

## 6kw급 소형풍력발전기 실증연구결과

김상진, 김영달, 김용환, 황철희, 박건식, 남용태, 박종복,  
유능수, 김석현, 강신유, 남윤수, 이정완, 김병희, 김광호, 김상훈

### 요 약

본 연구는 IEC 규정에 의거해 6kw급 소형풍력발전기 성능실증연구를 수행하였다. 실증연구를 수행하기 위하여 풍력발전기에 각종 센서를 설치, 측정 사이트에 모니터링 시스템을 구성하여 데이터를 수집 분석하였다.

### 1. 서 론

국가 에너지원의 약 97%를 해외에 의존하는 우리로서는 지하자원의 부족, 에너지단가의 상승으로 인해 선진국으로 성장하는 데에 큰 장애요인으로 작용하고 있다. 이는 미래에 에너지가 국가의 생존전략에 핵심 변수로 작용할 수 있다는 뜻으로 해석할 수 있으며 최근에는 에너지가 국가의 안보와 같은 중요한 국가전략으로 고려되고 있다.

풍력발전기의 시스템 발전은 유럽으로부터 활발히 진행되어 왔으며 지금의 세계시장을 독일, 덴마크, 스페인 등이 주축이 되어 많은 풍력에너지를 공급하고 있다.

국내에는 1970년대 오일파동으로 인해 신·재생에너지의 필요성으로 인해 풍력발전기 개발을 시작하였고, 초기 프로토타입으로 20kw급까지 연구개발을 수행하였으나 지속적인 연구가 없어 시스템 원천기술의 확보에 많은 어려움이 있는 실정이었다. 그러나 최근에 도쿄의정서의 발효로 인해 국내 신·재생에너지 개발에 많은 활력소가 되어 750kw급까지 개발이 완료되었고 실증연구가 진행되고 있는 실정이다.

그러나 아직 한국지형, 풍황조건에 맞는 풍력발전시스템 설계와 성능에 대한 정확한 자료가 없어 본 연구과제와 같은 실증연구를 통하여 향후 개발될 유사 풍력발전 시스템 평가를 위한 연구 기본자료가 필요하다.

본 연구에서는 6kw급 소형풍력발전기를 강원도 대관령에 위치한 “풍력 실증연구단지”에서 풍력발전시스템의 상용화를 위한 실증연구를 수행하였다.

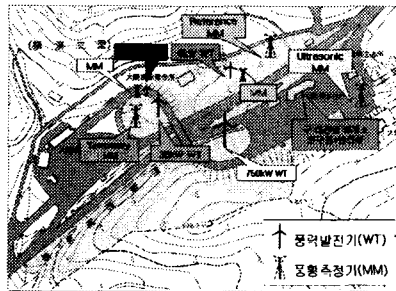
연구를 원활히 수행하기 위하여 강원대학교의 국내 실증연구 수행 경험과 관련 인프라를 이용하여 IEC 61400-12규정에 따른 연구를 수행하였다.

## 2. 본 론

### 가. 실증단지 조성

#### 1) 풍력발전기 설치장소 선정

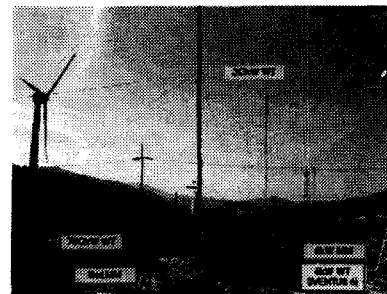
본 연구를 수행하기 위하여 실증연구단지(강원도 평창군 도암면 황계리 14-92번지 일대, 북위 37°40' 55.3", 동경 128°45' 33.4", 해발고도 838m)에 설치하였다.



