

# 소형 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 출력 성능 평가

## Vibration Monitoring and Power Performance Evaluation of a Small Stand-alone Wind Turbine Generator

김 석 현† · 유 능 수\* · 김 윤 호\*\*  
Seockhyun Kim, N. S. Yoo and Yoon-ho Kim

(2006년 8월 7일 접수 ; 2007년 1월 16일 심사완료)

Key Words : Small Stand-alone Wind Turbine Generator(소형 독립형 풍력발전기), Remotely Integrated Monitoring System(원격 통합 모니터링 시스템), Tower-cable Resonance(타워-케이블 공진)

### ABSTRACT

Vibration performance of a 6 kW stand-alone wind turbine(W/T) generator is investigated under the wind environment of Daegwanryung mountain area. In the W/T, wind condition, power performance and structural stability are correlated each other. An integrated monitoring system which consists of accelerometers, anemometers, power meters and auxiliary sensors for atmospheric data are constructed to measure the required data simultaneously. Based upon the data acquired over a long period of time, vibration performance of the W/T structure is estimated with annual wind data and generating power performance. Within the operating speed range, possibility of severe vibration is diagnosed. Vibration sources are identified and countermeasures are proposed. The goal of the study is to offer the basic information on W/T vibration performance at the design stage of a small stand alone W/T structure.

### 1. 서 론

지구 온난화 및 대기오염 등의 환경문제와 원유가의 급등에 따른 에너지원의 다변화 필요성은 신재생, 청정에너지의 보급을 촉진시키고 있다. 이에 따라, 국내의 산악, 해안 및 섬 지역의 풍부한 풍력 자원을 청정 대체 에너지원으로 활용하는 연구 및 투자가 활발히 이루어지고 있다. 서구의 경우, 독일을 선두로 미국, 스페인, 덴마크 등이 풍력 발전 산업을 주도하면서, 1996년 이후 세계 풍력 시장의 연평균 성장률은 40%에 달하고 있다<sup>(1)</sup>. 선진국에 비하여

국내 풍력 시장은 그 규모면에서 아직 미미한 수준이나, 신재생에너지의 보급 확대를 위한 정부의 지원하에 업체, 대학 및 연구기관의 공동 연구가 추진되고 있다. 2005년 40 MW 규모의 영덕 풍력발전단지가 준공되어 가동 중이며, 98 MW 규모의 대관령 풍력발전단지도 최근 준공되었다. 이미 750 kW 급 국산 모델이 개발되어 실증 중에 있고<sup>(2)</sup>, 2 MW 급 풍력발전기도 개발 중이다. 이러한 상업용 발전단지에 사용되는 중대형 모델과는 별도로, 산간 오지나 섬 등에서 기존 전력망으로의 계통 연계 없이 가구별로 사용하는 6 kW, 10 kW급 독립형 소형 풍력발전기에 대한 연구도 진행되고 있다<sup>(3)</sup>. 개발된 풍력발전기를 시장에 보급하기 위해서는, 사용지역의 연간 풍력자원, 출력 성능, 구조 안전성 및 소음에 대한 평가가 선행되어야 한다. 이러한 물리량들은 상호 연관되므로, 발전기의 성능을 평가하기 위

† 책임저자; 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail : seock@kangwon.ac.kr

Tel : (033)250-6372, Fax : (033)257-4190

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

\*\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

해서는 관련 물리량을 종합적으로 측정하는 통합 모니터링 시스템이 필요하다<sup>(4,5)</sup>. 그러나 최근에는 풍력발전기의 국산화 개발이 진행된 관계로, 국내의 평가 기술은 이제 겨우 시작하는 단계이다. 더욱이 소형 독립형 풍력발전의 경우 몇몇 중소 업체가 외국의 모델을 벤치마킹하여 개발하는 단계로, 풍 환경, 발전효율, 구조 안전성, 소음 등에 대한 종합적인 평가를 업체가 직접 수행하는 것이 어렵다.

