

풍력발전기의 성능 모니터링 및 하중분석

배재성* · 김성완* · 윤정은* · 경남호*

Performanc Monitoring and Load Analysis of Wind Turbine

Jae-Sung Bae*, Sung-One Kim**, Joung-Eun Youn, Nam-Ho Kyung***

Key Words : Wind turbine(풍력발전기), 성능 모니터링(Performance Monitoring), Load measurement(하중측정), Fatigue spectrum(피로 스펙트럼)

ABSTRACT

Test facilities for the wind turbine performance monitoring and mechanical load measurements are installed in Vestas 100 kW wind turbine in Wollyong test site, Jeju island. The monitoring system consists of Garrad-Hassan T-MON system, telemetry system for blade load measurement, various sensors such as anemometer, wind vane, strain gauge, power meter, and etc. The experimental procedure for the measurement of wind turbine loads, such as edgewise(lead-lag) bending moment, flapwise bending moment, and tower base bending moment, has been established. Strain gauges are on-site calibrated against load cell prior to monitoring the wind turbine loads. Using the established monitoring system, the wind turbine is remotely monitored. From the measured load data, the load analysis has been performed to obtain the load power spectral density and the fatigue load spectra of the wind turbine.

1. 서론

풍력 발전은 청정에너지인 바람이 동력원이므로, 기존의 화석연료나 우라늄 등을 이용한 발전방식에 비해 대기오염이나, 방사능 누출 등과 같은 문제가 없는 무한정의 무공해 발전방식이다. 이러한 풍력 발전의 장점으로 가장 유력한 대체 에너지원으로 인정받고 있다. 전 세계적으로 2003년 누계 기준으로 약 40,000 MW의 풍력발전 시스템이 설치되어 운전되고 있으며, 2008년에는 약 95,000 MW의 풍력발전 시스템이 설치, 운전될 것으로 예측되고 있다¹. 지구 환경 변화에 대한 국제적 관심과 최근의 급속한 유가 상승, 사용 에너지의 약 96%를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 에너지 문제로 인해, 최근 들어 국내에서도 풍력발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 풍력 발전은 무한정의 청정

에너지인 바람을 이용하는 장점이외에 다른 발전 방식에 비해 구조나 설치가 상대적으로 간단하여 운영 및 관리가 쉬우며, 또한, 무인화/자동화 운전이 가능하다는 장점이 있다.

이러한 풍력 발전의 장점으로 인해, 현재 전 세계적으로 많은 풍력발전시스템이 개발, 보급되고 있다. 풍력발전시스템을 많이 활용하고 있는 선진국에서는 각 국가의 기술개발 방식이나 기술개발 수준에 의하여 제각기 표준규정이나 성능시험 절차를 인용하여 적용하고 있다. 최근 풍력설비의 보급이 활발히 진행됨에 따라 풍력산업의 규모도 커지고 있고, 기술개발의 규모나 정도도 점차 커짐에 따라 성능시험 기술이 독립적인 하나의 완전한 기술로서 자리 잡아가고 있다. 따라서, 기술적용의 표준화나 규정화가 이루어지고 있으며, 일정한 절차나 규정에 의한 성능시험의 표준화 등이 이루어지고 있다.

* 풍력유체기계연구센터, 한국에너지기술연구원
E-mail : jsbae@kier.re.kr

본 연구에서는 풍력발전기의 설계 및 성능평가, 인증시험을 위한 하중 및 성능 모니터링 시스템을 풍력발전기에 설치하고, 운영 중 풍력발전기의 성능 및 하중 모니터링을 수행하였다. 모니터링 대상 풍력발전기는 한국에너지기술연구원의 제주도 월령 성능평가 기지에 설치되어 운영 중인 VESTAS 사의 100 kW급 풍력발전기이다. 풍력발전기의 성능 모니터링 시스템은 Garrad Hassan사의 T-MON을 사용하였으며, 블레이드의 하중을 측정하기 위해 원격측정장치(Telemetry System)를 사용하였다. 하중 측정을 위해 센서 및 원격측정장치를 설치한 후 하중 보정실험을 수행하였다. 설치된 풍력발전기 모니터링 시스템을 이용하여 2004년 8월 이후부터 풍력발전기 운전 중의 감시 및 모니터링과 데이터 수집을 수행하였다.

