

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
 Vol. 24, No. 4, 2004

100 kW급 풍력발전기의 하중 측정

배재성*, 김성완*, 경남호*

*한국에너지기술연구원 풍력유체기기연구센터(jsbae@kier.re.kr, kso@kier.re.kr, nhkyongc@kier.re.kr)

Load Measurements of 100 kW Wind Turbine

Bae, Jae-Sung*, Kim, Sung-One*, Kyong, Nam-Ho*

*Korea Institute of Energy Research(jsbae@kier.re.kr, kso@kier.re.kr, nhkyongc@kier.re.kr)

Abstract

Mechanical load measurements on blade and tower of Vestas 100 kW wind turbine has been performed in Wollyong test site, Jeju island. 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. The test facilities consisting of strain-gauges, telemetry and T-Mon system are installed in the wind turbine. Strain gauges are on-site calibrated against load cell prior to monitoring the wind turbine loads. Using the test setup, the loads on the components are being measured and analysed for various external conditions of the wind turbine. A set of results for near rated wind speed has been presented in this paper.

Keywords : 풍력발전기 (Wind Turbine), 하중 측정 (Load Measurement), 보정(Calibration)

기 호 설 명

EBM : edgewise bending moment(kgf-m)
 FBM : flapwise bending moment(kgf-m)
 TBM : tower base bending moment(kgf-m)
 PSD : power spectral density(kgf-m)

1. 서 론

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 있다 [1]. 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 청정에너지인 바람을 이용하는 장점이외에 다른 발전 방식에 비해 구조나 설치가 상대적으로 간단하여 운영 및 관리가 쉬우며, 또한, 무인화/자동화 운전이 가능하다는 장점이 있다.

현재 전 세계적으로 많은 풍력발전시스템이 개발, 보급되고 있다. 풍력발전시스템을 많이 활용하고 있는 선진국에서는 각 국의 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.

풍력발전기의 구조 설계 시, 하중에 대한 정확한 이해와 예측은 매우 중요하다. 설계 단계에서 공탄성 모델 (aeroelastic model)과 코드를 이용하여 하중을 예측할 수 있다. 그러나, 그러한 공탄성 모델은 충분히 정확하지 않고, 불확실성 (uncertainty)을 가지고 있기 때문에, 측정 결과에 의해 검증되어야 할 필요가 있다. 또한, 측정 결과로부터 특별한 상태에서 직접적으로 구조 하중을 얻을 수 있다. 따라서, 하중 측정결과가 풍력발전시스템의 설계에서 점차 그 비중이 높아지고 있다. 하중측정 데이터로부터 계산된 설계하중 범위를 검증하게 되며, 현재의 설계기법을 최적화 하는데 기여하게 된다. 그러므로, 기계적 하중의 측정 데이터는 설계를 위한 자료 및 풍력 발전기의 인증 (certification)을 위한 자료로 사용될 수 있다.