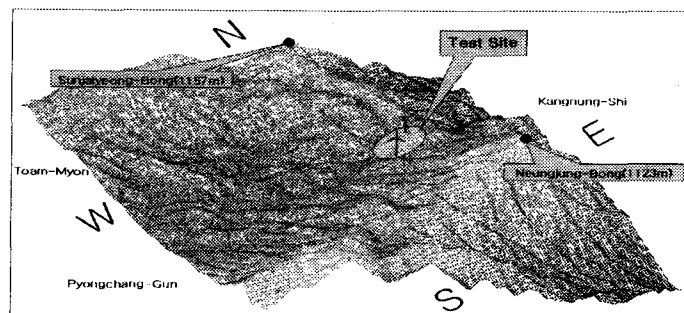
[그림 1 : 시설물 배치도]



[그림 2 : 6kW 풍력발전기 주변 환경]



[그림 3 : 3 6kW 풍력발전기 주변 환경]



[그림 4 : 대관령 단지주변 현황]

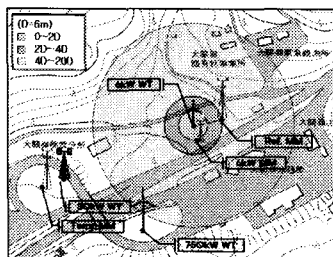
실증단지는 남쪽으로 해발고도 1,123m의 능정봉과 북쪽으로 1,157m의 선자령봉이 가로막고 있어서 서풍과 동풍계열의 바람이 주 바람 방향이며, 남풍과 북풍은 거의 없다. 실증단지가 위치한 대관령지역은 바람이 많고, 안개, 기온 등이 고산

기후특성을 지니고 있다. 그림 1, 그림 2, 그림 3은 대관령 실증단지에 설치된 풍력발전 시스템과 풍황계측타워의 배치도와 주위의 전경이며 그림 4는 대관령지역의 수치지도(Digital Map)를 이용하여 시험 사이트 주변의 지형을 3차원으로 나타낸 그림이다.

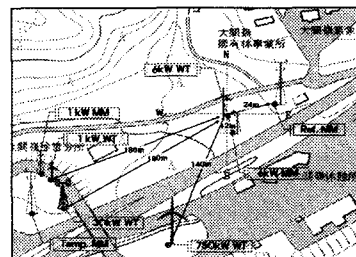
## 2) 풍황자원계측타워 설치

풍력터빈의 성능평가와 풍황계측타워의 위치를 선정하기 전에 풍황계측타워나 풍력터빈이 풍속의 왜곡이 발생하는 위치에 있지 않도록 해야 한다. 대부분의 경우 풍황계측타워의 최적의 위치(로터직경의 2.5배 권장)는 주풍방향으로 풍력터빈의 앞쪽에 설치되어야 한다. 즉, 대관령 시험사이트의 주 풍향은 주로 서풍계열이므로 시험 풍력터빈의 동쪽에 성능평가를 위한 풍황계측타워를 설치하는것은 옳지 않다.

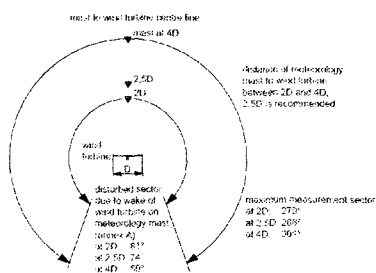
본 연구에서 풍황계측타워는 풍력터빈으로부터 남쪽 방향으로 12m 떨어진 거리에 설치되었고 주풍방향에 풍력터빈과 함께 수직으로 설치되어 단지교정을 수행할 필요가 없었다.