2. 성능평가 모니터링 하중측정 장비 설치

2.1 풍력발전기 사양

본 연구에서 성능 모니터링 및 하중이 측정된 풍력발전기는 1994년에 제주도 월령에 설치/운전되고 있는 덴마크 Vestas 사의 100 kW급 V20이다. 정격출력이 100 kW이며, 3개의 블레이드를 가진 upwind 방식의 풍력발전기이다. 시동풍속 (cut-in speed)은 3.4 m/s, 정격풍속(rated speed)은 14.5 m/s, 종단풍속(cut-out speed)은 23 m/s이다. 로터 블레이드의 직경은 20 m, 회전 면적은 314 m²이며, 타워의 높이는 23.4m이다. 풍력 발전기의 회전 속도는 약 45 rpm이다.

2.2 측정 물리량

풍력발전기의 성능평가 및 하중분석을 위해 측정해야할 관련 물리량은 로터 블레이드 하중, 타워 하중 등의 하중관련 물리량, 풍속 및 풍향, 대기온도, 기압 등의 기상관련 변수, 전력, 회전속도, 방위각 등의 작동관련변수들이다^{2,3}. 세가지 종류의 측정되어야 할 물리량 중, 하중관련 물리량은 블레이드 하중, 타워 하중, 회전자 하중이다.

블레이드 뿌리(blade root)에 작용하는 하중은 플랩방향 굽힘 모멘트(flapwise bending moment, FBM)와 리드-래그 굽힘 모멘트(lead-lag or edgewise bending moment, EBM)로 구분되고, 타워하중은 타워 바닥(tower bottom)에서의 두방향 굽힘 모멘트이다.

로터하중은 기울기 모멘트(title moment), 편각(yaw moemnt), 로터 토크(roter torque)이다. 본 연구에서는 풍력발전기의 로터구조의 문제로 인해 로터하중은 측정되지 않았다.

Table 1 Contents of WT monitoring system.

Type	Model	Maker	Remark
T-Mon System	APL 8016 DAU APL 8000 RSP GH T-Mon Software	GH	8Ch. DAU Max Sampling 75Hz
Telemetry System	MAW-84TE-4.0.01 MSV-M-4.0.01 A9C-85-100 ROT_Gum_2000_B5_e	MA	4 CH gauge Receiver 4Ch Signal Amp. Receiving Antenna Flexible Rotor Loop
Strain Gauge	K-LY41-6/350-4-10M	HBM	
Digital Power Meter	WT230	Yokogawa	R-P: 150 ~ +150KW
Anemometer	A100LK	Vector	
Encoder	RPGD(50000100)	Red Lion	
Yaw Position	200P	NRG	

2.3 모니터링 시스템설치

Table 1은 풍력발전기에 설치된 성능평가 및 하중측정 모니터링 시스템의 주요구성장비들을 보여준다. 모니터링을 위한 시스템으로 Garrad-Hassan사의 T-MON 시스템을 사용하였으며, 3개의 8채널 DAU와 하나의 RSP로 구성되고, 최대측정 주파수는 75 Hz이다. 각각의 DAU와 RSP는 낫셀, 타워바닥, 기상탑에 설치되었다. T-MON 시스템에 의한 모니터링 데이터는 10분 데이터와 10분 평균데이터로 저장된다. 설치된 모니터링 시스템은 인터넷을 통해 대전의 한국에너지기술연구원에서의 풍력발전기의 성능평가, 하중측정 모니터링 및 감시가 가능하도록 구축되었다.

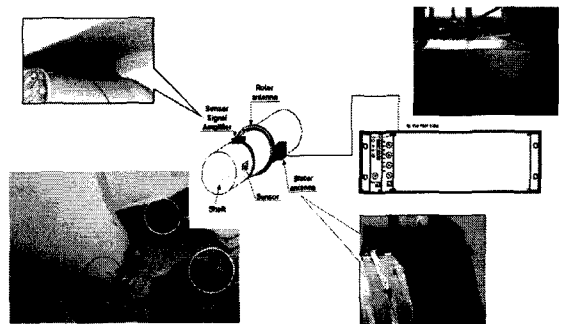


Fig. 1 Strain gauge and telemetry system for blade loading.