풍력발전기의 하중 측정에 관한 내용은 IEC 61400-13(2)에 기재되어 있다. 그러나, 풍력발

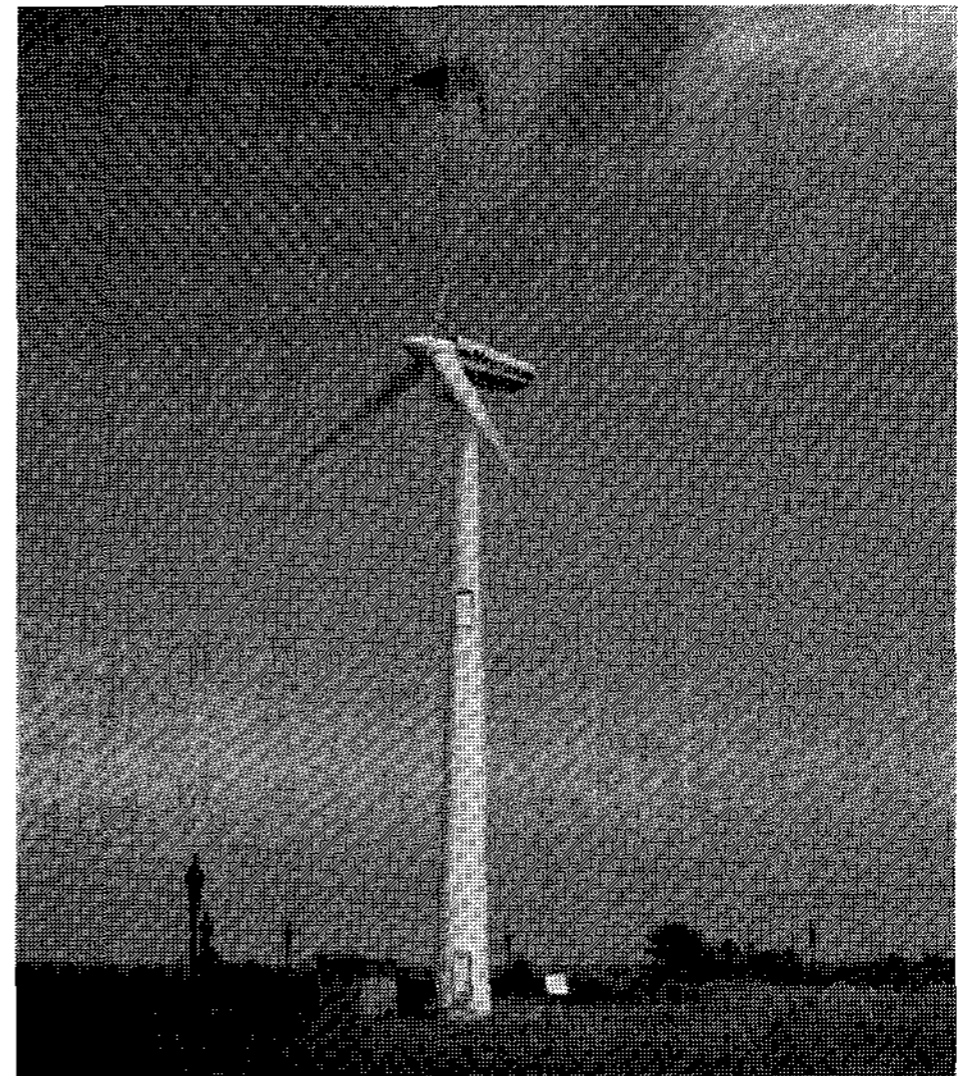


그림 1. VESTAS사의 100kW 급 풍력발전기

전기 하중측정 실험 및 장비에 대한 구체적 내용이나 연구사례, 연구논문[3,4]은 많이 발표되지 않고 있다. 특히, 하중측정 및 모니터링에 대한 국내의 연구사례 및 연구논문은 발표된 적이 없다.

본 연구에서는 풍력발전기의 설계 및 인증시험에 필요한 풍력발전기의 하중 측정을 위해 하중측정 및 모니터링 시스템을 구성하고 하중측정 및 모니터링 시스템을 풍력발전기에 설치하였다. 설치된 하중측정 장비들의 보정실험에 대한 절차를 수립하였다. 하중 측정 대상 풍력 발전기는 한국 에너지기술연구원의 제주도 월령 성능평가기지에 설치되어 운영 중인 VESTAS 사의 100 kW급 풍력발전기 (그림 1 참조)이다. 블레이드 및 타워의 하중 측정 장비는 스트레인 게이지 (strain gauge), 원격측정장치 (telemetry) 등으로 구성되었다. 설치된 하중센서 및 모니터링 시스템에 대한 보정실험을 수행하여 센서민감도(sensor sensitivity, 하중/센서출력의 관계)를 구하였다. 센서의 보정 후, 풍력 발전기를 운전하여, 데이터를 수집/저장하였다. 측정/저장된 데이터로부터 로터 블레이드와 타워에 가해지는 하중을 구하고, 하중의 파워 스펙트럼 밀도(PSD)를 얻었다.

