until 2007 5% until 2016	-	-
Japan	1.35% of electricity (except geothermal and hydropower)	3.4%	1%(inclusion geothermal)
Mali	15% of total energy, 2020	-	-
Newgealand	30PJ plant add until 2012 (inclusion heating and transportation fuel)	29.7%	71.8%
Thailand	8% of total energy until 2011 (except biomass of country side)	-	-
U.S.A	8~20% of electricity in 20 states (inclusion D.C.)	4.2%	8.6%
Korea	5% of total energy, 7% of electricity until 2011	2.2%	-

신재생에너지 공급목표를 설정한 상태인 43개국에는 개도국으로서 브라질과 중국, 도미니카공화국, 이집트, 인도, 말레이시아, 말리, 필리핀, 남아공, 태국 등의 10개국이 포함된다. 기타 몇몇 개도국들이 가까운 미래에 대열에 합류할 것으로 전망된다. 또한 중국은 2020년까지 총 에너지 중 점유율 10%, 발전설비용량의 12.5%, 태양열 온수기 270백만 m², 풍력과 바이오매스 발전으로 각각 20 GW를 보급하는 목표를 설정하였다. 태국은 2011년까지 총에너지 중 8%의 공급목표를 세운바 있다(전통 바이오매스는 제외). 인도는 2012년까지 10 GW 상당의 10% 신재생에너지 발전 설비 추가를 목표로 하고 있다. 필리핀도 2013년까지 5 GW의 목표를, 그리고 남아공의 경우 2003년부터 2013년까지 10 TWh의 발전을 신재생에너지로 하는 목표를 공표하였다.

2) 산업추이 및 시장규모

전술한 투자흐름으로 볼 때 신재생에너지가 이미 에너지산업의 주류를 형성하면서 많은 사업기회를 창출하고 있음을 알 수 있다. 세계적으로 적어도 60개 정도의 공식적 인수 합병과정을 거쳐 조성된 시장자본은 2005년에 4억 달러이다. 따라서 누적 시장자본은 250억 달러에 이를 것으로 추산 된다. 여기에 100개 정도의 회사와 부서를 고려한다면 수십억 달러가 추가된다. 풍력발전의 경우 그동안 풍력터빈 제조 전문 업체들이 시장을 지배하여 왔으나 새로운 대형자본이 진출하여 풍력발전시장이 대규모화 하고 있다. GE와 Siemens가 세계 유수의 발전설비업체로서 풍력시장에 뛰어든 대표적인 케이스이다. 중국에서는 2004년 5대 전기, 항공, 발전 설비 관련 기업이 풍력터빈 기술개발을 시작하였다. 이들은 해외기업과 4개의 기술이전계약을 체결하고 2005년부터 풍력터빈원형을 생산할 계획이다. 이러한 대형업체의 시장 진출은 기술과 제품신뢰와 자금흐름, 마케팅, 대량생산을 통해 시장기반을 튼튼하게 다지는 역할을 하고 있다. 2004년 풍력발전산업의 매출규모를 보면 총 6,000기의 풍력터빈이 생산, 판매(평균 설비용량 1.25 MW)되었다. 상위 6대 풍력터빈제조업체로서 Vestas(덴마크, 2004년 NEG Mion사와 합병)와 Gamesa(스페인), Eneron(독일), GE

Energy(미국), Siemens(덴마크, 2004년 Bonus사와 합병), Suzlon(인도)가 활동하고 있다. 중국에서는 풍력터빈제조업체로서 Goldwind사와 Xi'an Nordex사가 활동 중인데 시장 점유율은 각각 20%와 5%이다.(나머지 75%는 해외에서 수입). 풍력터빈 크기도 산업의 대형화에 한몫을 하여 왔는데, 1995년에는 500 kW급으로 시작 되었다가 점차 대형화과정을 거쳐 2004년에는 1.3 MW급이 주류를 이루고 있다. 현재 미국과 유럽제조업체들은 1~3 MW급을 생산하고 있으나 인도와 중국 등의 개도국에서는 아직도 600~1,000 kW급이 주종을 이룬다. 유럽 제조업체는 최근 5 MW급 풍력터빈을 개발하여 실증연구 중이다.

2.4 국내의 소형풍력발전 동향

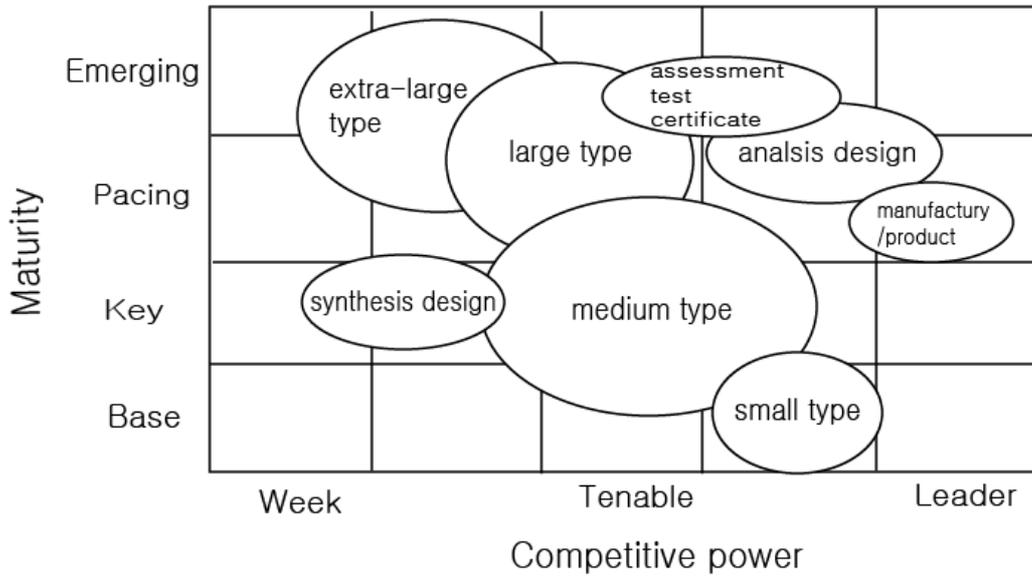


Fig. 8 Maturity and competitive power of wind power generation

현재 국내 소형 풍력발전은 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 기술적 성숙도는 낮으나 국내 산업체의 전기, 전자, 토목, 기계 구조물 등의 기술 능력이 선진국과 비교하여 충분한 개발능력이 있으므로 종합적으로는 세계 시장에서의 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