이 연구에서는 대관령 풍력실증단지에서 통합 모니터링 시스템을 구축하고, 6 kW 독립형 풍력발전기의 진동을 장기간에 걸쳐 모니터링 한 후, 연간 풍속 데이터 및 전기 출력과 함께 발전기 운전속도에 따른 진동성능을 종합적으로 평가한다. 운전 범위에서 심각한 진동 발생 여부의 진단, 그 원인의 규명 및 대책의 수립, 그리고 발전 성능과의 관계를 규명하여, 소형 풍력발전기의 국산화 개발단계에 필요한 구조 설계의 기본정보를 제공하는 것이 연구의 목적이다.

## 2. 풍력발전기의 제원 및 실증 환경

Fig. 1은 연구용 풍력발전기인 독일 INVENTUS 사의 6 kW 독립형 모델인 INVENTUS 6이며, Table 1은 그 제원을 표시한다. 독립형 풍력발전기는 상업용 발전단지에서 기존의 전력망에 전력을 공급하는 중대형 모델과 달리, 계통연계 없이 수 kW에서 수십 kW의 전력을 독립적으로 공급한다. 이러한 소형 모델은 일반적으로 Fig. 1에서와 같이 강관 타워 상단에 날개 및 발전기를 설치하고, 타워 상부를 4개의 케이블(guy cables)로 지지하는 구조로 되어 있다. 이 모델의 경우, 정격속도 이상에서 자동 피치제어<sup>(4)</sup> 기능을 갖는 4개의 조정봉(pitch control bar)이 날개와 회전축단을 연결하고 있는 점이 특징이다. 구조용 강관으로 된 타워는 기초부의 편 축에 대하여 회전이 자유로운데, 원치로 케이블을 당겨줌으로써, 성인 1인이 발전기를 설치할 수 있다. 이러한 구조는 국내외에서 개발되는 10 kW 내외의 독립형 풍력발전기의 일반적인 형태로, 이 연구는 유사 모델의 국산화 개발을 염두에 두고 수행되었다.

진동 및 출력 성능은 발전기가 사용되는 지역의 풍 환경과 직접적인 관계가 있다. 산간지역에서의 적용을 고려하여 강원도 평창군에 조성된<sup>(6)</sup> 대관령

실증연구단지에서 종합적인 평가를 수행하였다. 모니터링과 성능 평가가 수행된 대관령풍력실증단지의 배치도를 Fig. 2에 보인다. 풍속 및 풍향 데이터의 월별, 일시별 분포를 구하기 하여, 기상계측타워(meteorological mast)를 설치하여 2004. 1~2004. 12의 연간 데이터를 수집하였다. 단지 내 풍 환경 및 단지 교정에 대한 검토는 별도의 문헌에서 상세하게 기술한다<sup>(3)</sup>.

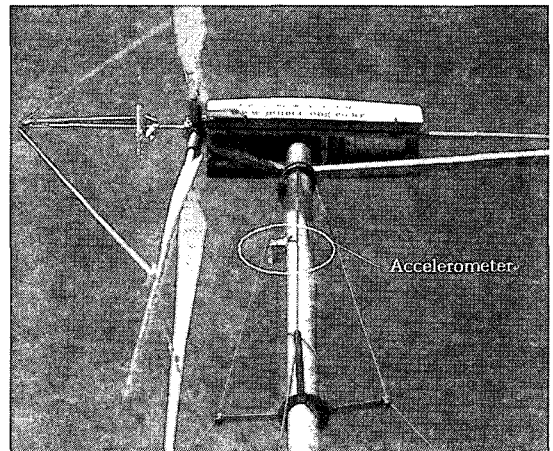


Fig. 1 6 kW W/T test model

Table 1 Specification of 6 kW W/T

Model	INVENTUS 6
Rated power	6 kW
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	Passive blade pitch change, Pole change
Yawing control	Wind vane
Weights	Rotor blades : 48 kg Machine nacelle : 208 kg Tower : 220 kg
Generator	Synchronous, Self-contained 0~1500 rpm, 3-Phase, 50 Hz

