

1kW 소형 풍력발전기의 진동 모니터링

김 석현¹⁾, 남 윤수²⁾, 유 능수³⁾, 김 윤호⁴⁾

Vibration Monitoring of a 1kW Small Wind Turbine Generator

Seockhyun Kim, Y.S. Nam, N.S. Yoo, Yunho Kim

Key words : 원격 진동 모니터링 시스템(Remote Vibration Monitoring System), 1kW 독립형 풍력발전기 (1kW Stand Alone Wind Turbine Generator), 타워 공진(Tower Resonance)

Abstract : A vibration monitoring is performed on a 1kW class stand alone wind turbine(W/T). When a W/T model is developed, general performance under various wind condition should be verified to introduce the product in the market. Especially, vibration characteristics within operating speed range are very important in the aspect of structural stability as well as generator's electrical efficiency. This paper examines the vibration performance of a home made 1kW W/T. Various data of the W/T model are acquired in real time using a remote vibration monitoring system installed in Daekwanryung test site. Vibration stability of the W/T structure is diagnosed based upon the data and the result is used to estimate the applicability of the W/T model.

1. 서론

최근 강원도에서는 태백준령 일대에 분포하는 풍부한 풍력자원을 효과적으로 활용하는 방안에 대한 관심이 고조되고 있다. 대체에너지 보급에 대한 중앙정부, 지자체, 민간업체 및 연구기관 간의 적극적인 협조로 현재 750kW급 풍력발전기의 개발이 완료되어 대관령실증연구단지에서 실증이 진행 중이고, 독립형으로 사용되는 1kW, 6kW, 10kW급 등 소형 풍력발전기에 대한 실증 연구도 이루어지고 있다. 풍력발전기가 개발되어 시장에 보급되려면 발전 성능에 대한 종합적인 실증 작업이 선행되어야 하고, 제작사는 수요자 요구에 따라 실증 결과를 보고할 의무가 있다. 풍력발전기의 실증에 관련하여 구조 진동 문제는 발전기의 구조 안전성뿐만 아니라 발전 성능에 관련해서 중요한 현안이 된다^(1,2). 그러나 진동 실증에는 풍황 데이터도 함께 요구되므로 종합적인 모니터링이 가능한 실증단지를 필요로 한다.

진동에 관해서 국내에서는 처음으로 750kW 급 풍력발전기의 진동 모니터링이 수행된 바 있으며^(3,4), 1kW 및 6kW급 소형 풍력발전기

에 대한 성능검사 및 실증⁽⁵⁾이 수행되었다. 본 연구에서는 벽지의 가구용 1kW 소형 풍력발전기를 대상으로 진동 성능 검사 결과를 분석하여 작업 범위 내에서의 안전성에 문제가 없는지, 진동이 발전 효율에 미치는 악영향이 없는지를 평가한다. 연구 결과는 추후 유사 모델의 국산화 개발 시 효과적인 구조진동 설계를 하는데 활용될 것이다.

2. 풍력발전기 제원

Fig. 1은 오로라(주)에서 시제품으로 개발한 1kW 급 풍력발전기로 그 제원은 Table 1과 같다.

-
- 1) 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 교수
E-mail : seock@kangwon.ac.kr
Tel : (033)250-6372 Fax : (033)257-4190
 - 2) 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 교수
E-mail : nys@kangwon.ac.kr
Tel : (033)250-6376 Fax : (033)257-4190
 - 3) 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 교수
E-mail : yooneso@kangwon.ac.kr
Tel : (033)250-6371 Fax : (033)257-4190
 - 4) 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 석사과정
E-mail : yh6452@kangwon.ac.kr
Tel : (033)252-2595 Fax : (033)257-4190

하단이 지면 앵커상에 편지되된 강관 타워는 상부 및 중간 2개 지점에 각각 4개의 가이 케이블로 지지되고 상단에 4-날개 동기 발전기(synchronous generator)가 장착되는데, 1인이 케이블의 장력을 조정하면서 쉽게 설치할 수 있다.