현재 지구상의 자연적인 현상을 예측하는 것이 거의 불가능하기 때문에 시스템 설계자와 사용자는 풍력발전기의 설계에 전기에너지의 연속적인 품질의 유지가 매우 어려운 점을 고려해야 한다. 대형 풍력터빈은 설치 후 관리인 또는 운전 감시 요원이 상주하기 때문에 문제 발생 시 즉각적인 조치가 가능하다. 그러나 소형풍력은 한번 설치 후 대부분 방치를 하고 있는 것이 현실이고 사용자의 전문적인 지식 부족으로 인해 제품의 관리나 유지보수가 되지 않는 실정이다. 국내에 설치된 많은 실험용 및 경관용 소형풍력발전기들이 사후 관리가 되지 않아 대부분 고장 난 상태로 방치되어 있다. 소형풍력발전기의 잘못된 설

치 예로서는 독립형 소형 풍력발전기의 배터리용량은 부하의 크기와 바람자원에 따라서 계산을 하여야 안정적으로 사용을 할 수 있는데 비용과 잘못된 계산으로 크기를 작게 함으로써 고장의 원인이 되었고, 초기 설치한 것 중에는 요잉시스템에 사용되는 중요 부품인 슬립링이란 부품이 적용 되지 않아서 선의 꼬임이 발생된 경우도 있으며 몇 주간 바람이 없을 경우를 대비하여 풍력 발전 시스템에 반드시 비상용 전원장치나 축전지 보호 장치가 연결되어 있어야 하는데 없으므로 인한 축전지 과방전의 문제발생, 강풍이나 돌풍때 과속으로 부터 시스템을 보호하기 위한 자동 운전정지시스템이나 과속 방지장치가 없어 소형 풍력발전기의 파손이나 고장의 경우가 많이 있었다. 이로 말미암아 풍력발전 연구개발사업에 대한 기존 사용자와 정부의 불신이 점차 높아지고 있어서 신규 연구개발사업에 대한 정부 지원을 받는데 어려움이 많다.

2.5 소형풍력발전기의 국제 경쟁력 분석

소형 풍력 시장은 계속해서 성장하고 있으며 최근의 여러 변수에 의해서 국가의 정책적인 지원으로 더욱더 성장 가능성이 높아지고 있다.

국외 전문 업체들은 Southwest Windpower, Bergey(미국), Eoltec(프랑스), Bornay(스페인), Proven, LVM(영국), Fortis(네덜란드), Windterra(캐나다) 등이 있다.

소형 풍력업체의 특징은 블레이드제조와 한계풍속이상에서 출력 제어 장치 고유 기술을 가지고 있으며 풍력 시스템에 필요한 발전기, 제어기, 등의 모든 부품을 자사에서 직접 제조 하지 않고 필요에 따라서 전문적인 기기 제조회사와 연계해서 풍력시스템을 조립 및 제조 하는 경우가 대부분이다. 각국의 소형 풍력 회사마다 기기의 보유 기술에 장단점을 가지고 있으며 경쟁관계에서 지속적인 기술개발을 하고 있다.

Table 6 Analysis on the competitiveness of core technology¹²

Core Technology		Foreign countries	Domestic	Level (vs foreign one in %)
Small wind power generation	Elements design & analysis of equipment	The technology of design & analysis for their own unique models are available Producing the high reliable small wind power generator	The localization of small sized models by technical imitation and the field tests to improve performance and reliability in progress now.	70%
	The technology of equipment assembly	Development and mass production are available for hundreds W ~ 30 kW small sized equipments	The Developed for the technology of assembly for certain size (1~3kW) equipments	80%
	The technology for stability & reliability of equipment	Producing the structurally stable equipments which have 20 years of the design lifetime.	The performance test is in progress now for securing high reliability and stability.	70%

2.6 소형 풍력발전시스템의 국제시장 동향과 전망

소형 풍력발전시스템의 기술 분야로는 요소설계 및 해석, 요소기술의 조합 및 전체 시스템의 신뢰도 및 안정성 확보 기술로서 분류할 수 있다. 향후 소형 풍력발전시스템의 시장은 지속적으로 그리고 획기적으로 증가될 것으로 예측되고 있어, 미국을 중심으로 하는 선진국에서는 소형 풍력발전시스템의 요소부품에 대한 설계 및 해석기술을 활용한 고신뢰도를 가진 소형 풍력 기기의 개발에 노력하고 있으며, 이미 상당한 성과를 거두고 상용화 단계에 접어든 상태이다. 소형풍력발전기의 용량도 수백 W에서 30 kW급까지로 다양한 용량으로서 기술수요에 대비하고 있으며, 설계수명도 20년 이상의 신뢰성 높은 기술을 선보이고 있는 상황이다. 그리고 소형풍력발전기에 대한 기술적 개발전망도 매우 밝아서, 소형 풍력발전기의 단점이었던 저변환효율의 극복과 대량생산에 의한 저가화 등도 곧 이루어질 것으로 전망되고 있다.

소형 풍력발전기에도 첨단 세부 엔지니어링 기술의 적용으로 각 요소기기들에 대한 신뢰도 향상과 수명 향상도 병행되어 결론적으로 전체 소형 풍력기기의 안정성 및 신뢰성 확보가 이루어지고, 이를 통한 소형풍력발전기 시장의 확대가 이루어지는 상호 상승작용이 이루어 질 것으로 전망되고 있다.

2.7 소형풍력발전 기술개발의 요소

풍력발전기 블레이드의 기본적인 공기역학적 과제는 대형풍력과 동일하지만 소형풍력에는 몇 개의 특이한 문제가 있다. 그중 가장 중요한 과제는 일반적으로 블레이드 직경이 작아지면 블레이드 회전수는 증가하고 블레이드 하중은 원심력이 지배적으로 된다.

소형풍력발전의 이용 역사는 오래 되었고 기술적으로도 완성 단계에 있다고 하지만 낮은 풍속에서 에너지 변환효율이 높은 블레이드(Blade)의 공기역학적 설계, 효율적인 발전(Generator) 시스템 설계기술, 한계 풍속 이상에서의 자동 과출력 제한 방법, 효율적인 배터리(Battery) 충전 기술과 같은 전력 변환 장치 등의 기술적 문제점이 많은 실정이다.

국내의 풍력발전 관련 산업체들은 풍력발전으로 생성된 전기적 에너지를 배터리의 충전시스템을 거치지 않고 직접 열에너지로 변환시켜 난방에너지로 사용할 수 있는 풍력발전기 시스템과 축열 장치에 대한 연구개발을 진행 중에 있다. 이러한 방식의 경우 충전장치나 변화장치로 인하여 에너지 효율이 떨어지는 것을 최대한 줄여서 발전 조건 이하의 풍속이나 과풍속의 경우에 발생 가능한 여러 문제점을 줄일 수 있다.