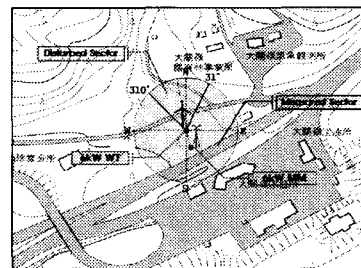
[그림 5 : 풍력터빈과 관련물간의 거리]



[그림 6 : 풍력터빈과 주요시설물간의 거리]



[그림 7 : 풍력터빈과 풍황계측타워의 거리에 따른 교란영역]



[그림 8 : 풍력터빈에 의한 교란영역]

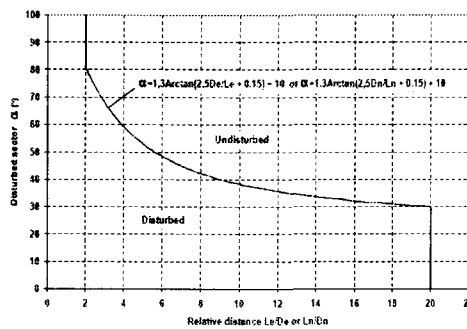
시험 풍력터빈은 남쪽 방향에 위치하고 있는 그림 10의 750kw급(J-48) 풍력터빈의 영향을 받게 된다. 식 1에 의하여 시험 풍력터빈에 이웃하여 운행하고 있는 J-48 풍력터빈의 로터 직경  $D_n(=48m)$ 과 두 풍력터빈 사이의 거리  $L_n(=140m)$ 으로 계산된  $\alpha$ 값은  $68^\circ$ 이고, 이는 이웃한 J-48 방향을 중심으로 하여  $\alpha$ 값의 범위를 말한다. 따라서 교란영역은 북쪽  $0^\circ$ 를 기준으로 할 때 시계방향으로  $174^\circ \sim 242^\circ$ 이 된다. 또한 서쪽 방향에 위치하여 있는 그림 11의 1kw급 풍력터빈은 로터직경  $D_n$ 은 1.06m이고, 시험 풍력터빈과의 거리  $L_n$ 은 180m이다. 따라서 거리  $L_n$ 은  $169D_n$ 이므로 교란영역으로 고려되지 않는다.

$$\alpha = 1.3 \times \text{Arctan}(2.5D_n/L_n + 0.15) + 10 \quad \dots\dots\dots(\text{식 1})$$

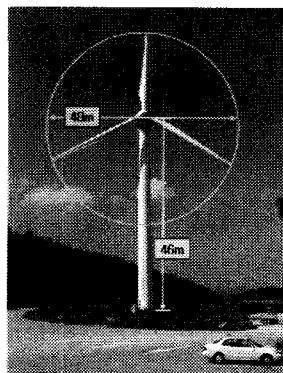
$\alpha$  : 이웃한 풍력터빈의 영향을 받게 되는 교란영역 [deg]

$D_n$  : 이웃 풍력터빈의 로터의 직경 [m]

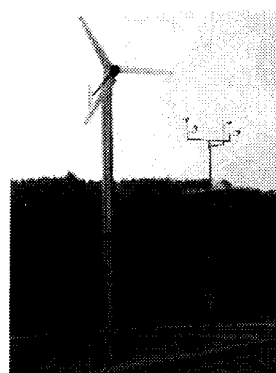
$L_n$  : 이웃 풍력터빈과 시험 풍력터빈 사이의 거리 [m]



[그림 9 : ] 이웃 풍력터빈의 후류로 인해 제외되는 풍향영역



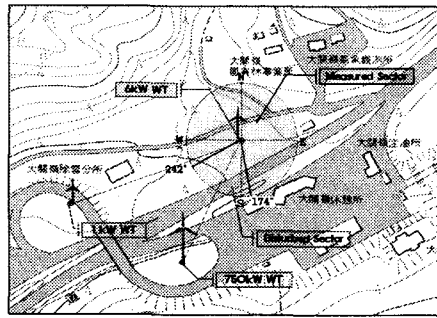
[그림 11 : 750kw급 풍력터빈]



[그림 11 : 1kw급 풍력터빈]

그림 12는 이웃하여 작동하는 모든 풍력터빈들에 의한 교란영역과 측정 방위구

분을 보여주고 있다.