3. 진동 모니터링

3.1 모니터링 시스템의 구성

발전기의 진동 성능을 검사하기 위해서는 진동 신호뿐만 아니라 풍속, 풍향, 압력, 온도 및 회전속도를 함께 모니터링 하는 것이 필요하다. 진동 검사 장치는 진동센서 및 풍향 센서를 대관령 풍력실증단지 1의 원격 모니터링 시스템⁽⁶⁾에 연결하여 구성되었다. Fig. 2는 모니터링 시스템의 구성도이다. 모니터링 시스템의 기본 제어장치로 NI(national instruments)사의 산업용 PC인 NI-8176이 사용되었다. 풍속계 출력 신호들은 PXI6040E 보드를 통하여 5kHz로, 나머지 신호들은 1Hz로 샘플링 되어 PC(NI-8176)로 입력된다. 진술한 풍향계, 압력계, 온도계, 가속도계 출력은 32채널 아날로그 입력보드인 SCXI 1102B를 통하여 제어장치로 입력된다. 대관령 실증단지에서 취득한 실시간 데이터는 LabVIEW를 사용하여 강원대의 실험실에서 모니터링 된다. 이후 MATLAB을 이용하여 주파수분석과 상태 진단에 사용된다.

3.2 진동 모니터링 방법

작업 상태에서의 가속도 측정을 위해서 Fig. 3에서와 같이 일체식 IC칩 가속도계 ADXL105 (Analog Devices)를 타워 상 7.2m 높이에 설치하였다. 타워의 횡진동 크기를 구하기 위해서 수평면상에서 수직하는 두 방향의 진동을 측정하였다. 시제품은 타워 하단부에서 핀 조인트의 경계 조건을 가지므로 핀 축 주위의 회전 운동은 가이 케이블이 억제한다.

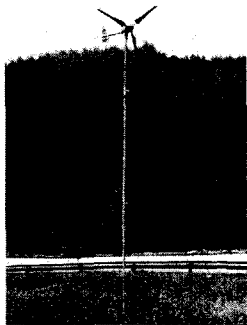


Fig. 1 1kW W/T test model

Table 1 Specification of 1kW W/T

	Specification
model	AU-1000(Aurora)
rated power	1kW
hub height	7.5 m
rotor diameter	2.1 m
number of blades	3
operation speed	0-900 rpm
rated wind speed	10.5 m/s
cut-in wind speed	3 m/s
cut-out wind speed	16 m/s
yawing control	wind vane
weights	rotor blades : 2.04kg nacelle : 18.6kg tower : 47.5kg wire : 0.165kg/m

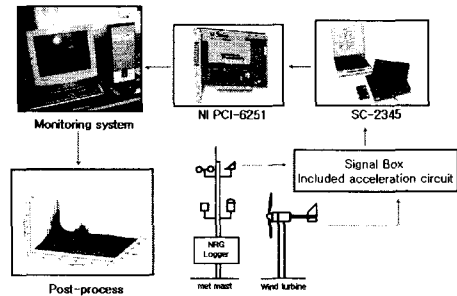


Fig. 2 Block diagram of monitoring and post processing

따라서, 가이 케이블의 장력이 타워 횡진동의 고유진동수를 결정하게 되며, 정격 속도와 관련하여 그 장력의 조정은 매우 중요한 현안이 된다. 이러한 상황을 고려하여 가속도 측정 축을 Fig. 3의 X,Y 두 방향으로 잡았다. Fig. 3에서 X축 방향의 운동 성분은 핀 축 주위로 타워가 회전하는데 기인하므로 장력이 고유진동수를 결정한다. 반면 Y 방향 성분은 하단이 고정되지 되므로 장력과 타워 강성이 고유진동수에 영향을 준다. 20Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하여 100초 구간의 신호에 대한 푸리에 변환을 MATLAB을 사용하여 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. 풍속은 타워 북동 5m에 풍향 계측타워

(meteorological mast)를 설치하고 7.5m 높이에서 측정하였다. 타워 상단부의 동기발전기는 로터 1회전 당 5개의 펄스 전력신호를 출력한다. 초당 펄스를 측정하여 매 100초 구간의 평균회전수를 취하였다.