이런 문제에 대해 미국 및 풍력 선진국에서는 풍력 개발 프로그램의 일환으로 대형풍력발전과 나란히 소형풍력발전의 연구 개발도 힘쓰고 있으며 각국의 풍력발전에 관련된 기업들도 경쟁적으로 소형풍력발전에 대한 연구개발을 진행하고 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 장치

3.1.1 설치 시스템의 개요

본 연구의 실증실험 대상으로 사용된 발전기는 영구자석식(AFPM)으로 정격 출력 1 kW 이며 로터 블레이드는 전장 1.2 m의 엔지니어링 플라스틱 소재의 3 블레이드 타입이 장착 되었다. Fig 9에 보여준 과출력 제어 방식은 영구자석식 제너레이터의 특성을 이용한 마그네틱 브레이크 방식의 강제 정지 방식이다. 전기 변환 장치는 발전된 AC 전기를 DC로 정류하여 DC 7.8 V에서 23.5 V의 입력 전압을 DC 24 V에서 28 V로 출력하여 24 V 축전지에 충전 시키고 24 V 축전지에 직결로 24 V용 40 W 램프 2개를 병렬로 연결하여 부하로 사용 하였다.

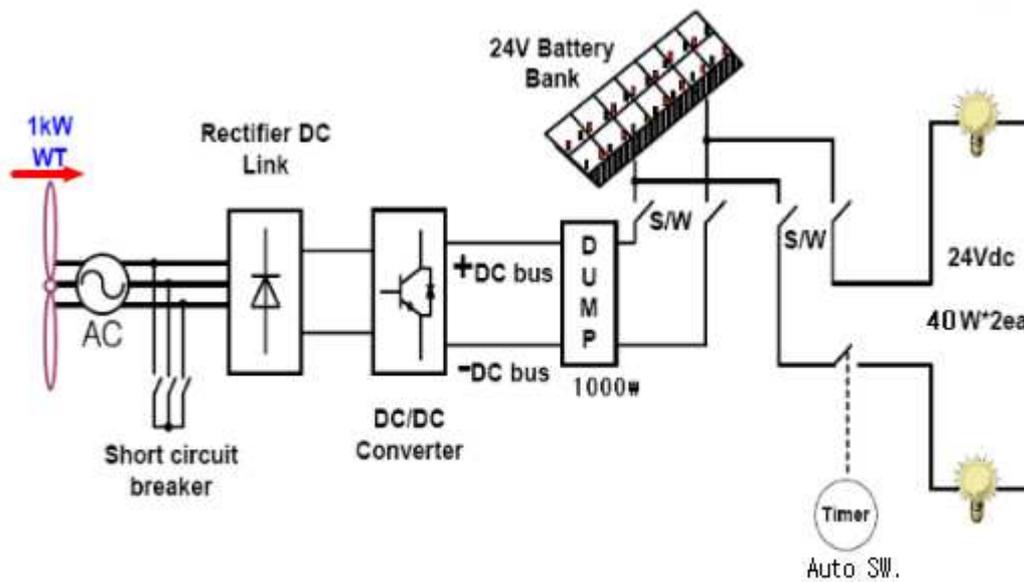


Fig. 9 Schematic diagram of test equipment

3.1.2 발전부분 약도

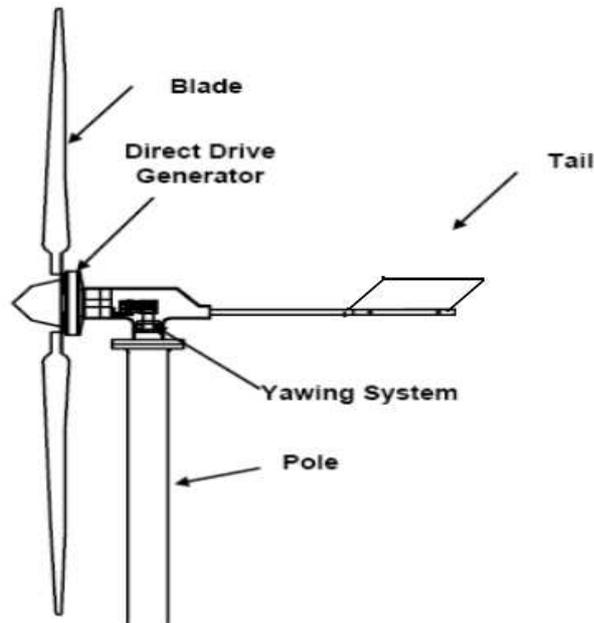


Fig. 10 Schematic diagram of wind power system

기어리스방식의 발전시스템은 발전기에 직접 블레이드를 부착하여 회전력을 얻을 수 있는 단순한 구조로 소음과 진동이 기어 방식에 비하여 안정적이다, Fig 10, Fig 11 에서 보는 것과 같이 요잉 시스템은 풍향에 따라 발전부가 회전을 하더라도 고정된 기둥 내의 발전 전력선과 제너레이터의 전력선 연결부위가 꼬이지 않도록 되어있다. 영구자석형 제너레이터는 저속에서도 발전이 가능하도록 설계 제작 되었으며 조립시 사용된 볼트는 모두 록타이트를 사용하여 고정 시켜 진동에 조립된 부품의 풀림을 방지 하였다. 꼬리날개는 이론상 클수록 제너레이터가 안정적으로 풍상방향으로 지향 할 수 있으므로 꼬리날개의 면적을 크게 제작 하였다. Fig 12, Fig 13과 같이 전력변환장치와 축전지, 소비전력장치로 실증 실험할 소형풍력발전기를 설치하였다.



Fig. 11 Picture of wind power system

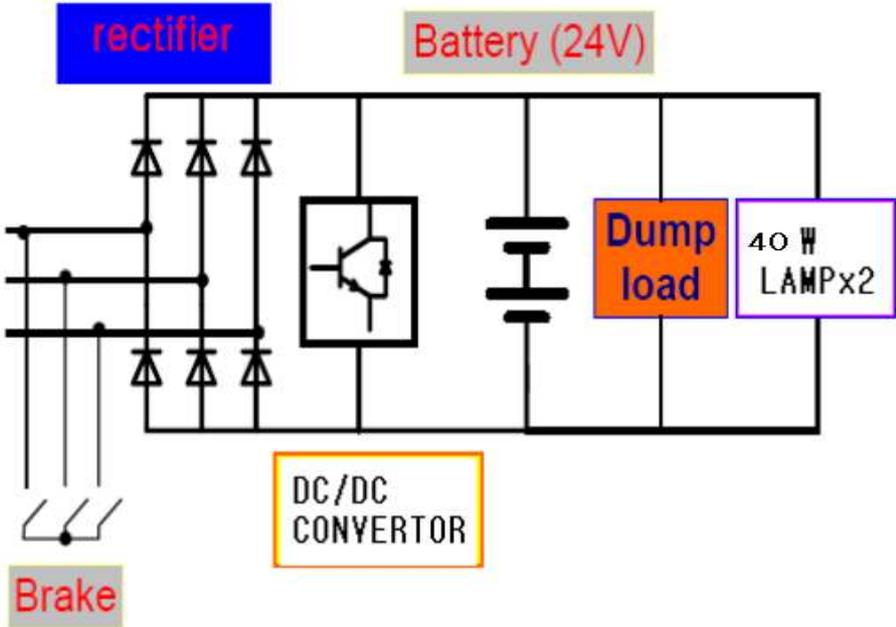


Fig. 12 Circuit of converter system



Fig. 13 Converter system

1) 제너레이터는 영구자석을 사용한 기어리스타입의 1 kW 용량을 사용하였으며, 본 실험에 사용된 제너레이터는 저속 회전에도 발전이 가능한 AFPM 모델을 사용하였다

