

6kW 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 분석

Vibration Monitoring and Analysis of a 6kW Wind Stand Alone Turbine Generator

김 석 현* 남 윤 수** 유 능 수*
Kim, Seock-Hyun Nam, Yoon-Su Yoo, Neung-Soo
이 정 완*** 박 무 열**** 박 해 균**** 김 태 형****
Lee, Jeong-Wan Park, Mu-Yeol Park, Hae-Gyun Kim, Tae-Hyeong

Abstract

A vibration monitoring system for a small class of wind turbine (W/T) is established and operated. The monitoring system consists of monolithic integrated chip accelerometer for vibration monitoring, anemometers for wind data acquisition and auxiliary sensors for atmospheric data. Using the monitoring system, vibration response of a 6kW W/T generator is investigated. Acceleration data of the W/T tower under various operation condition is acquired in real time using LabVIEW and is remotely transferred from the test site to the laboratory in school by internet. Vibration state of the tower structure is diagnosed within the operating speed range. Resonance frequency range of the test model is investigated with the wind speed data of the test site.

키워드 : 원격 진동 모니터링 시스템, 6kW 풍력발전기, 구조 공진

Keywords : *Remote Vibration Monitoring System, 6kW Wind Turbine Generator, Structural Resonance*

1. 서론

화석 연료 사용 증가에 따른 환경 문제의 심각성과 최근의 석유가의 불안정 때문에 연료전지, 태양광, 바이오메스, 조력, 풍력 등 다양한 대체에너지의 개발에 국가적 관심이 고조되고 있다. 특히 강원도의 경우, 태백준령을 중심으로 풍부한 풍력자원을 확보하고 있는 것으로 확인됨에 따라 청정 대체 에너지원으로서의 풍력발전에 대한 투자 및 연구가 활발히 이루어지고 있다. 서구의 경우, 독일을 선두로 미국, 스페인, 덴마크 등이 풍력 발전 산업을 주도하면서, 1996년 이후 세계 풍력 시장의 최

근 연평균 성장률은 무려 40%에 이르고 있다[1]. 선진국에 비하여 국내 풍력 시장은 아직 미미한 수준이나, 대체에너지 보급에 대한 정부, 민간업체 및 연구기관간의 적극적인 협조로 현재 750kW급의 개발이 거의 완료되었고, 2MW급 대형 발전기가 개발 중이다[2]. 이와 함께 독립형으로 사용되는 6kW, 10kW급 등의 소형 풍력발전기에 대한 개발도 이루어지고 있다. 그러나 최근에는 소형 및 중/대형 급의 국산화 개발이 진행된 관계로, 발전 성능이나 구조 안전성 및 전력품질 등에 대한 체계적인 연구는 미흡한 상황이다. 한국의 자연환경 하에서 발전기의 성능을 종합적으로 평가하기 위하여, 최근 강원대학교 풍력실증연구센터 주관으로 '대관령 풍력실증연구단지'가 조성되었으며, 풍력발전기의 성능을 종합적으로 실증할 수 있는 시스템을 구축하고 있다. 풍력발전기의 실증에 관련하여 구조 진동 문제는 발전기의 구조 안전성뿐만 아니라 발전 성능에 관련해서 중요한 현안이 된다[3, 4]. 이에 관련하여 Negm 과 Maalawi는 안정성을 고려한

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사
** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 부교수, 공학박사
*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 조교수, 공학박사
**** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 석사과정

타워 구조의 최적 설계 방법을 제시한 바 있으며 [5], Koss 와 Melbourne는 제작 후의 공진 대책을 제시하였다[6].

국내에서는 처음으로 750kW 급 풍력발전기의 진동 모니터링이 수행된 바 있다[7, 8]. 본 연구에서는 실증연구단지내에 구축된 독립형 소형 풍력발전기용 진동 모니터링 시스템을 소개하고 모니터링 된 진동 데이터를 분석하여 시험 모델의 진동 상태를 진단한다. 진동 모니터링 시스템의 원활한 가동 여부를 확인하고, 추후 국산화 개발되는 유사 모델의 구조 설계에 유용한 정보를 제공하는 것이 본 연구의 목적이다.