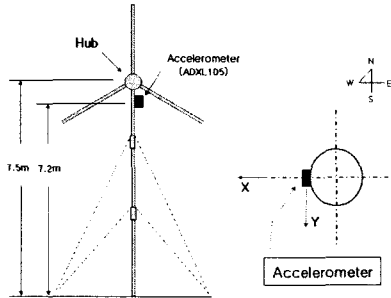


Fig. 3 Vibration measurement position

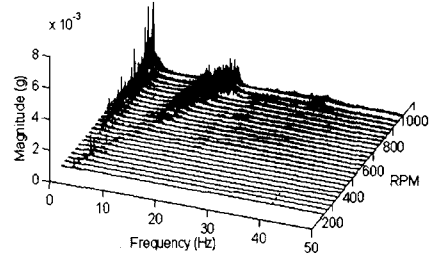
4. 모니터링 결과

Fig. 4는 회전속도별로 취득한 가속도 신호의 주파수 스펙트럼을 3차원적으로 그린 결과이다.

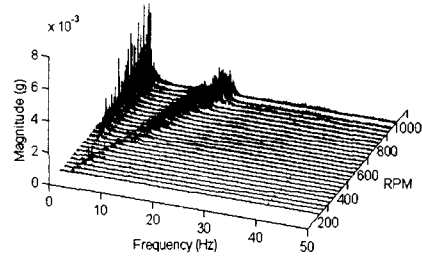
회전수에 무관한 1차 피크 군과 회전속도에 비례해서 증가하는 2차 피크 군을 관찰할 수 있다. 1차 피크 군은 풍속이나 회전속도에 무관하게 2.1Hz에서 일관되게 발생한다. 이는 타워의 횡진동 모드가 동적인 풍하중에 의하여 가진되는데 기인하며, 정지 상태에서 타워를 흔들어서 고유진동수를 확인하였다. Fig. 5는 풍속 10m/s에서의 주파수 응답을 보인다. 1차 피크가 X, Y 방향에서 주파수 차이를 보이지 않는 것은, 하단 지지 조건보다는 케이블 장력이 진동수를 결정함을 의미한다. Fig. 4의 두 번째 피크의 주파수는 풍속에 따라 증가한다. 풍속의 증가는 회전수의 증가를 가져오므로 두 번째 피크는 회전수(rpm)의 1차 조화성분에 해당하는 주파수에서 발생한다. 이는 두 번째 피크 군이 날개 및 발전기의 회전 불평형력에 기인하는 것을 의미한다⁽⁷⁾.

6kW 시제품에 대한 연구에서⁽⁵⁾ 회전수 피크 성분이 거의 발생하지 않았던 점과 비교할 때, 본 시제품은 회전부의 중량이 작음에도 불구하고 평형 상태가 좋지 않은 것으로 보인다. 고유진동수 2.1Hz는 회전속도 126rpm에서 공진된다. Fig. 6의 풍속-회전속도 관계에서 공진 속도는 매우 낮은 속도 영역이고, 풍속 또한 2m/s로 매우 낮다. 결과적으로 고유진동수 2.1Hz에 반응하는 공진대역은 발전 효율 측면에서 별 문제가 되지 않는 범위에 위치한다. 이러한 결과는 Fig. 7의 풍속과 진동레벨 사이의 관계로부터 확인된다. 공진 대역인 2m/s 부근에서 X, Y 두 성분 모두 공진으로 인한 레벨

의 증가를 보인다. 그러나 매우 낮은 풍속 하에서의 공진이므로, 보다 높은 풍속에서의 정상적인 진동 레벨에 비해서도 낮다. 결론적으로 작업범위 하단에서 공진이 발생하나 구조 안전성 차원에서 문제가 되지는 않는다.

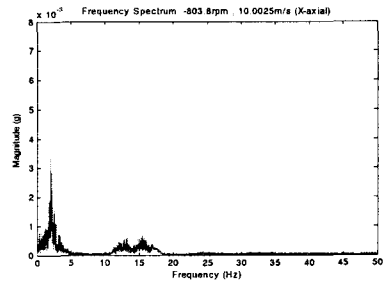


(a) waterfall (x-axis)

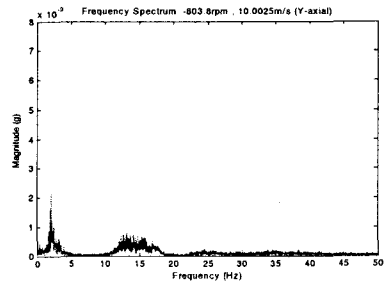


(b) waterfall (y-axis)

Fig. 4 Water fall plot of W/T vibration



(a) X-component



(b) Y-component

Fig. 5 Vibration spectrums at 10.0m/s

그러나 타워구조의 고유진동수는 케이블 조건 (길이, 굵기, 탄성계수 등)과 설치 조건(케이블장력, 타워지지조건)에 의하여 결정된다. 따라서 공진 가능성이나 발전효율에 미치는 영향을 제거하기 위해서는 연구개발 단계에서 각 인자들의 영향을 평가하여 공진대역을 설계하는 것이 필요할 것이다.