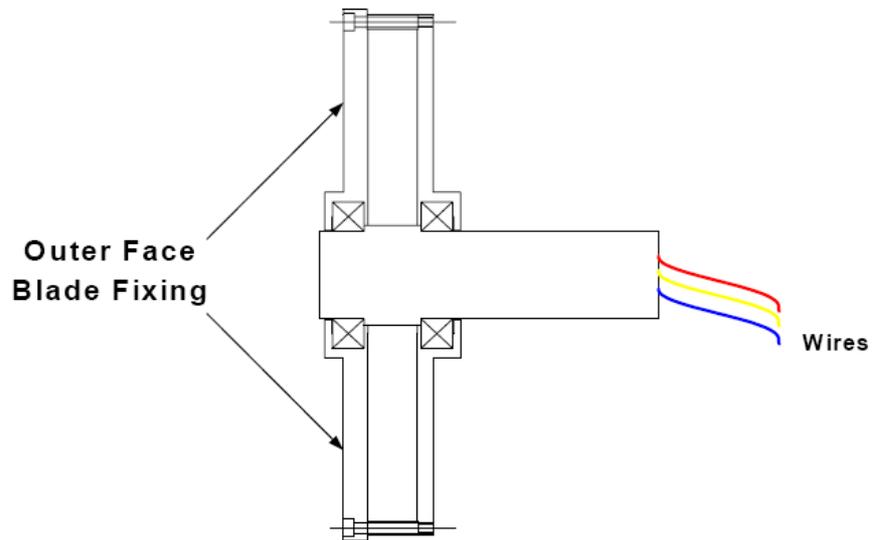


Fig. 14 Generator of AFPM TYPE

2) 블레이드는 전장 1.2 m, 엔지니어링 플라스틱 소재의 풍력발전용으로 제작되었으며, 제한강도요구조건(Limit Strength requirement), 강성요구조건(stiffness requirement), 피로수명요구조건(fatigue life requirement)의 세 가지 조건을 만족시키는 영국산 제품으로 25 m/s 이상의 강풍조건에서 사용 시 내구성이 검증된 것을 사용 하였다.



Fig. 15 Blade

3) DC-DC 컨버터는 발전된 입력전압 DC 7.8 V에서 23.5 V를 DC 24 V에서 28 V까지로 변환시켜 축전지에 충전 시키는 장치로, 직접 제작하여 사용하였다



Fig. 16 Converter

4) 요잉 시스템(Yawing system)은 슬립 링(Slip ring)이 조립되어 풍향의 변화에 회로의 꼬임이 없도록 하고 꼬리의 부착으로 제너레이터의 방향이 항상 풍상으로 향하도록 제작 하였다.

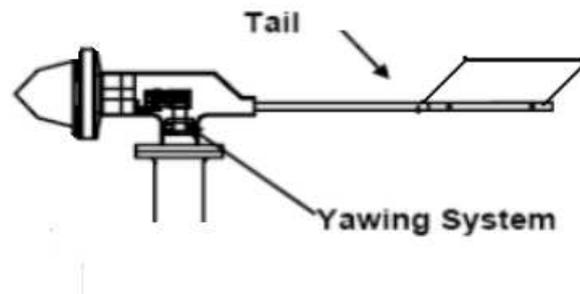


Fig. 17 Yawing system

5) 자동충전기는 무풍으로 인해 풍력 발전이 불가능할 시에 축전지가 과방전 되는 것을 막기 위한 목적으로 축전지의 전압이 24 V 이하로 떨어지면 자동으로 220 V 계통전력을 이용하여 충전되도록 설계되었다.

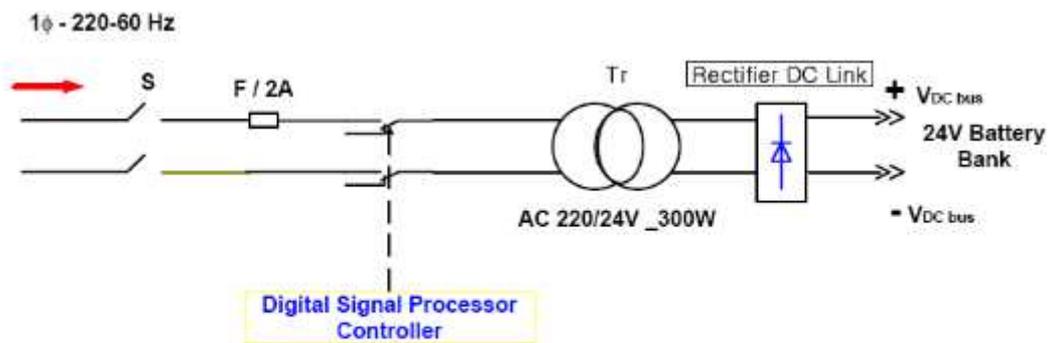


Fig. 18 Auto power supply

6) 본 연구에서 사용된 축전지는 산업용으로 12 V 200 AH 용량의 것으로 2개를 직렬로 연결하여 24 V용 축전지를 만들었고 여기에 직접 24 V용 램프를 연결하여 사용함으로 A/C전환용 인버터는 사용하지 않았다.

7) 24 V 40 W 전구 2개를 병렬로 연결하여 부하 측에 걸고 전력 소비 장치로 매일 20시부터 익일 06시까지 10시간 동안 가동하였다.

$$\begin{aligned} \text{daily power consumption} &= 40 \text{ W} \times 2 \text{ ea.} \times 10 \text{ hour/day} & (10) \\ &= 800 \text{ W} \end{aligned}$$



Fig. 19 Test Lamp

Fig. 19는 실험에서 풍력발전기에 의해 발전되어 배터리에 충전된 전력을 매일 오후 8시부터 오전 6시 까지 10시간 동안 일일 800 W를 소비하기 위해 사용된 DC 24 V, 40 W 전구 2개가 병렬로 연결된 모습이다.