### 3. 통합 모니터링 시스템

발전기의 진동 성능을 평가하기 위해서는 진동뿐만 아니라 풍속, 풍향, 압력, 온도 및 회전속도를 통합하여 모니터링 하는 것이 필수적이다. 또한 장기간에 걸친 운전을 지속적으로 모니터링 하여야 하므로, 현장의 상태를 감시하면서 원격 모니터링이 가능하여야 한다. Fig.3은 원거리에서 데이터 취득이 가능한 통합 모니터링 시스템의 구성도이다. 풍향 데이터를 통합하여 하나의 마이크로 컨트롤러로 처리하기 위해서 4개의 타이머/카운터와 8개의 아날로그/디지털(A/D) 변환기가 있는 데이터 취득 보드(ATmega128, Atmel사)를 사용하였다. 풍속계(NRG 40)의 풍속에 비례하는 주파수 출력치는 LabVIEW를 사용하여 풍속으로 변환시켰다. 풍속은 타워 남쪽 11m에 기상계측타워 13m 높이에 측정하였다. 기상계측타워(meteorological mast) 혹은 풍력발전기의 풍향계, 압력계, 온도계, 가속도계 등에서 출력되는 신호는 ATmega128 보드로 처리한 후, bluetooth를 이용하여 실증 단지의 중앙 컴퓨터로 전송된다. 중앙컴퓨터 하드디스크에 수록된 각종 데이터는 LabVIEW를 이용하여 인터넷으로 원격 전송시켜<sup>(5)</sup>, 원거리의 연구실에서 풍속, 로터 속도, 전기 출력 및 진동 상태의 종합적인 평가에 사용하였다. 일반적으로 풍력발전기 타워의 진동은 수Hz 아래의 저주파수 진동이 지배한다. 따라서 진동 측정에는 저주파수대역의 감도가 우수한 집적 칩 가속도계(integrated chip accelerometer-ADXL105, Analog Devices사)<sup>(7)</sup>를 사용하였다. 타워의 횡진동

응답을 구하기 위해서 2개의 가속도계를 Fig. 4의 타워 11.7m 높이에 x,y 방향으로 각각 부착하였다. 10 Hz 이내의 주파수 성분을 확인하기 위하여, 20 Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하였고, 매 100초 길이의 신호에 대하여 Matlab을 사용하여 푸리에 변환(Fourier transform)시켰다. 풍속과 풍향은 1 Hz로 샘플링하여, 100초 구간의 평균치로 진동과의 관계를 검토하였다. 회전속도는 광센서(한영전자, PG-TR, GR 6210-2)를 사용하여 브레이크 디스크 회전수를 매초 단위로 측정된 후, LabVIEW 내에서 로터 회전과 브레이크 디스크의 회전 비(1:10.1)을 고려하여 결정하였다.