Fig. 2 Blade damper with 4 bars.

2. 소형 풍력발전기 제원

본 연구에서는 국산화 개발에 앞서 시험 모델로 독일 INVENTUS사의 INVENTUS 6 Stand-Alone-Version을 선정하였다. Fig. 1은 연구용 풍력발전기이며 Table 1은 그 제원이다. 지반의 앵커에 편지된 13m 높이의 튜브형 타워 상단에 4-날개 축에 동기 발전기(synchronous generator)가 장착된다. 발전기 타워 구조는 Fig. 1에서와 같이 4개의 2단 가이 케이블(guy cables)로 지지되며, 각각의 강선의 체결력을 쉽게 조정할 수 있도록 되어있다. 또한 본 연구모델의 특이한 구조로, Fig. 2에서와 같이 날개 댐퍼를 이용하여 날개의 진동을 억제하고 있다. 날개를 개별적으로 지지하는 4개의 막대는 날개 앞쪽 회전축 상에 모아져 댐퍼의 축 방향 운동을 유발시킨다. 이는 날개의 과도한 굽힘 진동 성분을 억제하는 효과를 댐퍼 동시에, 상단에서 타워를 횡 방향으로 가진하게 된다. 구조용 강관으로 제작된 타워는 기초부에서 편으로 체결되어 있으므로, 강선을 감아줌으로써 타워를 쉽게 세우거나 내릴 수 있다.

Table 1 Specification of 6kW W/T

model	INVENTUS 6
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



Fig. 1 6kW W/T test model.

3. 진동 모니터링

3.1 모니터링 시스템의 구성

장기간 풍력발전기의 각종 성능 데이터를 취득하기 위하여, 대관령 풍력실증연구단지내에 실시간 종합 모니터링 시스템이 구축된 바 있다[9]. 발전기의 진동 상태를 진단하기 위해서는 진동 신호뿐만 아니라 풍속, 풍향, 압력, 온도 및 회전속도를 함께 모니터링 하는 것이 요구된다. 따라서 진동 모니터링 시스템은 진동센서 및 풍향 센서를 연구단지의 원격 모니터링 시스템에 연결하여 구성된다. Fig. 3은 모니터링 시스템의 구성도이다. 모니터링 시스템의 기본 제어장치는 NI(national instruments)사의 산업용 PC인 NI-8176이다. 이 내장형 제어기

에 두 개의 이미지 처리 보드와 두 개의 다기능 입출력(MIO: multifunction input output) 보드 PXI6040E가 PXI 슬롯으로 결합되어 있다. 풍속계 신호를 제외한 다른 신호들은 일반적인 아날로그 신호들이다. 풍속계 출력 신호에서 주파수 정보를 정확하게 얻기 위해서는 매우 빠른 신호 샘플링이 요구된다. 풍속계 출력 신호들은 PXI6040E 보드를 통하여 5kHz로, 나머지 신호들은 1 Hz로 샘플링 되어 PC(NI-8176)로 입력된다. 전술한 풍향계, 압력계, 온도계, 가속도계 출력은 32채널 아날로그 입력보드인 SCXI 1102B를 통하여 내장형 제어기인 PC로 입력된다. 한편, LabVIEW 모니터링 시스템은 멀리 떨어진 PC와 인터넷을 통하여 정보교환이 가능하므로, 대학 내의 실험실에서 대관령실증단지 발전기의 진동 신호를 실시간으로 받을 수가 있다. 즉, 산업용 PC NI-8176의 하드 디스크에 수록된 계측 데이터 파일은 인터넷으로 원격 전송되어, 중앙 컴퓨터의 MATLAB을 이용하여 성능해석, 또는 상태 진단 등에 사용된다. 모니터링 시스템에 대한 LabVIEW 블록선도가 Fig. 4에 도시되어 있다. 이 S/W는 연결된 모든 센서들의 출력신호를 1 Hz 단위로 샘플링 하여 하드 디스크 파일에 저장한다.