[그림 12 : 이웃한 풍력터빈들에 의한 교란영역]

3) 장애물에 의한 교란영역

시험 풍력터빈과 풍황계측타워로부터 일정한 거리 내에 공기의 흐름에 무시할 수 없는 영향을 미치는 큰 빌딩, 나무, 정지된 풍력터빈 등이 존재하면 이를 장애물로 취급한다. 오로지 측정 장비나 풍력터빈의 작동과 연관된 작은 건물만이 허용된다.

$$D_e = \frac{2 I_w I_h}{I_w + I_h} \dots\dots\dots (식)$$

2)

$D_e$  : 장애물의 등가 로터 직경 [m]

$I_w$  : 장애물의 너비 [m]

$I_h$  : 장애물의 높이 [m]

장애물에 의한 교란영역은 식 3으로 구할 수 있다.

$$\alpha = 1.3 \times \text{Arctan}(2.5 D_e / L_e + 0.15) + 10 \dots\dots\dots (식)$$

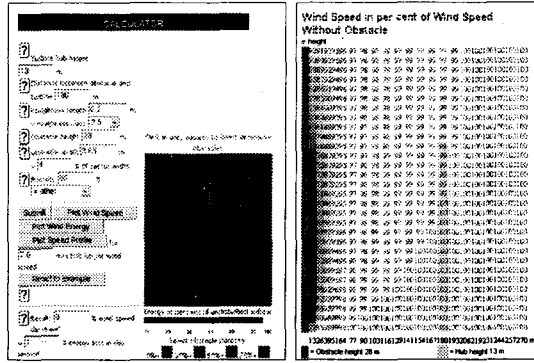
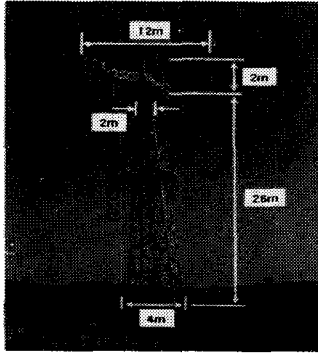
3)

$\alpha$  : 장애물의 영향을 받게 되는 교란영역 [deg]

$D_e$  : 장애물의 등가 로터 직경 [m]

$L_e$  : 장애물과 시험 풍력터빈 사이의 거리 [m]

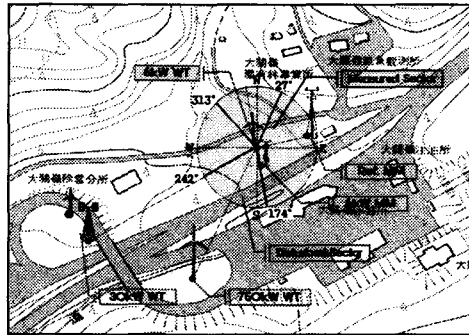
서쪽 방향에 위치한 30kw급 풍력발전기는 작동하지 않기 때문에 장애물로 고려하였다. 이 장애물에 의한 후류의 영향을 알아보기 위해, Danish Wind Industry Association에서 제공하는 Wind Shade Calculator로 계산하였다. 그림 14는 계산결과를 보여준다. 그림 13 30kw급 풍력발전기는 장애물로서 풍속에 거의 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.



[그림 14 : 30kw 종축형 발전기] [그림 14 : Wind Shade Calculator와 계산결과]

#### 4) 시험 풍력터빈의 최종 교란영역

위의 결과들로 대관령 시험사이트에서 시험 풍력터빈의 최종 교란영역은 그림 15에서처럼 174° ~ 242°, 310° ~ 31°가 되고, 이 영역에 포함되는 데이터는 풍력터빈의 성능실증에서 제외되어야 한다.



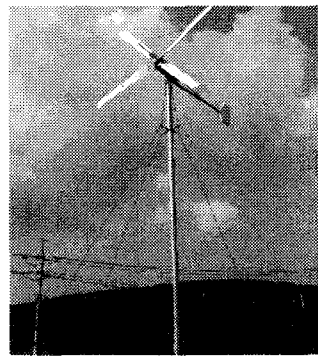
[그림 15 : 6kw 풍력터빈의 최종 측정 방위구분]

#### 나. 풍력발전기

Tilt-up형 풍력발전기(독립형)로서 특수장비의 지원없이 현장에서 쉽게 설치, 분해가 가능한 구조로서 4개의 보조 케이블을 이용해 타워의 진동을 방지하는 간단한 형태의 풍력발전기이다.