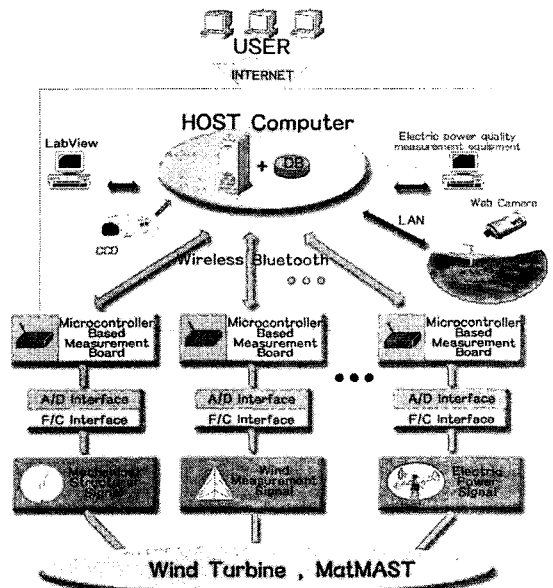


Fig.3 Integrated monitoring system

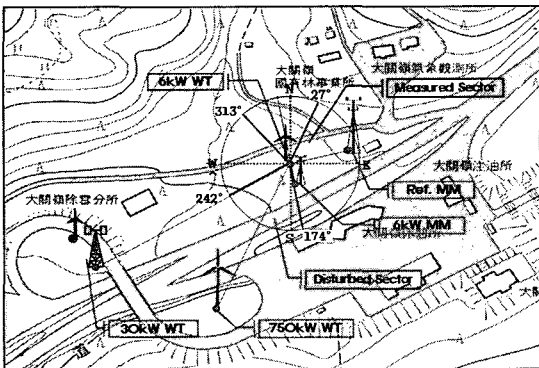


Fig. 2 Daegwanryung test site

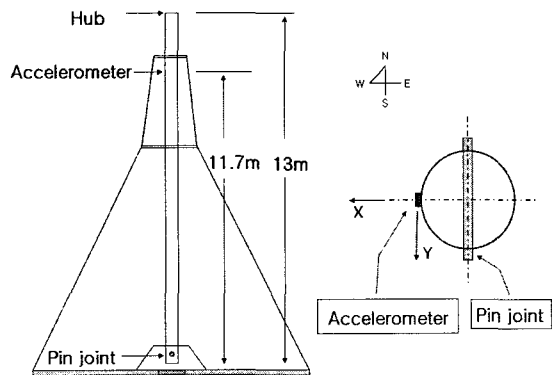


Fig. 4 Acceleration measurement set up

#### 4. 모니터링 결과

##### 4.1 진동측정 결과

Fig. 5는 회전속도에 대한  $x, y$  방향의 가속도 스펙트럼을 보인다. Table 1의 사양서상의 운전속도는 80~145 rpm이나, 약간 더 높은 풍속에서도 운전되는 것으로 확인되었다. 모니터링한 진동파형을 주파수 분석한 결과, 타워 상단 발전기 부분의 진동을 지배하는 결정적인 주파수 성분은 1.22 Hz로 확인되었다. Fig. 5는 몇 가지 대표적인 운전속도 하에서의 주파수 분석 결과를 보인다. 1.22 Hz 피크는 운전속도에 무관하게 일관되게 발생하므로 고유진동수 성분으로 추정되었으며, 정지 상태에서 타워-발전기 계를 흔들었을 때, 타워 1차 횡 진동모드의 고유 진동임을 확인할 수 있었다. 이 피크는 저속도에서는 레벨이 낮아 문제가 되지 않으나, 속도에 따라 점차 증가하여 147 rpm 부근에서 최대치에 이르는 것

로 확인되었다. 이때 피크주파수 1.22 Hz는 회전주파수 147 rpm의 1/2차 성분에 일치한다. 결과적으로, 회전주파수의 1/2차 성분이 타워-발전기 구조계의 1차 횡 진동모드를 크게 공진시키는 것을 알 수 있다.

장기간에 걸친 모니터링을 통하여 분석된 회전속도 대비 주파수 스펙트럼을 Fig. 6에 보인다. 전술한 바와 같이, 1.22 Hz 부근에서 일관되게 발생하는 1차 피크가 진동을 지배하고 있다. 피크의 높이는  $x$  축 방향에서 더 큰데, 이는 타워 하단의 핀 축 조건에 기인한다. Fig. 4에서와 같이 타워 하단은 핀 축 주위로 회전이 가능하다. 따라서 케이블만에 의하여 억제되는  $x$  축 방향 성분이 핀 축에 의해서도 억제되는  $y$  방향 성분보다 크다<sup>(8)</sup>. 한편, 운전속도 범위에서 회전불평형에 의한 회전수 성분은 상대적으로 매우 작은 것으로 관찰되므로, 발전기의 회전불평형은 크지 않은 것으로 판단된다. 이와 같은 소형 풍력발전기의 진동은 중대형 풍력발전기의 진동과는 차이가