Vestas사의 100 kW급 풍력발전기는 로터블레이드 허브와 낫셀 사이의 간격이 작아, 슬립링(slip ring) 설치가 불가능하였다. 따라서, Manner사의 4채널

telemetry system을 사용하였다. Fig. 1은 블레이드와 허브, 낫셀에 설치된 telemetry 시스템과 strain gauge를 보여준다. 센서는 HBM사의 스트레인 게이지를 사용하였다. 스트레인 게이지와 telemetry와의 결선은 블레이드의 경우는 half-bridge를 구성하고, 타워는 full-bridge를 구성하였다.

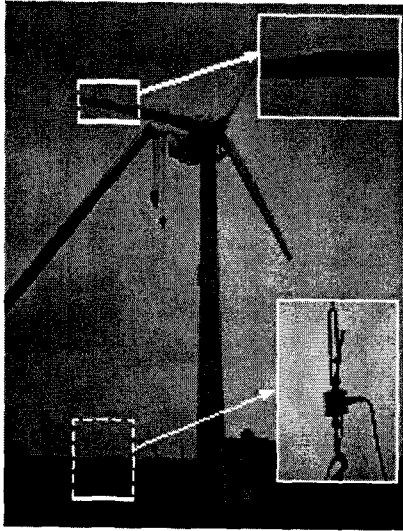


Fig. 2 Load calibration for EBM.

2.4 하중 보정 실험

풍력발전기의 성능평가 및 하중측정 모니터링 시스템을 설치한 후, 하중측정을 위한 센서의 보정(calibration) 실험을 수행하였다. 블레이드의 FBM과 EBM, 타워의 굽힘모멘트 측정을 위해 설치된 스트레인 게이지 각각에 대해 이루어졌다. Fig. 2는 EBM의 하중보정실험전경을 보여준다. EBM을 측정하고자 하는 블레이드를 9시 방향에 고정시키고, 7.5 m 떨어진 지점에 지그를 설치하고, 와이어로 지상에 연결된 로드셀(load cell)에 연결한다. 렌치를 이용하여 와이어의 장력을 조절하여 블레이드의 EBM를 조절하면서, 센서로부터 스트레인 게이지를 측정하였다. 하중은 5 kg에서 200 kg까지 여러회 반복하였다. Fig. 3은 EBM의 하중보정 실험 결과를 보여준다. 하중과 스트레인이 선형관계를 가지고 있음을 알수 있으며, 하중-스트레인 데이터를 선형함수로 곡선적합(curve-fitting)하였다. 블레이드의 FBM와 타워바닥의 굽힘모멘트도 EBM과 마찬가지로 지그를 설치하고, 와이어로 로드셀

과 연결하여 하중을 가하였다. FBM의 경우는, 측정하고자 하는 블레이드를 6시방향에 고정하고, 로드셀을 타워에 고정하였다. 타워하중은 타워의 요기어 아래부분에 지그를 설치하고, 와이어를 지상에 연결된 로드셀에 연결하였다. 보정실험으로부터 구한 하중-스트레인 보정계수는 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Calibration factors.

Type	Calibration factor(V/kgf-m)
EBM	5.93×10^{-4}
FBM	5.87×10^{-4}
Tower BM	5.65×10^{-6}

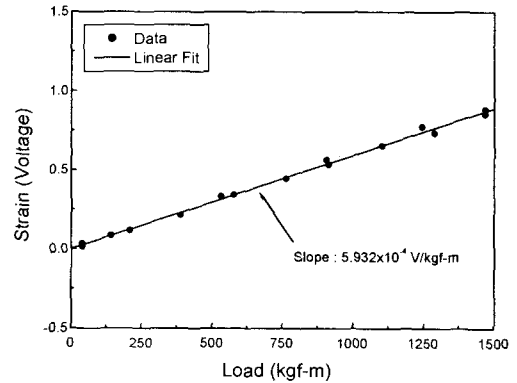


Fig. 3 Load-strain plot(EBM).