2. 하중 측정 장비 및 실험 방법

2.1 풍력 발전기 사양

본 연구에서 하중이 측정된 풍력발전기는 1994년에 제주도 월령에 설치/운전되고 있는 덴마크 Vestas 사의 100 kW급 V20이다(그림 1 참조). 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 23.4 m이다. 풍력 발전기의 회전 속도는 약 45 rpm이다.

2.2 하중 및 기상/작동 관련 측정 물리량

풍력발전기에 가해지는 하중의 특성을 파악하기 위해 측정해야할 관련 물리량은 로터 블레이드 하중, 타워 하중 등의 하중관련 물리량, 풍속 및 풍향, 대기온도, 기압 등의 기상관련 변수, 전력, 회전속도, 방위각 등의 작동관련변수들이 이다[2].

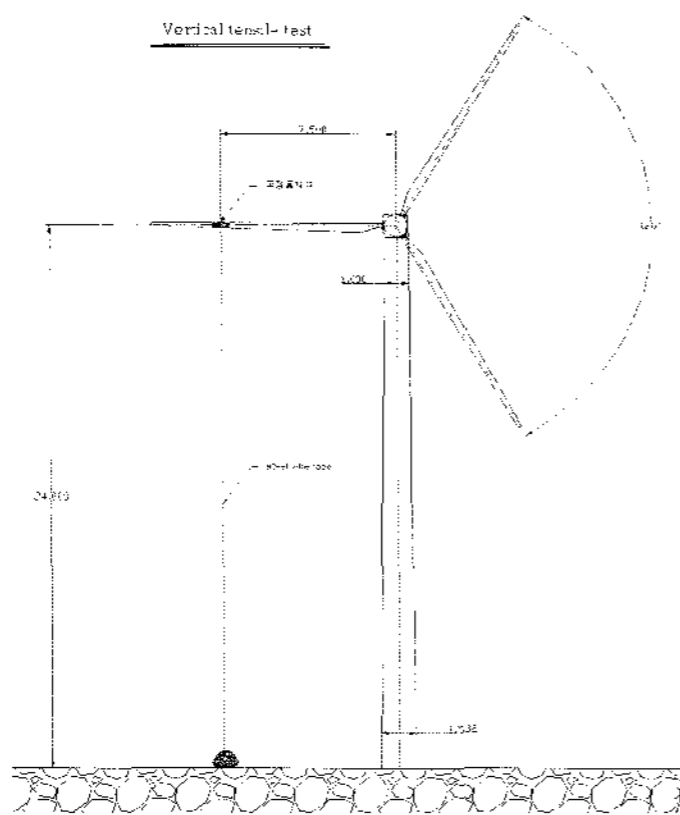


그림 2. 블레이드 EBM 보정(calibration).

블레이드 뿌리(root)에 작용하는 하중은 플랩 굽힘 모멘트(flapwise bending moment, FBM)와 리드-래그 굽힘 모멘트(lead-lag or edgewise bending moment, EBM)이고, 타워 하중은 타

워 루트에 작용하는 두 방향의 굽힘 모멘트이다. 로터 하중은 기울기 모멘트(tilt moment), 편각 모멘트(yaw moment), 로터 토크(rotor torque)가 기준 좌표계에 대해 측정된다.