3.2 진동 측정 방법

진동은 일체식 IC칩 가속도계(ADXL105, Analog Devices 사)를 Fig. 5와 같이 타워 상 11.7m 높이에 설치하여 측정한다. 수평방향의 횡진동 크기를 산정하기 위해서는 수평면상에서 수직하는 두 방향의 진동 성분이 요구된다. 본 연구 모델은 타워 하단부에서 핀 조인트의 경계 조건을 가지므로 핀 축 주위로의 회전 운동은 전적으로 가이 케이블의 체결 강도가 타워 횡진동의 고유진동수를 결정하게 되며, 정격 속도와 관련하여 그 체결력의 조정은 매우 중요한 현안이 된다. 이러한 상황을 고려하여 가속도 측정 축을 Fig. 5의 X,Y 두 방향으로 잡았다. Fig. 5에서 핀 축 주위로의 회전 운동이 가능하므로 X방향 진동 성분이 보다 크게 나올 것으로 예상된다. 20Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하였고, 매 100초 구간의 신호에 대하여 Matlab을 사용하여 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행하였다. 풍속과 풍향은 1Hz로 샘플링 하여 매 100초 구간의 평균치를 취하였다. 풍속계(NRG 40)는 바람의 세기에 비례하는 주파수를 출력시키고, 이는 LabVIEW 내에서 풍속으로 변환된다. 풍속 측정 위치는 타워 남쪽 11m에 풍향 계측타워(meteorological mast)를 설치하고 13m 높이에

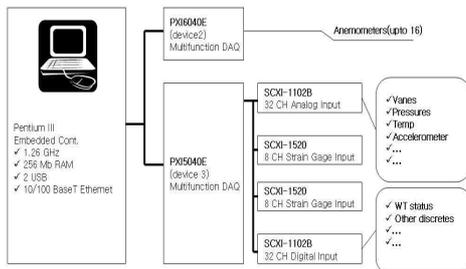


Fig. 3 Block diagram of the acceleration and wind condition measurement.

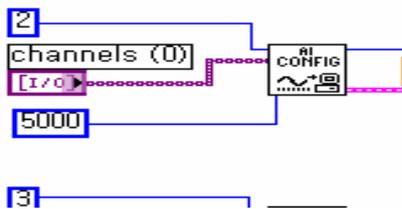
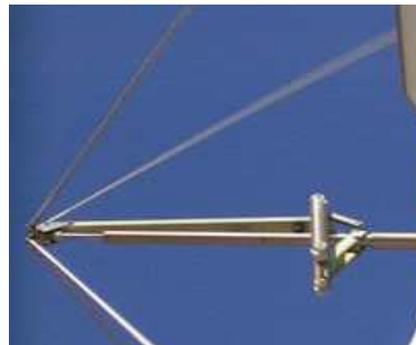


Fig. 4 LabVIEW block diagram window.

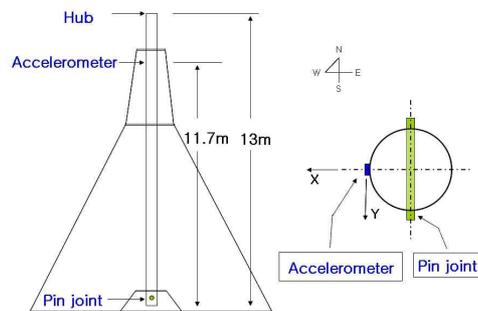


Fig. 5 Acceleration measurement set up.

서의 풍속을 측정하였다. 회전 속도 측정을 위해서는 광센서(한영전자, PG-TR, GR 6210-2)로 브레이크 디스크 1회전 당 4개의 펄스를 매초 측정 한 후, LabVIEW내에서 로타 회전과 브레이크 디스크의 회전 비율(1: 10.1)을 고려하여 결정하였다.