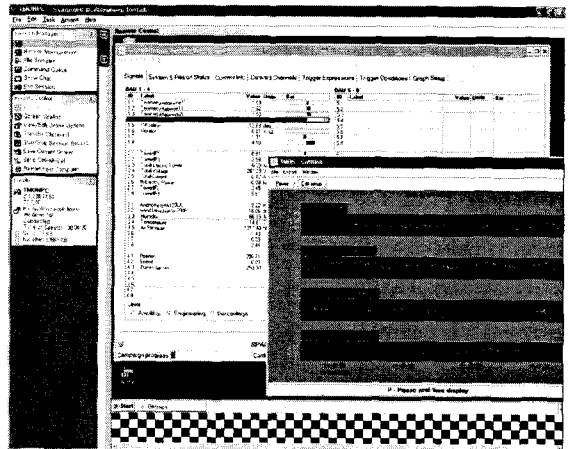


Fig. 4 Window of T-MON system.

3. 풍력발전기 성능 모니터링 및 하중 분석

3.1 풍력발전기 모니터링

설치된 하중관련 물리량 및 기상/작동 관련 물리량 측정시스템은 T-MON시스템에 의해 실시간으로 모니터링되고, 데이터들이 저장된다. Fig. 4는 PC의 T-MON 시스템의 창(window)이다. 측정되는 하중, 기상, 작동 관련 물리량들이 창에 나타낼 수 있으며, 간단한 실시간의 그래픽도 가능하다.

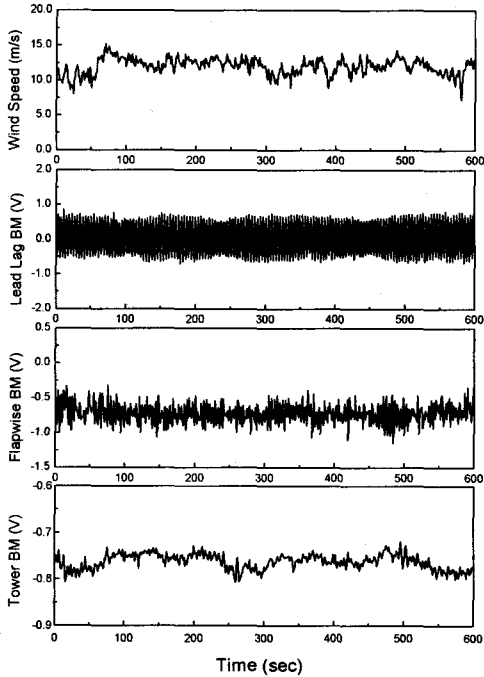


Fig. 5 Monitoring signals for wind speed and loads.

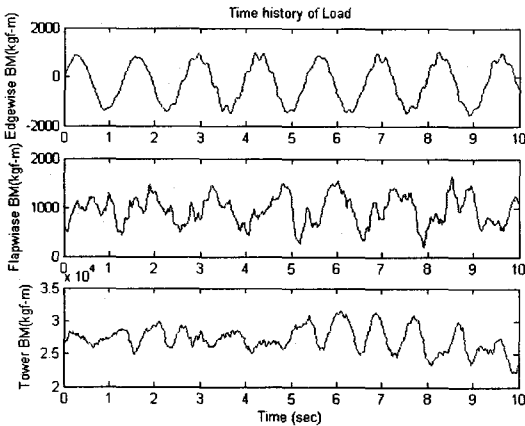


Fig. 6 Time histories of blade and tower loads.

3.2 풍력발전기 하중분석

Fig. 5는 2004년 8월 19일에 측정된 물리량 중 풍속과 세가지 하중관련 측정신호의 10분간 저장된 데이터이다. 10분간 평균풍속은 12 m/s이다. 측정된 10분간의 하중 신호로부터 Table 2의 하중보정계수를 이용하여 블레이드 및 타워에 작용하는 하중을 구할 수 있다. Fig. 6은 변환된 블레이드와 타워의 굽힘모멘트를 보여준다. 측정된 10분간의 블레이드와 타워 하중으로부터 파워스펙트럼밀도(power spectral density, PSD)를 계산할 수 있다. Fig. 7은 측정된 풍력발전기 하중의 파워스펙트럼을 보여준다. 파워스펙트럼을 계산하기 위해 MATLAB을 이용하였다. 측정된 하중데이터로부터 피로하중 스펙트럼 선도(fatigue load spectra)를 얻을 수 있다. Fig. 8은 구해진 블레이드 피로하중 스펙트럼을 보여준다. 피로하중 스펙트럼을 구하기 위해 rainflow counting을 사용하였다. 이와같이 본 연구에서는 풍력발전기의 하중 모니터링으로부터 피로하중 스펙트럼에 이르는 하중분석 방법을 수립하였으며, MLC조건³에 따라 풍력발전기의 하중 모니터링을 수행하고 있다.