3.2 측정 장비

3.2.1 측정기기

풍속은 RVA501 바람개비형 휴대용 디지털 타입 풍속계를 소형풍력발전기 설치장소 외부에 고정시켜 관측 하였다. 이 기기는 모드전환을 통해 하나의 장비로 다양한 항목을 측정할 수 있었으며, 설치 현장의 일일 평균 풍속과 최대 최소치를 얻을 수 있었다. 또한 모든 측정 자료를 PC에 바로 다운로드 시킬 수 있어서 자료 정리에 편리함을 가지고 있다. 또한 AVM-03 소형 휴대용 풍속계를 사용하여 지상풍속과 설치 장소 주변의 풍속을 측정하는데 사용하였다.

발전되는 AC 전압과 축전되는 DC 전압을 0.01 V까지 측정하기 위해 멀티테스터를 이용하였으며 TESTO 815 휴대용 소음계를 이용하여 소음을 측정 하였다. 소형풍력발전 시스템의 실내와 실외의 온도를 동시에 나타낼 수 있도록 THC-03A 온도계 센서를 풍력발전기를 설치한 실외에 설치하여 실외온도를 측정하였으며 덤프의 표면 온도와 발전기의 표면온도 측정을 위해 TN408LC 적외선 온도계를 이용하였다.

3.3 실험방법

3.3.1 풍속측정방법

2007년 1월~12월까지 12개월간 부산시 동구 초량동에 소재하는 지상 21.5 m 높이의 6층 건물 옥상 바닥에 1.2 m 높이의 파이프를 설치하였다. 파이프 끝에 풍속계 RVA501 센서를 설치하여 하루 24시간의 풍속을 측정하였으며, 다음날 오전 10시에 수집된 전날의 평균 풍속과 최대 풍속 최저풍속 자료를 확인하였다.

3.3.2 발전 전압측정 방법

타워에 설치된 제너레이터로부터 발전된 전류가 3상으로 실내에 설치된 강제 제어 스위치에 연결된다. 평상시에는 항상 스위치가 오픈된 상태이므로 스위치의 연결 여부와 관계없이 여기에 3상 중 2선에 멀티 전압계를 상시 연결 시켜 놓고 필요시 마다 발전 전압을 측정 하였다.

이상기상 조건에서나 폭풍 시에는 전압 측정기를 제거하였다.

3.3.3 축전지 전압 측정 방법

매일 오전 10시에 멀티 전압 테스트기로 축전지에 연결된 모든 스위치를 오픈 시킨 상태로 직접 단자에 접촉 시켜서 전압을 측정 하였다.

3.3.4 진동 소음 측정 방법

옥상 바닥 층에서 소음을 직접 휴대용 소음측정기를 이용하여 수시로 소음을 측정하였고 풍속 18 m/s 이상에서는 소음 진동 측정을 중지 하였다

3.3.5 부하램프의 소비전력

실험에 사용된 부하램프의 소비전력은 시간당 40 W로 하루 10시간 사용하는 것으로 계산하여 산출 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 년간 풍속의 변화

Table 7. Average wind speed(m/s) Busan/2007

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average	3.23	3.07	3.60	3.80	3.63	3.07	2.77	3.47	3.60	2.77	2.97	3.27

Table 8. Survey wind speed of top building

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average	4.77	4.55	5.10	5.61	5.39	4.69	4.34	5.25	5.27	4.47	4.59	5.06

Table 7의 기상대 자료와 소형풍력발전기를 설치한 고층건물의 3개월 평균 풍속이 부산기상대의 자료는 1월부터 3월이 3.3 m/s의 월 평균 풍속을 보이고 있지만 실제 설치해 놓은 고층 건물에서의 측정 풍속은 Table 8에서 보여 주는 것과 같이 1월부터 3월 평균 풍속이 4.8 m/s의 분포를 보이고 있었다. 실제 측정치와 기상대의 자료가 상이한 것은 Power law의 식으로도 계산되어 진다. 지상에서부터 고도가 높아짐에 따라 풍속이 상승하는 풍속 보정 법칙도 확인할 수 있었고, Power law의 식으로 계산 되어진 값과는 조금 다르지만 지상으로부터 고도가 높아질수록 풍속이 빨라져서 소형풍력발전기의 발전 효율을 높일 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

고도가 높아질수록 풍속이 증가하므로 풍력발전기에 의해 발전되는 에너지의 양도 증가한다. 이 에너지의 양을 풍력 에너지의 밀도 값으로도 나타내고 있다. 지상 21.5m의 고층 건물에 풍력 발전기를 설치해 놓은 곳에서 측정한 풍속을 계산으로 산출하여 풍력이 평균 76.18 W/m²(풍속 3m/s) 이상이면 풍력 발전에

유효한 풍력이라고 할 수 있으며 Table 9에 나타난 것과 같이 가장 낮은 풍력의 7월 값이 230 W/m²을 나타내므로 연중 실용 발전에 충분한 가능성 있었다.

Table 9 Average wind speed at month

month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W. power (W/m ²)	305	265	373	497	440	290	230	407	412	251	272	374

$$\text{wind power (W/m}^2\text{)} = \frac{1}{2} \times \text{unit area (m}^2\text{)} \times \text{air density (kg/m}^3\text{)} \times [\text{windspeed (m/s)}]^3 \quad (11)$$

여기에서 단위면적은 반경 1.2 m인 블레이드의 회전면적 4.5216 m²에서 블레이드 부착 면의 면적 0.0225 m²를 제외한 4.5 m²을 사용하였고, 공기밀도는 1.25 kg/m³로 계산 하였다.