4. 모니터링 결과

Fig. 6 ~ Fig. 9는 로타 작업 속도 범위에서 측정된 X 축 방향 가속도 신호와 그 주파수 스펙트럼을 보인다. 회전수에 관계없이 1.2Hz~1.3Hz 부근의 피크 주파수 성분이 관찰된다. 피크의 레벨은 다르나 주파수 값이 회전속도의 조화 성분과 관계없이 일정하게 유지되고 있는 점으로 보아 구조계의 고유진동수가 발생되는 것으로 볼 수 있다. 고유진동수임을 확인하기 위하여 정지 상태에서 발전기를 흔들었을 때도 동일한 주파수 성분이 진동을 지배하는 것으로 확인되었다. 피크 주파수 값이 1.2Hz~1.3Hz의 범위에서 미세하게 변하는 이유는 타워 구조의 지지 조건이 정확하게 축대칭이 아닌 데 기인한다. 즉, 편 축이 존재하는 상태이고, 4개의 가이 케이블의 장력에도 차이가 있으므로 미세한 진동수 차이를 갖는 횡 진동 모드상이 발생된다. 정격속도 부근인 Fig. 8과 Fig. 9에서 진동은 2개의 피크 성분에 의하여 지배되는 것을 볼 수 있다. 특히 1차 피크는 147rpm부근에서 매우 크게 발생되는데, 147rpm에서는 회전주파수의 1/2 성분(1.22Hz)이 타워계의 고유진동수에 근접한다. 결과적으로 회전수의 1/2성분이 타워-가이 케이블 구조계의 고유진동수를 공진시키는 것으로 볼 수 있다. 통상적으로 회전주파수나 그 조화성분이 가진력으로 작용하나, 회전수 1/2 주파수 성분이 가진 성분이 되는 점이 흥미롭다. 연구 모델이 가지고 있는 회전축과 날개 댐퍼의 연성기구에 기인하는 것으로 보이며, 그 규명을 위해서는 날개 댐퍼 기구에 대한 동역학적 검토가 필요할 것이다. 한편, 1.22Hz의 회전 주파수를 갖는 73rpm에서는 진동이 크지 않은데, 이는 로타-블레이드 시스템의 기계적 평형 상태가 좋아 회전 주파수가 큰 가진 성분이 되지 않고 있음을 의미한다. 또한, 중대형 풍력발전기의 주 가진 성분인 날개 통과 주파수(blade passing frequency)가 1.22Hz로 되는 회전속도는 18rpm이 되는데, 여기서는 작업속도 범위 훨씬 아래에 있으므로 문제가 되지 않는다. Fig. 8과 Fig. 9에서 보이는 2차 피크의 주파수는 2.40Hz인데, 이는 Fig. 10에 보이는 바와 같이 가이 케이블의 1차 고유진동수(2.37Hz)에 근접한다. 결국, Fig. 8과 Fig. 9의 2차 공진 피크는 142rpm 이후 회전수 성분이 가이 케이블의 1차 고유진동수를 공진시켜 발생하는 것임을 알 수 있다.

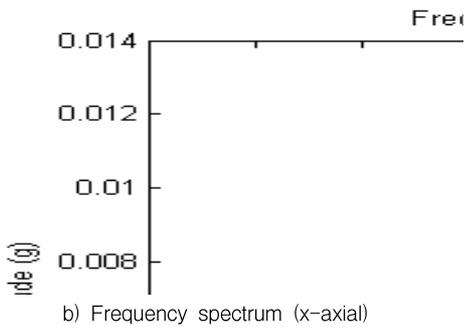
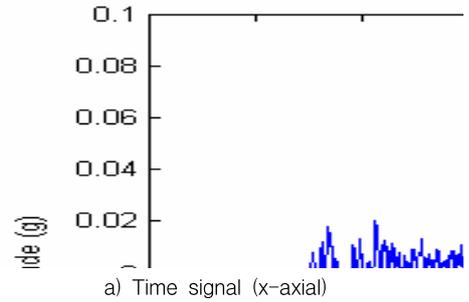