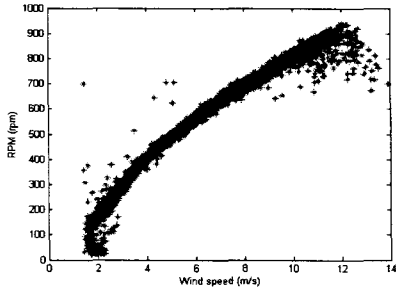
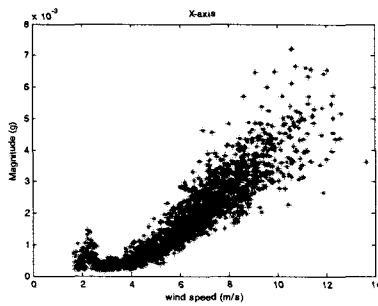
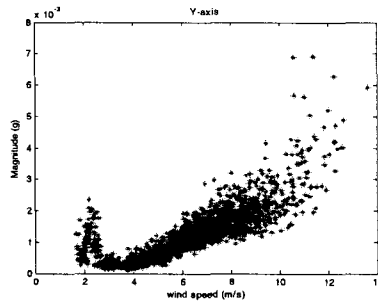


Fig. 6 Wind speed and rotor speed



(a) X-component



(b) Y-component

Fig. 7 Vibration magnitude(rms) vs. wind speed

5. 결론 및 토론

대관령 풍력실증연구단지의 1kW급 소형풍력발전기(AU-1000, 오로라(주))의 진동 성능을 모니터

링 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 타워진동은 회전 속도에 무관한 2.1Hz의 피크 주파수 성분과, 회전 속도의 1차 조화 성분의 두 피크 군에 의하여 지배된다.
- 2) 2.1Hz의 피크 성분은 타워의 1차 횡진동 모드가 풍하중에 의하여 가진된 결과이다.
- 3) 2차 피크군은 회전 불평형에 기인하며 그 주파수는 회전수에 비례하여 증가한다. 2차 피크 성분이 크게 나오는 것은 회전체의 평형 상태가 좋지 않음을 의미한다.
- 4) 2.1Hz의 공진은 126rpm대역에서 발생하는데, 작업 풍속 범위의 하단에 위치하는 관계로 발전효율에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 공진 레벨도 정상적인 작업 속도에서의 진동에 비해 크지 않으므로 공진에 의한 안정성 문제는 없는 것으로 평가된다.

후기

본 연구는 (주)오로라의 지원으로 수행된 '1kW 소형 풍력발전기 성능검사'의 일환으로 수행되었다.

References

- [1] T.Burton, 2002, "Wind Energy Handbook", John Wiley and Sons, Ltd.
- [2] E.Hau, 2000, "Wind Turbines", Springer Verlag.
- [3] S.H.Kim, and etl., 2005, "Wind power technology development, transfer, and commercialization with construction of a wind turbine test site in Korea", International Journal of Technology Transfer and Commercialization, Vol.4(3), pp. 360-385.
- [4] 김석현, 남윤수, 은성용, 2005, "750kW 풍력발전기 타워 구조의 진동 특성", 한국소음진동공학회 논문집, 제 15권 2호, pp. 219-224.
- [5] 김석현, 유능수, 남윤수, 이정완, 2005, "소형 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 분석", 한국신재생에너지학회 2005년도 춘계 학술대회는논문집, pp. 64-67.
- [6] 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, 2003, "LabVIEW를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발", 한국정밀공학회 논문집, 제 20권 5호, pp. 92-97.
- [7] R.A.Collacott, 1979, "Vibration Monitoring and Diagnosis", John Wiley and Sons, Ltd.