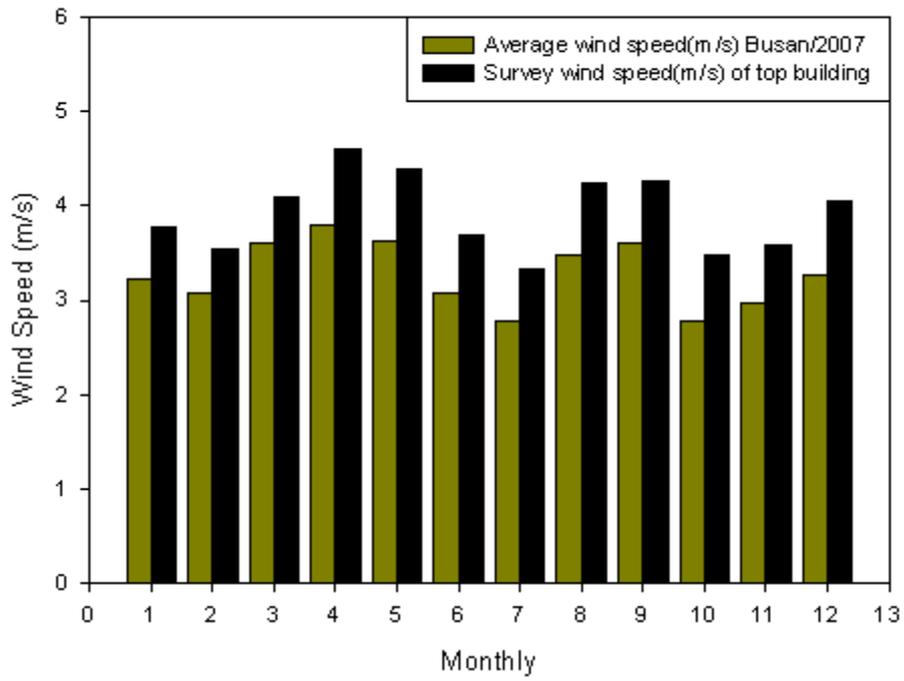


Fig. 20 Average wind speed, 2007

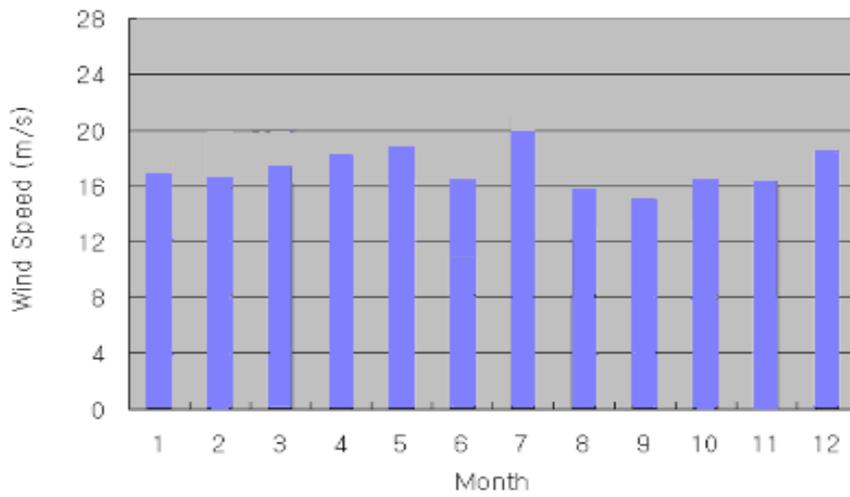


Fig. 21 Maximum wind speed, 2007

4.2 풍속과 발전전압

발전기 AC 출력 전압의 변화는 최대풍속 18 m/s에서 AC 23.4 V까지 전압이 상승됨을 확인하였다.

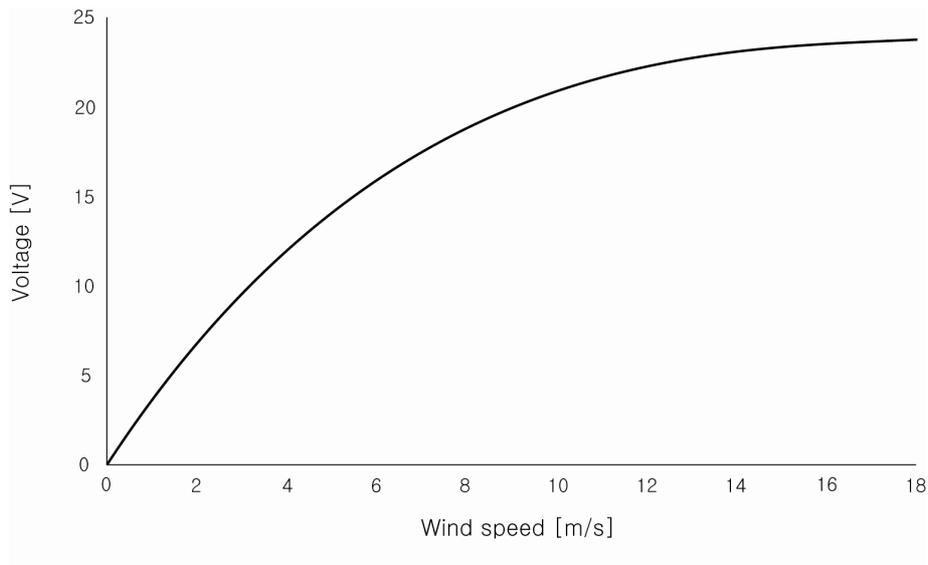


Fig. 22 Relation of wind speed and output voltage

풍속 15 m/s 전후에서 발전 전압이 AC 23.4 V 가까이 이르렀으며, 풍속이 더 빨라지더라도 더 이상 증가 되지 않았다. 발전 전압이 AC 23.4 V 이상이 되면 과충전 방지장치인 1 kW용 덤프에서 열이 나기 시작 했으며, 과전류를 소비시키는 24 V 40 W 전구가 점등 되었다..

덤프의 표면 온도가 70도 이상 시에는 강제 정지 장치를 작동 시켜 풍력 발전기의 회전을 중지 시켰다.

4.3 축전기 월 평균 전압 변화

DC-DC 컨버터 설계 제작 시에는 충전 가능한 입력 전압이 12~30 V, 출력 전압을 24~28 V로 예상 했지만 실제로는 입력 전압이 7.8 V부터 충전 표시램프가 점등이 되었으며 입력 전압이 23.4 V 이상에서 과충전 방지 장치인 부하 램프와 덤프로 과전류가 소비되었다.

월 평균 축전지 전압 (DC/V)은 1월부터 12월까지 DC 25.2 V에서 DC 24.4 V 내에서 방전과 충전을 계속하며 축전지 기능에 있어서 실험기간 동안 매일 10시간씩 800 W/day 정도의 전력을 사용하는데 아무런 문제점이 없었다.