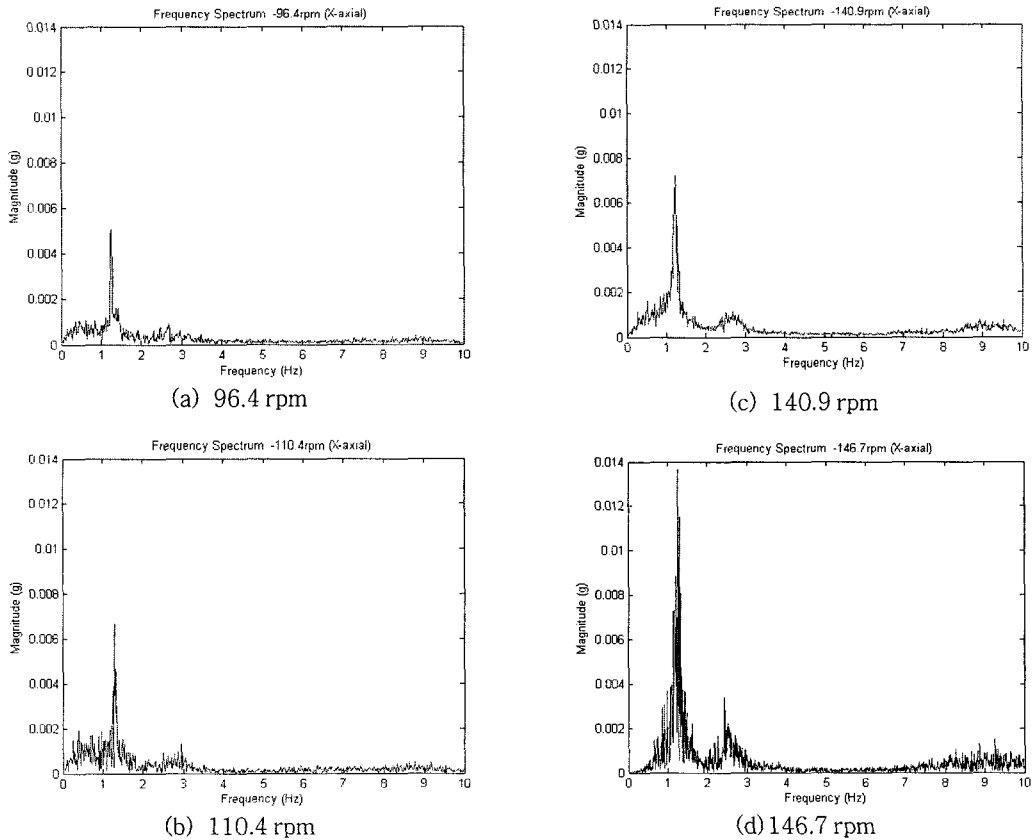
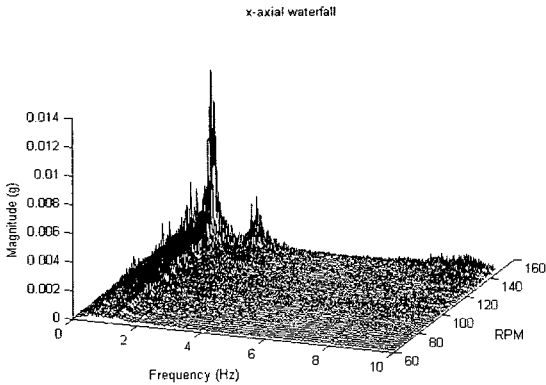


Fig. 5 Vibration spectrum under operation

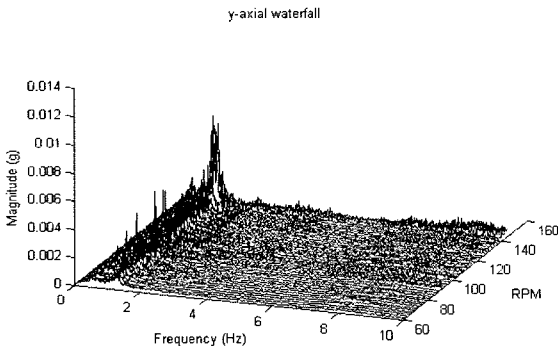
있다. 허브가 지상 수십 미터 높이에 위치하는 중대형 발전기의 경우, 높이에 따른 풍속 증가로 날개 위치에 따라 추진력이 주기적으로 변한다. 그 결과 날개통과 주파수 성분이 주요 가진 성분으로 작

용한다<sup>(4,9)</sup>. 그러나 소형의 경우 날개 높이에 따른 풍속 차이는 작으므로, 날개 위치에 따른 토크 변동도 작다. 또한 이 연구모델과 같이 4날개형의 경우, 정격 회전수의 4차 가진 성분은 타워 1차 고유진동수보다 현저히 높은 대역이다. 따라서 풍 하중 변동의 주기성에 의한 공진 위험성은 낮다. 많은 경우 회전수의 1/2차 가진 성분은 로터 회전축계에 헐거운 요소(looseness)가 존재할 때 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>(10)</sup>. 따라서 1/2차 성분의 제거를 위하여 회전축계의 조립상태를 재점검할 필요가 있다.