Fig. 6 Vibration at 73rpm

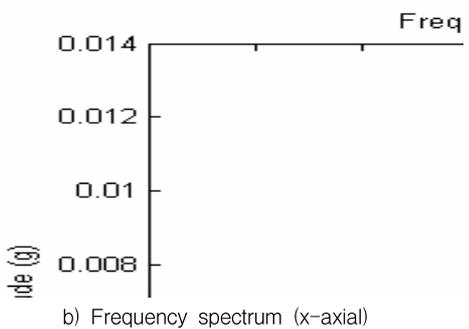
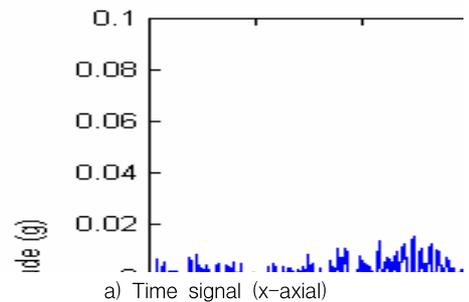
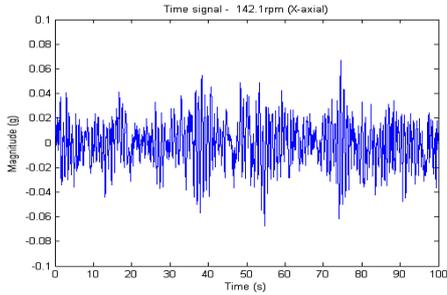
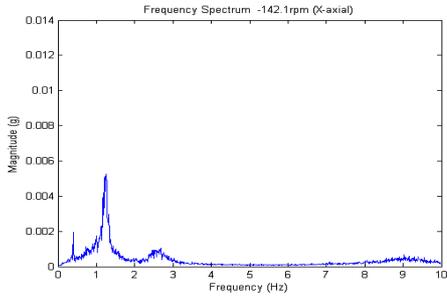


Fig. 7 Vibration at 93rpm

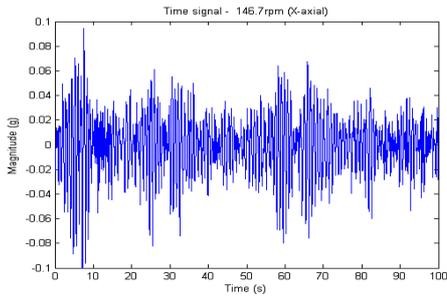


a) Time signal (x-axis)

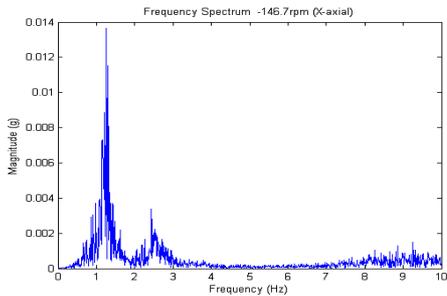


b) Frequency spectrum (x-axis)

Fig. 8 Vibration at 142rpm



a) Time signal (x-axis)



b) Frequency spectrum (x-axis)

Fig. 9 Vibration at 146.7rpm

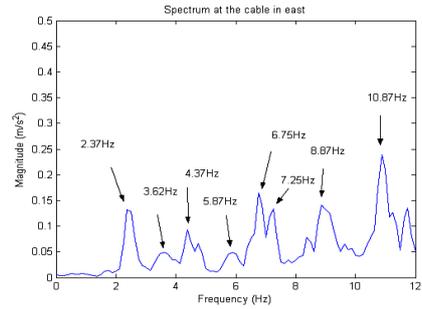
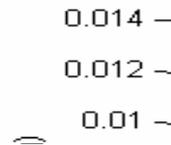
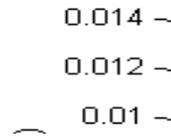


Fig. 10 Vibration of the guy cable.

Fig. 11은 X,Y 방향의 가속도 스펙트럼을 회전 속도별로 그린 결과이다. 1.2Hz~1.3Hz 부근에서 지배적인 피크 성분이 관찰된다. 앞에서 언급하였듯이 타워는 편축 주위로 회전이 가능하므로 X축 방향으로 더 큰 진동이 발생하고 있다. 147rpm에 접근하면서 진동레벨은 급격히 증가한다. 제품 사양상의 정격 속도 범위가 80rpm~145rpm으로 나와 있으나, 시험 결과 147rpm에서도 작업하면서 높은 진동을 보이는 것은 문제가 된다.



a) waterfall (x-axis)



b) waterfall (y-axis)

Fig. 11 Water fall plot of W/T vibration.