<표 1 : 6kw 풍력발전기 재원>

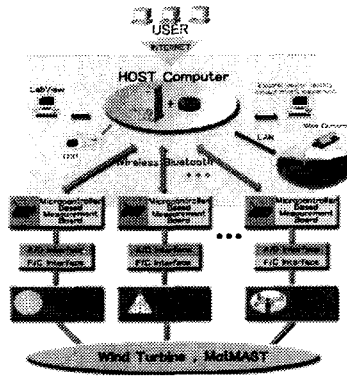
rated power	6kW
hub height	13 m
rotor diameter	6 m
number of blades	4
operation speed	80-145 rpm
rated wind speed	10.5 m/s
cut-in wind speed	3 m/s
cut-out wind speed	30 m/s
survival wind speed	60 m/s
power control system	passive blade pitch change, pole change
yawing control	wind vane
weights	rotor blades : 48kg machine nacelle : 208kg tower : 220kg



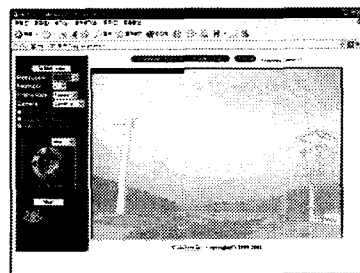
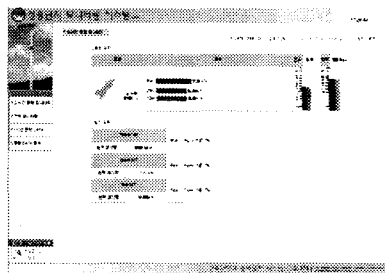
[그림 1 : 16 6kw 풍력발전기]

#### 다. 모니터링 시스템 구성

본 실증연구에서는 실험적인 모니터링 시스템이 구현되었다. 실증단지 조성의 경제성 및 단지활용 효율성을 위하여 무선방식의 데이터 전송과 유선방식의 데이터 전송방식을 동시에 운용하여 앞으로 타 실증연구를 위한 데이터 전송라인의 설치비용을 절감하기 위한 시도를 하였다. 그리고 실시간 측정데이터를 온라인을 통해 원격지에서 데이터를 저장 분석을 할 수 있고, 실증단지의 상황을 웹카메라를 통해 시각적으로도 확인할 수 있었다.



[그림 17 : 전제 모니터링 시스템 구성도]

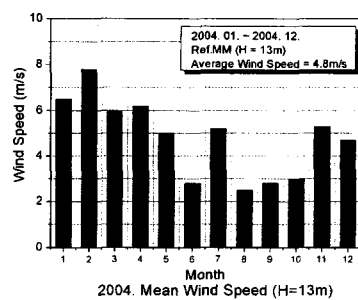


[그림 18 : 실시간 모니터링] [그림 19 : Web Camera]

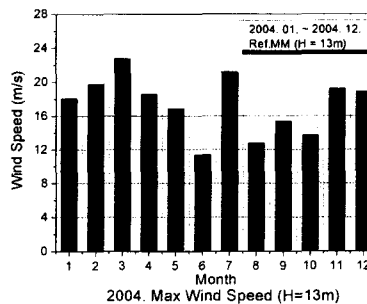
## 라. 실증단지의 풍황

### 1) 연간 풍황자료

실증단지에서 2004년 1월부터 2004년 12월까지 13m의 측정타워를 설치하여 풍황자료를 수집, 분석 하였다.