발전기의 로터 회전속도는 풍속에 따른다. Fig. 7의 풍속-회전속도 측정 결과는 풍속 10 m/s 이상에서 정격운전 상태를 보인다. 그림에서 데이터 한 개(\*표시점)는 100초 동안의 평균 풍속과 회전 속도를 표시한다. 정격 풍속 10 m/s에서 140 rpm, 이후 풍속에 따라 회전속도는 약간 증가하여 16 m/s에서 147 rpm 정도로 회전한다. 그러나 모니터링 결과, 운전 범위 상단을 넘어서도 운전되는 경우가 빈번히 관찰되었다. 정격 운전 상태에서 발생하는 높은 레벨의 진동은 발전기 구조의 안전성에 불리하게 작용하며, 출력 성능에도 부정적인 영향을 줄 가능성이 있다.



(a) x-axis



(b) y-axis

Fig. 6 Water fall plot of W/T vibration

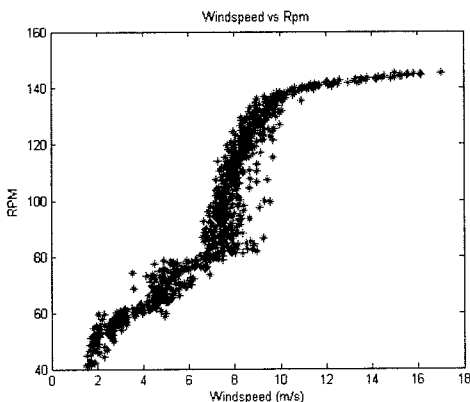


Fig. 7 Wind speed and rotor speed

#### 4.2 진동과 출력 성능 관계

과도한 진동이 출력성능에 미치는 영향을 보기 위하여 제작업체에서 제공하는 출력 성능곡선(INVENTUS 제공)과 실증단지에서 측정한 결과를 Fig. 8에서 비교 검토한다. 두 출력 곡선은 모두 IEC 국제기준에 의거하여, 풍속 1 m/s 간격의 빈(Bin)을 사용하는 표준 자료군(normalized data set)에 대하여 빈 방법(method of bin)을 적용하여 구하게 된다<sup>(11)</sup>. 각 풍속 빈에 대하여 표준화된 풍속과 10분간의 풍력발전기 출력 평균값(mean value)은 다음의 식으로 결정된다.

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

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

$V_i$  : 빈  $i$ 의 표준 평균풍속

$V_{n,i,j}$  : 빈  $i$ 에서 데이터군  $j$ 의 표준풍속

$P_i$  : 빈  $i$ 에서의 표준 평균출력

$P_{n,i,j}$  : 빈  $i$ 에서 데이터군  $j$ 의 표준출력  
 $N_i$  : 빈  $i$ 에서 10분 데이터군의 수

Fig. 8에서 각 점은 10분간의 데이터를 사용하여 전술한 방식으로 산출된 출력 평균값이다. 풍속 10 m/s 이상에서 두 측정치는 정격출력을 보이는데, 실증단지에서 측정된 정격출력 평균치는 INVENTUS 사의 정격출력 6kW에 비해서 0.6~0.7kW 정도 작게 나온다. 정격속도 아래에서는 제작업체 제공치와 실증단지 측정치 사이의 차이가 작으나, 정격 운전 범위로 가면서 그 차이는 다소 벌어진다. 통상적으로 실증단지의 지형 차이에 의한 풍향의 변화나 난류 강도의 차이가 출력 측정에 영향을 주게 되나, 두 곡선은 정격운전 범위에서 그 차이가 더 커지고 있다. 제작업체의 출력 성능 인증 취득 과정에서 과도한 진동을 허용치 않는 점을 고려할 때, 이 연구에서 관찰되는 과도한 진동이 출력 성능을 저하시킬 가능성을 배제할 수 없다. 정격운전 범위에서의 과도한 진동은 난류 강도를 높여 회전 날개의 추진력과 출력 성능에 악영향을 줄 수 있다. 이 연구에서 그 메커니즘에 대한 상세한 규명까지는 어려우나, 추후 날개의 진동과 추진력 사이의 관계는 공기역학적인 해석을 통하여 규명되어야 할 중요한 현안임을 강조하고자 한다.