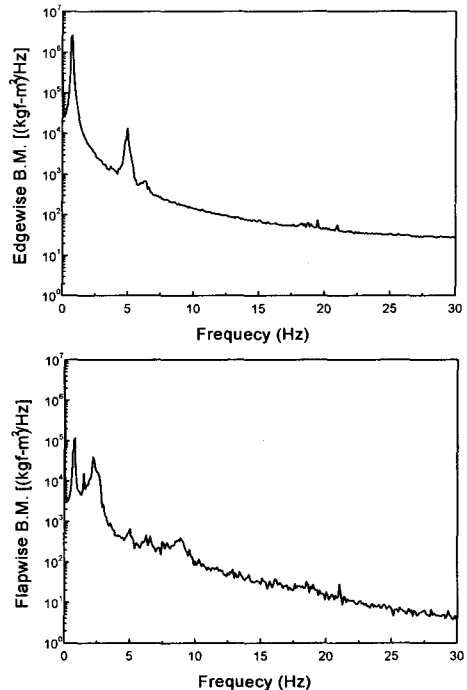


Fig. 7 PSD of EBM and FBM.

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전기의 성능평가 및 하중모니터링을 위해 모니터링 시스템과 하중측정을 위한 장치를 설치하여 풍력발전기를 모니터링하고 측정된 하중을 분석하였다. 풍력발전기 성능 및 하중 모니터링을 위해 Garrad-Hassan사의 T-MON 시스템을 사용하였으며, 블레이드의 하중측정을 위해 telemetry 시스템을 사용하였고, 하중측정 센서의 보정실험을 수행하였다. 설치된 모니터링 시스템을 이용하여 풍력발전기의 하중, 기상, 작동관련 물리량들을 원격으로 모니터링하고 있다. 측정된 블레이드와 타워의 하중데이터로부터 하중분석을 수행하여 하중의 파워스펙트럼 밀도와 피로하중 스펙트럼을 계산하였다. 본 연구에서 수립된 성능평가 모니터링 및 하중분석 시스템은 향후 국내에서 개발되는 풍력발전기의 성능평가 및 인증에 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회 및 에너지 관리공단의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 말을 전합니다.

참고문헌

- (1) BTM Consult Aps, World Market Update 2003, Denmark, March 2004.
- (2) IEC, Wind Turbine Generator Systems - Part 12 : Wind Turbine Power Performance Testing, IEC 61400-12, 1992.
- (3) IEC, Wind Turbine Generator Systems - Part 13 : Measurement of Mechanical Loads, IEC 61400-13, 1992.

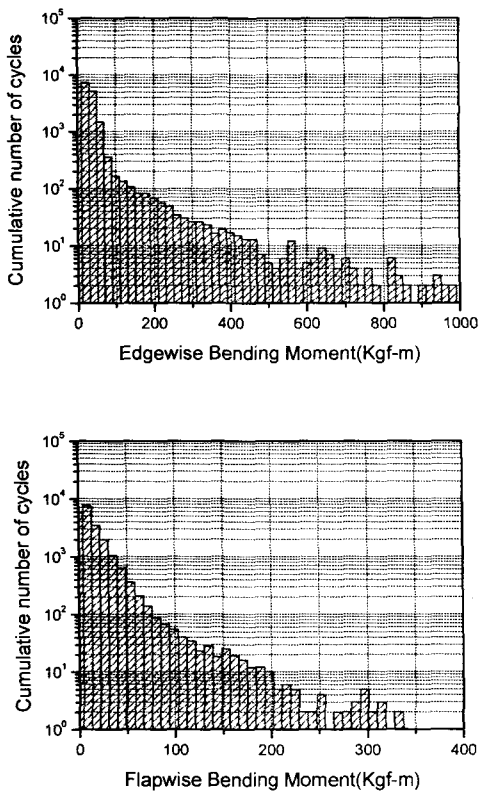


Fig. 8 Fatigue spectra for blade loads.