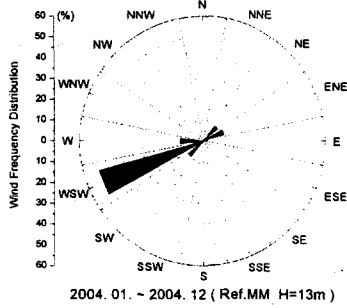


[그림 20 : 13m 월간 평균풍속]

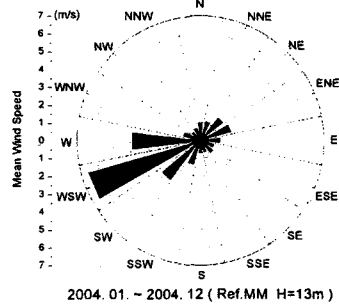


[그림 21 : 13m 월간 최대 풍속]

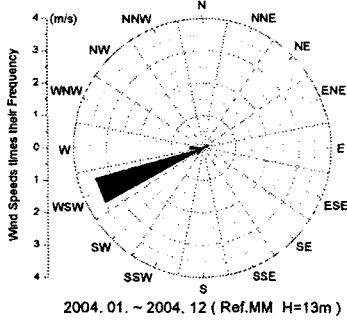




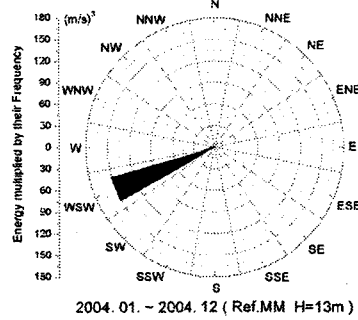
[그림 23 : 풍향 빈도 분포]



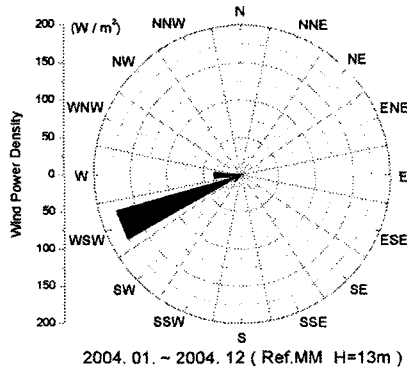
[그림 23 : 풍향별 평균 풍속]



[그림 25 : 풍속 × 빈도수]



[그림 25 : 풍속³ × 빈도수]



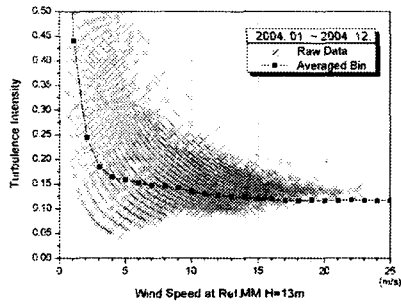
[그림 26 : 풍향별 풍력에너지 밀도]

그림 27, 그림 28은 실증단지에서 2004년 1월부터 2004년 12월까지 풍력터빈의 허브높이에서 측정된 난류강도를 나타내고 있다.

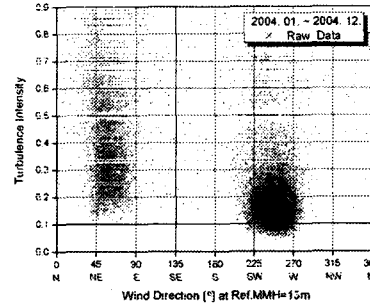
$$Turbulence \intensity = \frac{\sigma_{10min}}{V_{10min}} \dots\dots\dots(식 3)$$

$\sigma_{10min}$  : 10분 동안 측정된 평균풍속의 표준편차

$V_{10min}$  : 10분 동안 측정된 평균풍속

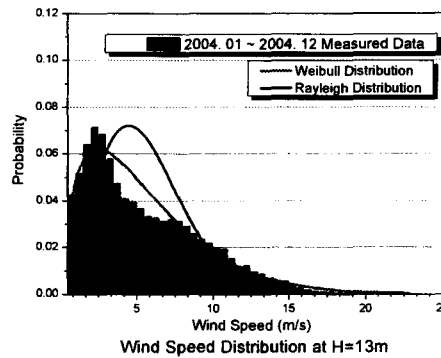


[그림 28 : 풍속별 난류강도]