풍력발전기의 최종 발전용량은 이러한 출력성능에 풍속 자원이 합쳐져서 결정된다. 2004년 1년간 대관령 실증단지에서 측정된<sup>(7)</sup> 풍속의 분포를 Fig. 9에 보인다. 진동 측면에서 문제가 되는 점은 거의 모든

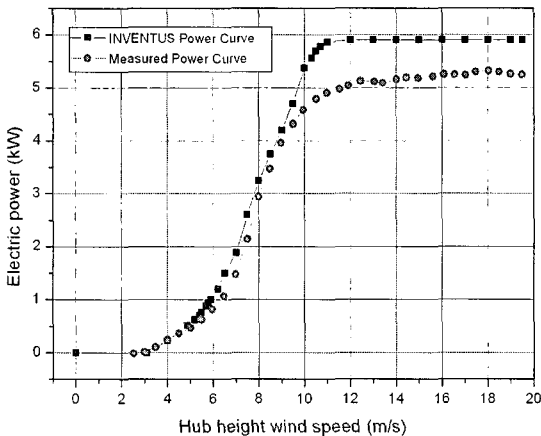
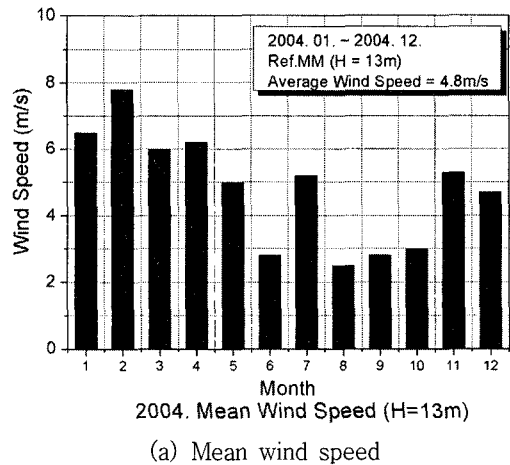
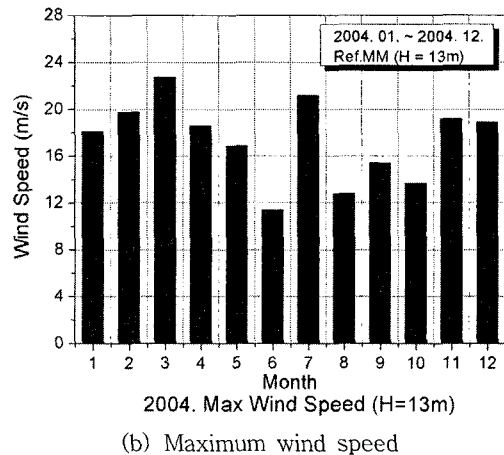


Fig.8 Comparison of power performance

달에서 최대 풍속이 12 m/s를 상회하는 것으로 나오는 점이다. 이러한 풍속 환경은 Fig. 7을 고려할 때, 정격운전 속도 범위의 상단에서 공진이 빈번히 발생할 수 있음을 의미하므로 향후 국산화 개발시에 대한 대책이 매우 중요하다. 연간 풍속-회전수 데이터를 검토한 결과, 대관령 실증단지에서 이 모델의 로터의 회전 속도는 160 rpm을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 160 rpm의 1/2차 성분은 1.33 Hz 이므로, 타워 1차 횡 진동 고유진동수를 이보다 높은 범위로 위치시킬 필요가 있다. 이제까지 고찰한 바와 같이, 타워-케이블 계의 진동은 블레이드, 타워 및 발전기 부품의 내구성 측면과 출력 성능 모두의 측면에서 풍력발전기의 중요한 성능 인자가 된다. 구조계의 고유진동수 위치와 정격운전 범위는 풍속 조건과 출력 성능을 고려하여 종합적으로 설계되어야