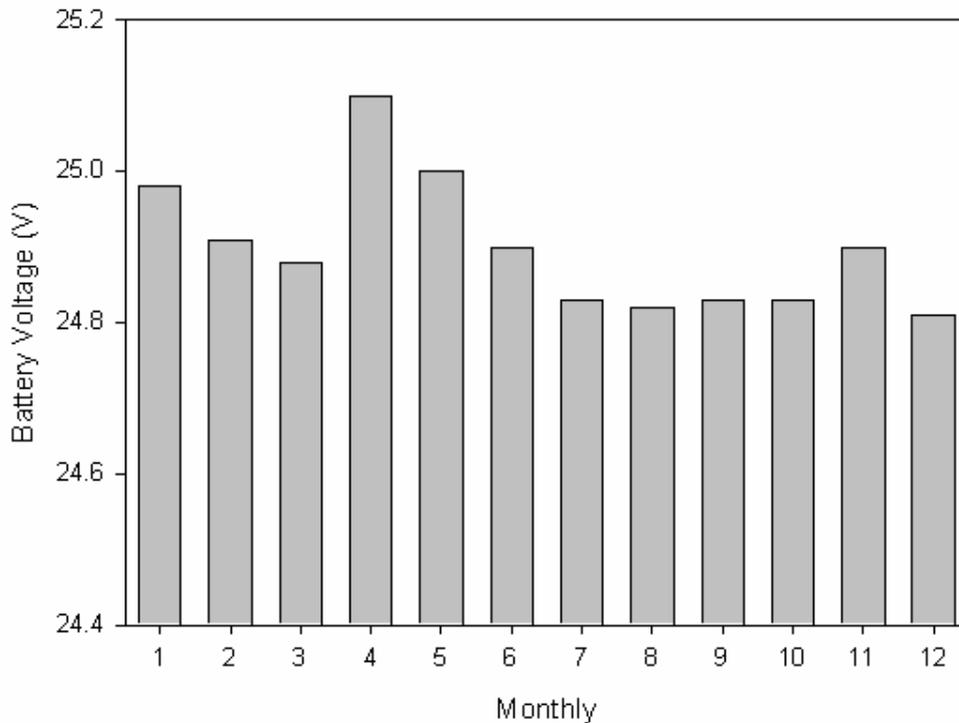


Fig.23 Change average voltage of battery

4.4 풍속과 소음 변화

풍속 12 m/s 이상이 되면 발전 전압이 AC 16.5 V가 되면서 진동이 심해지며 소음은 75 dB까지 상승 되었다.

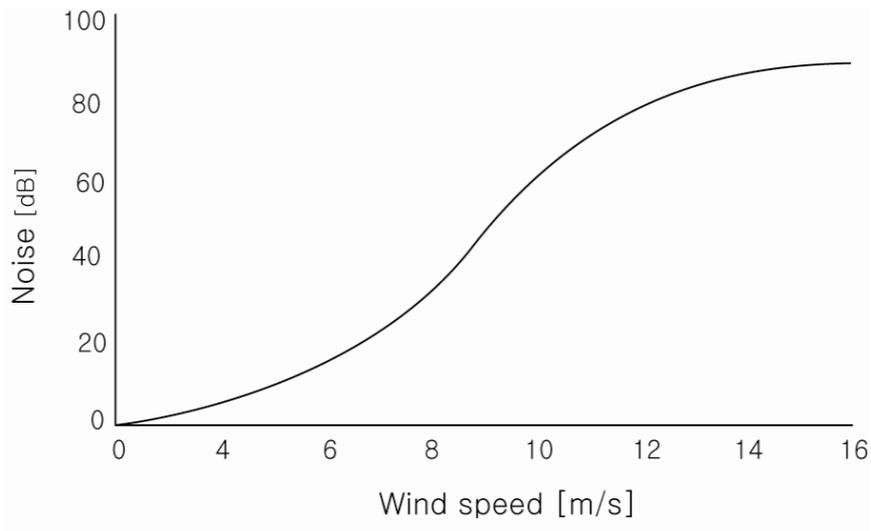


Fig. 24 Change of noise and wind speed

정격용량에 도달 할수록 발전기의 발전 부하로 인하여 65~75dB(데시벨) 정도의 소음이 발생 되는데 주간 보다 야간에 인근지역의 주민이나 사무실에 피해를 입힐 가능성이 있기에 야간에는 정격 출력에 도달하지 못하고 강제 정지 시킨 경우가 많았다. 블레이드에서 공기 저항으로 일어나는 소음도 발생 하는데 현재 적용한 피치 보다 큰 것을 사용하면 소음은 줄어드는 반면에 출력 이 감소되므로 발전기의 특성에 맞추어 가장 적합한 것을 사용해서 소음을 최소화 해야 한다.

국토이용관리법에 일반주거지역 및 준주거지역의 규정된 것은 주간에 65 dB 이하 야간에 55 dB이하로 정해져 있다. 에너지 관리공단에서도 2008년에 연구 과제로 제시할 정도로 주거지의 소형풍력발전기의 발생 소음을 60 dB 이하로 낮추려고 현재 노력중이며 소형풍력발전기의 개발해야 할 목표이기도 하다.

4.5 문제점 보완

1) 건물의 진동 문제

정격용량 발전에 도달하기 직전인 출력 AC 16.5 V 정도에서 강한 진동이 발생 하는데 지속적인 진동으로 인한 콘크리트 피로 현상이 우려될 정도이다. 이 점은 무시해서는 안 되는 중요한 문제이다. 정격 출력의 경우와 강풍 시에는 지렛대의 원리로 고정된 건물 바닥에 강한 진동을 주기 때문에 옥상 천정보 위에 타워의 베이스 플레이트가 위치하도록 하여야 하고 보강 할 수 있다면 옥상 슬래브 바닥에 가능한 하중이 넓게 분포 되는 구조로 한다. 진동과 소음을 최소화 하기 위하여 타워의 높이를 최대한 낮추어 설치하기 때문에 회전 반경 내의 장애물 등의 간섭이 될 가능성이 있는 것을 미리 예상하여 좌우상하 모두 잘 관찰하여 설치 위치를 정해야 한다.

우리나라 건축법에 사무실이나 일반건축물의 옥상 적재 하중을 200 kg/m^2 로 규정되어 있어 1 kW급 소형 풍력발전기의 총중량이 타워를 포함하여 150 kg 밖에 안 되지만 지렛대의 원리가 적용되기 때문에 강풍 시 건물이 받을 수 있는 풍하중이 풍속의 3제곱에 비례 하므로 건물 안전을 고려하여 강풍이나 진동에 대해 보강을 검토해야 한다.

2) 발전시스템 문제

자동 발전정지 장치

강풍이나 이상기상 조건에서 발전기 보호를 위해서 강제 정지 스위치를 작동 시켜야 하는데 풍속 18 m/s 이상의 강풍에서 발전을 급정지를 시키면 블레이드나 발전기에 무리를 줄 수 있기에 과속 방지 장치가 꼭 필요하다. 영구자석형 발전기의 특성상 출력 부분의 저항을 무한대로 올리는 것으로 제너레이터의 출력 3상선을 쇼트 시키는 것으로 이것은 Fig. 25에서 나타낸 것과 같이 저항 증가를 이용하여 점차적으로 무한대의 결속으로 자동 연결 되게 만들 수 있는 장치를 이용하면 급정지에 의한 기기 손상 문제는 해결 된다.