[그림 28 : 풍향별 난류강도]

그림 29는 2004년 1월부터 2004년 12월까지 1년간 허브높이에서 측정된 대관령 실증단지의 풍속을 두 가지 분포형태로 나타낸것이다. 이 같이 측정된 풍속자료를 와이블(Weibull) 파라미터로 표현하면 형상정수(Shape Factor)  $k$  는 1.336이고, 척도정수(Scale Factor)  $c$  는 5.74이다. 그리고 형상정수가 2인 와이블분포(Weibull Distribution), 즉 레일리분포(Rayleigh Distribution)의 척도정수  $c$  는 5.721이다.



[그림 29 : 13m에서 풍속 확률 분포]

#### 마. 6kw 풍력발전기의 타워 구조 해석

##### 1) 재료 선정 및 조건

해석 수행 시에 선정된 재료는 DIN 2458로 하였으며 물성치는 아래와 같다.

Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Modulus of Elasticity(GPa)	Shear Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
7810	210	80	0.3

다음과 같이 2가지 단계로 나누어 하중 및 구속조건을 설정하여 해석을 수행하였고, 공력하중은 2002년도 대관령에서 불었던 태풍 '매미'의 최대풍속인 55m/s를, 풍력발전기의 자중에는 4.81kN을 해석 수행 시 적용하였다.

적용된 하중조건	
1 단계	o 6kW급 풍력발전 타워의 자중
2 단계	o 6kW급 풍력발전 타워의 자중 o 6kW급 풍력발전 타워가 받는 공력하중
※ 모든 경우에 대한 구속조건은 풍력발전 타워의 최하단부 고정부위 만을 적용	

### 2) 타워의 정적 구조해석

타워의 정적해석 수행 시 ANSYS의 Beam 요소를 사용하여 모델링을 하였으며 타워를 제외한 부분의 모델링은 생략하였다.

해석 결과		
	1단계	2단계
변위	$6.72 \cdot 10^{-5} \text{mm}$	3.023mm
최대응력	34.2Pa	3.97kPa

### 3) 타워의 Buckling analysis

타워의 Buckling analysis 수행시 정적 구조해석과 마찬가지로 Beam 요소를 사용하여 모델링을 하였다. 해석은 ABAQUS를 이용하여 3D 모델링을 하였다.

표 2 1단계 Buckling 해석 결과(타워의 자중만을 적용)

Buckling Mode	1차	2차	3차
Critical Load	962.7kN	1003.7kN	6851.1kN
Eigenvalue	7.38584E+05	7.70130E+05	5.26812E+06

<표 3 : 2단계 Buckling 해석 결과(타워의 받는 공력하중 적용)>

Buckling Mode	1차	2차	3차
Critical Load	1901.5kN	1905.6kN	4389.8kN
Eigenvalue	-1.46399E+06	1.46444E+06	-3.37821E+06

<표 4 : 3단계 Buckling 해석 결과(타워의 자중과 공력하중 적용)>

Buckling Mode	1차	2차	3차
Critical Load	833.3kN	958.9kN	3066.1kN
Eigenvalue	6.37662E+05	7.34277E+05	2.35518E+06

위 해석결과로 Critical Load 이상의 하중을 받지 않는 이상 타워의 자중 (4.81kN)은 매우 안전하다고 판단된다.