(a) Mean wind speed



(b) Maximum wind speed

Fig. 9 Wind resources at the test site

한다. 또한 설치 과정에서 케이블의 장력 조건은 고유 진동수에 직접적으로 영향을 주는 요인이므로 세심한 주의를 요한다. 동시에 타워에 발전기 부품 및 블레이드를 조립할 때 헐거움에 의한 1/2차 가진 성분의 발생 가능성을 차단하는 것도 필요하다.

## 5. 결 론

6 kW급 독립형 풍력발전기(INVENTUS 6)를 대상으로 풍속, 전기 출력 성능 및 진동을 종합적으로 평가하는 통합 모니터링 시스템을 구축하고, 진동 모니터링 및 출력 성능 평가를 수행하였다.

타워 상단부에서 1.22 Hz의 타워 1차 횡진동 모드에 의한 피크가 운전속도 범위에서 일관되게 발생하였다. 그 레벨은 풍속 및 회전수 증가에 따라 계속 증가하였고, 147 rpm 부근에서 회전수의 1/2차 성분에 의하여 공진되면서 최대 레벨을 보였다. 출력 성능은 진동 레벨이 낮은 저속에서는 제작업체의 제공치에 근접하였으나, 진동이 심한 10 m/s 이상의 풍속에서는 정격 출력이 0.7 kW 정도 낮게 나왔다. 정격운전 범위에서의 큰 진동이 출력 성능에 불리하게 작용할 가능성이 있으며, 향후 그 메커니즘에 대한 이론적 규명이 필요하다.

실증단지가 위치한 강원도 내륙 산간지역에서의 연간 풍속은 월별로 최대풍속이 12 m/s 이상으로, 이 연구 모델의 정격 속도 상단에서 타워 1차 횡진동 고유진동수의 공진이 빈번히 발생할 가능성이 있다. 타워-케이블계의 진동수 설계시, 연간 풍속 환경을 고려하여 출력 성능과의 종합적인 검토가 필요하다.

## 후 기

이 연구는 산자부와 (주)준마엔지니어링의 지원으로 수행된 '6 kW 소형 풍력발전기 실증연구' 사업의 일환이며, 모니터링을 지원한 강원대학교 풍력발전

시스템연구센터 관계자들에게 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- (1) G8 Renewable Energy Task Force, 2001, Wind Force 12, European Wind Energy Association and Green Peace.
- (2) <http://www.unison.co.kr>
- (3) Yoo, N., 2003, "Field Test and Evaluation of 6 kW Small Wind Turbine", MOCIE Research Report, 2003-N-WD11-P-02.
- (4) Hau, E., 2000, Wind Turbines, Springer Verlag.
- (5) Nam, Y., Kim, H., Yoo, N. and Lee, J., 2003, "Development of a Wind Turbine Monitoring System Using LabVIEW", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 92~98.
- (6) Yoo, N., 2004, "Field Test and Evaluation of 750 kW Wind Turbine", MOCIE Research Report, 2001-N-WD11-P-11.
- (7) Analog Devices, 1999, ADXL105, Analog Devices, Inc.
- (8) Park, M. Y. and Kim, S. H., 2006, "Vibration Analysis of the Wind Turbine Tower Structure Supported by Cables", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, KSNVE06S-26-080.
- (9) Kim, S. H., Nam, Y. S. and Eun, S., 2005, "Vibration Characteristics of the Tower Structure of a 750 kW Wind Turbine Generator", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 219~224.
- (10) Work, V., 1991, Machinery Vibration, McGraw-Hill, Inc.
- (11) IEC, 1998, "Wind Turbine Generator Systems. Part 12 : Wind Turbine Power Performance Testing", IEC 61400-12, 1st Ed.