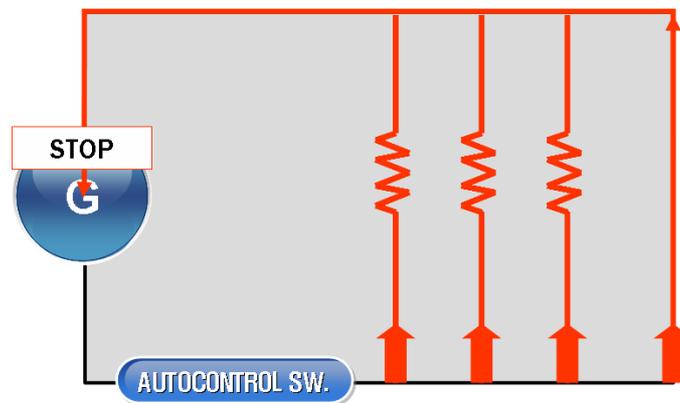
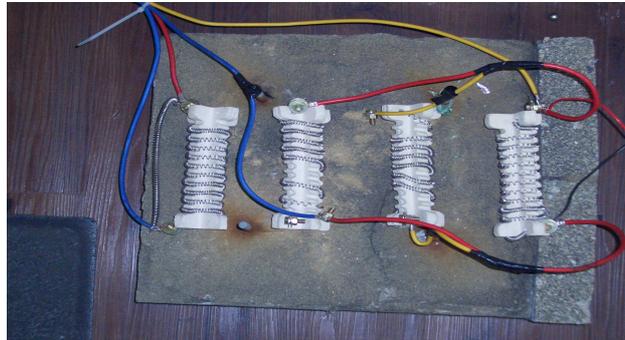


Fig 25. Circuit of auto stop system

타워의 적정한 높이와 자재

타워의 높이는 제너레이터와 결합된 블레이드의 회전 반경을 고려해서 결정되지만 고층의 옥상에 설치하는 것은 정격 용량으로 발전 될 시에 제너레이터의 발전 부하로 진동과 소음이 발생 되는 것을 최대한 줄이기 위해서는 지상에서 세우는 타워의 개념을 생각지 않고 블레이드가 회전중에 간섭을 받지 않는 최소의 길이로 설계 되어야 한다. 제너레이터가 타워의 끝부분에 장착되기 때문에 타워의 길이에 비례되어 지렛대 작용으로 진동과 하중이 증가되어 옥상 바닥 구조에 부담을 줄 수 있다. 그러므로 지상에서 사용하는 타워의 규격에 20% 정도 기계적인 강도가 높은 자재를 사용해야 한다.

LED등의 조명으로 소비전력 최소화

백열등이나 삼파장등의 조명보다 적은 소비전력을 사용하는 LED 등을 사용하여 건물 간판 표시등이나 안내등 외등 등 소비 전력이 작은 조명 기구에 사용하면 축전지의 사용 기간도 길어지며 실용성이 아주 높아진다.

낙뢰방지

낙뢰에 의한 기기 파손을 방지하기 위하여 기 설치된 피뢰침의 보호각 내에 발전기 블레이드의 회전 반경이 포함되도록 예상하여 설치하여야 하며 그러한 조건이 충족 되지 않으면 별도로 피뢰침을 세워야 한다. 만약 근처에 고층건물이 있어서 그 건물의 피뢰침 보호각 내에 풍력 발전기가 설치되어 있다면 낙뢰의 위험이 없다. KS규격에서는 피뢰침의 보호 각을 22~55°를 규정 하고 있다.

5. 결 론

지표면 풍속의 특성상 고도가 높아질수록 바람의 세기가 강해지고 강한 바람일수록 단위 면적당 풍속의 3승에 비례하여 바람에너지가 증가한다. 본 연구에서는 이러한 사실에 기초하여 지면에서 30~40 m 높이에 있는 고층 빌딩의 옥상이 풍력발전에 최적의 장소가 될 것이라는 가정 하에 1 kW급 독립형, 영구자석형 제너레이터를 장착한 소형풍력 발전기를 건물옥상에 설치하고 풍속, 출력, 전력 변환장치, 축전지 상태, 소음, 진동, 안정성 등과 구조적인 문제점까지 종합적으로 실증 운전을 실행한 결과 소형 풍력발전기의 건물옥상에서의 종합적인 실용가능성을 확인할 수 있었다. 다만 유의해야 할 점은 발전기의 총중량만 계산하여 구조적인 안전성을 판단해서는 아니 되며 풍속의 3제곱에 비례되는 풍하중의 위험을 보장하여 안전하게 소형풍력발전기를 설치한다면 고층의 특성을 잘 살린 효율적인 발전시스템을 갖출 수 있을 것이다. 소형풍력발전기를 고층 건물 마다 설치해서 청정에너지를 생산한다면, 이산화탄소 배출을 줄여 지구온난화를 막으려는 국제사회의 노력에 동참하는 결과가 된다. 소형 풍력발전에 관련된 산업의 미래의 수요를 예측하고 준비하여 고층빌딩에 완벽하게 적용시킬 수 있는 기종을 개발 한다면 국내시장뿐 아니라 국제시장에서도 충분한 경쟁력을 갖출 수 있으며 환경 친화적인 상징물로서도 한몫을 할 것이라 판단된다.

참고 문헌

- [1] 공정식, 오철수, "AFPM 전동기의 특성 해석", 경북대학교 산업기술연구지, N0.7, pp. 125~139, 1995.
- [2] 이정열, 공정식, 서영택, 오철수, " Slotless Axial Flux BLDC 전동기 설계", 경북대학교 전자기술연구지, pp. 50~58, 1997.
- [3] <http://www.energy.or.kr/>
- [4] 공정식, 유현오, 오철수, "Double-Layer AFPM 전동기의 특성 해석", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 24~27, 1999.
- [5] Yurity N, Zhilichev, " Three-Dimensional Analytic Model of Permanent Magnet Axial Flux Machine", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 6, pp. 3897 ~ 3901, 1998.
- [6] <http://racer.kemco.or.kr/index.jsp>
- [7] <http://www.unison.co.kr/>
- [8] 박진철 "건물에서의 풍력발전 적용에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 2003.
- [9] 김형길, 김철호, 서영택, 오철수 "소형 풍력의 한계풍속 제어에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.
- [10] 공창덕, 방조혁, "1 kW급 소형 풍력 발전용 블레이드의 공력설계 변수에 관한 연구", 한국항공우주학회 춘계 학술대회 논문집, 2003.
- [11] 공창적, 방조혁, 오경원, "1 kW급 소형 풍력발전용 블레이드의 구조설계", 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, 2003.
- [12] 김한수 외 9명. "풍력 발전 표준화 사업 보고서", 대한전기협회, 2007.
- [13] REN21, Renewable 2005 GLOBAL STATUS REPORT, 2005.
- [14] European Renewable Energy Council(EREC), 2004, Renewable Energy Targer for Europe - 20% by 2020, Briefing paper, Brussels
- [15] EWEA, Wind Market Report, Brussels, 2005.
- [16] World Energy Investment Outlook 2005, IEA