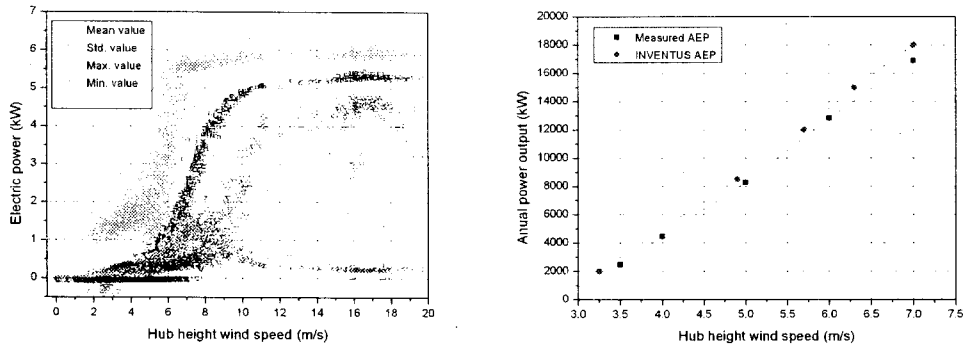
#### 바. 6kw 풍력발전기의 진동 및 소음특성

본 실증연구에서는 IEC 61400-11규정에 따라 소음 실증 절차를 검토하여 실증 데이터를 수집했다.

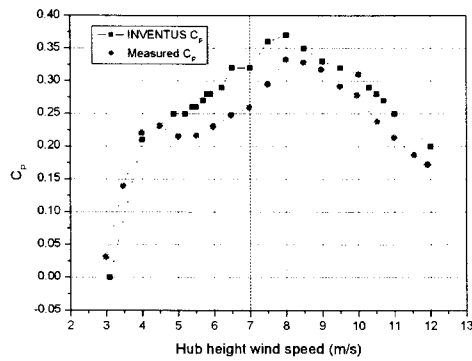
- 1) 로타의 회전속도에 무관하게 1.2Hz ~ 1.3Hz 의 피크 주파수 성분이 타워의 진동을 지배한다.
- 2) 147rpm 부근에서 작업 시, 로타 회전수의 1/2 주파수 성분에 의하여 발전기-가이 케이블 구조계의 1차 고유진동수가 공진되어 최대의 진동레벨을 보인다.
- 3) 이러한 공진은 정격풍속 10m/s 이후의 140rpm ~ 150rpm 에서 작업하는 과정에서 발생하므로 안전성 측면에서 문제가 될 수 있다.
- 4) 가이 케이블의 장력을 높여 타워계의 고유진동수를 1.25Hz 이상 되도록 한다면, 공진대역을 작업속도 범위 위로 올릴 수 있을 것이다.

#### 사. 6kw 풍력발전기의 출력성능 실증

6kw 풍력발전기의 출력곡선과 연간 발전량을 평가하기 위하여 2004년 6월부터 2005년 1월까지의 데이터를 사용하였다. 그림 30은 풍속에 따른 10분간 평균출력, 표준편차, 최대값, 최소값을 나타낸것이다.



[그림 31 : ]출력 성능 시험(Raw Data) [그림 31 : 연간 발전량(AEP)]



[그림 32 : 출력계수( $C_p$ )]

### 3. 결 론

본 실증연구를 통해 실증단지의 유용한 활용을 위하여 Wireless 형 데이터 전송 시스템을 시험 구축하고, 웹카메라를 설치하여 단지의 상황을 실시간으로 감시하였다.

#### 가. 소음 및 진동

6kw 풍력발전기의 파운데이션의 문제로 인해 147rpm 부근에서 로터 회전수의 1/2 주파수 성분에 의한 발전기-가이 케이블 구조계의 1차 고유진동수가 공진되어 최대의 진동레벨을 보였다. 이는 가이 케이블의 장력 조정과 파운데이션의 수정으로 문제를 해결 할 수 있다.

#### 나. 시스템 구조안전성 해석

자중 및 최대 풍압하중 하에서 구조물의 응력상태를 계산한 결과 안전하게 설계되었다고 판단됨

#### 다. 출력성능실증

실증연구 결과 정격출력에 약 10%적은 출력을 보였으며, 이는 산악풍황의 영향이 있었으리라 판단된다.

위 와같이 6kW급 소형풍력발전기 실증연구를 수행하여 제품의 수정, 보완요소를 검토하였고 차후 안정된 시스템 설계의 기본이 될 수 있다고 생각된다.