진동은 회전수의 조화성분에 의하여 가진되므로 진동레벨은 회전속도에 관계된다. 그러나 회전속도는 결국 풍속과 관련되므로, 구조 안전성과 풍력에너지의 효율적인 사용을 위해서 공진대역의 범위를 풍속과 연관시켜 고찰할 필요가 있다. Fig. 12는 가속도와 함께 측정된 풍속-회전속도 관계를 보인다. 그림에서 데이터 한 개(*표시점)는 100초 동안의 평균 풍속과 회전속도를 의미한다. 정격 풍속 10m/s 이후 140rpm~150rpm의 속도로 작업한다. 본 시험 모델의 경우, 풍속 16m/s에 이르면 작업속도가 147rpm 정도로 되고 이 부근에서는 구조계의 공진으로 진동이 매우 높게 나온다. 이 공진대역은 정격 작업 속도의 상단에 해당된다. 일반적으로 풍력발전기가 정격 풍속 하에서 발전기의 성능이 극대화 되도록 설계되어 있다. 제품 사양에 작업 속도 범위는 80rpm~145rpm 으로 되어 있으나 이 범위를 약간만 초과해서 작업해도 심한 공진이 발생한다. 본 연구 모델에서는 날개 댐퍼를 사용하여 타워-케이블계의 공진으로 날개가 심하게 진동하는 것을 방지하는 것으로 보인다. 그러나 공진 시 타워 상단의 발전기는 심한 진동을 피할 수 없다. Fig. 12에서 연구대상 발전기는 150rpm 이상으로 작업할 가능성은 낮아 보인다. 따라서 가이 케이블의 장력을 높여 타워계의 고유진동수를 1.25Hz 이상으로 올린다면 공진대역은 150rpm 이상으로 높아져 안전성에 도움이 될 것이다.

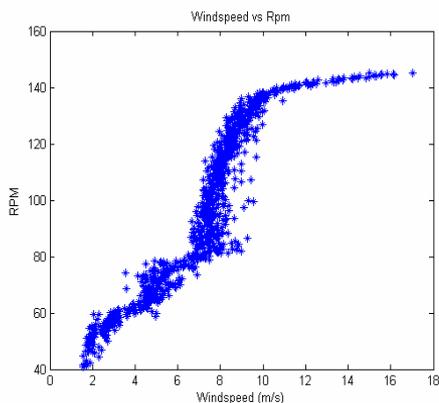


Fig. 12 Wind speed and rotor speed.

6. 결론 및 토론

대관령 풍력실증연구단지 6kW급 독립형 풍력발전기(INVENTUS 6)의 진동을 모니터링 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 로타의 회전속도에 무관하게 1.2Hz~1.3Hz의 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.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 지원으로 수행된 '6kW 소형 풍력발전기 실증연구' 사업의 일환이며, 관계자에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Wind Force 12, European Wind Energy Association and Green Peace.
- [2] <http://www.unison.co.kr>
- [3] T.Burton, 2002, *Wind Energy Hand Book*, John Wiley and Sons, Ltd.
- [4] E.Hau, 2000, *Wind Turbines*, Springer Verlag.
- [5] H.M.Negm and K.Y.Maalawi, 2000, "Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers", *Computers and Structures*, Vol. 74, pp. 649-666.
- [6] L.L.Koss and W.H. Melbourne, 1995, "Chain Dampers for Control of Wind-induced Vibration of Tower and Master Structures", *Engineering Structures*, Vol.17 (9), pp. 622-625.
- [7] S.H.Kim, Y.S.Nam, N.S.Yoo, 2004, "Vibration Analysis of the Tower Structure of a Wind Turbine Generator", *Proceedings of the 3rd World Wind Energy Conference*, WWEA.
- [8] 김석현, 남윤수, 은성용, 2005, "750kW 풍력발전기 타워 구조의 진동 특성", *한국소음진동공학회 논문집 제25권 제5호*.
- [9] 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, 2003, "LabVIEW를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발", *한국정밀공학회 논문집 제 20권 5호*, pp. 92-97.