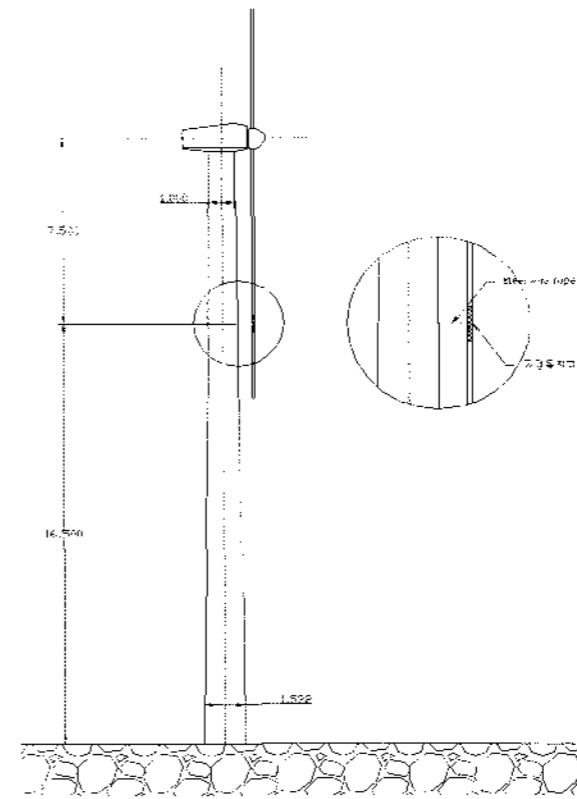


그림 3. 블레이드 EBM 보정(calibration).

2.3 하중 보정 실험 방법

풍력 발전기의 경우 주요 하중 경로 상에 로드 셀(load cell)을 설치하는 것이 불가능하다. 따라서, 블레이드와 타워에 작용하는 굽힘 모멘트(BM)를 측정하기 위해 스트레인 게이지 (strain gauge)와 로드 셀을 사용하였다. 스트레인 게이지의 출력과 가해지는 하중의 정적 보정 관계를 수립하여, 블레이드와 타워에 작용하는 하중을 측정하게 된다. 이때, 스트레인 게이지는 외부에서 가해지는 하중만이 아닌 총 내부 하중을 표시하게 된다.

그림 2와 그림 3은 각각 로터 블레이드 뿌리에서의 EBM과 FBM 보정(calibration)을 위한 실험 방법을 보여준다. EBM의 경우, 날개를 그림 4와 같이 수평방향(9시 방향)으로 고정하고, 블레이드 뿌리에서부터 스패의 75 %지점에 지그(jig)를 설치하고, 와이어로 연결하여, 지상의 로드셀(load cell)과 렌치(wrench)와 연결하였다. 그림 5는 FBM 보정을 위한 지그 및 로드셀 설치 전경을 보여준다. 블레이드를 수직방향(6시 방향)

으로 고정시킨 후, 블레이드의 75 %지점과 같은 높이의 타워에 지그와 와이어를 이용하여 고정하고, 로드셀과 렌치를 설치한다. 그림 6은 타워 뿌리에 작용하는 굽힘 모멘트(TBM) 보정을 위한 지그 및 로드셀 설치전경을 보여준다. 풍력발전기로부터 59 m거리에 로드셀과 렌치를 설치하였다. 와이어는 지상으로부터 23.4 m 높이의 타워 윗부분에 설치된 지그에 연결하였다.

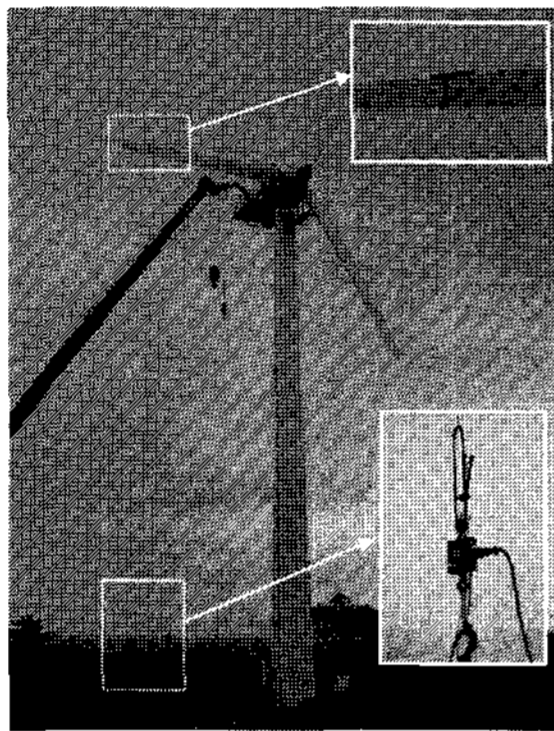


그림 4. 지그 및 로드셀 설치전경(EBM).

2.4 센서 및 원격측정장치(telemetry)

Vestas사의 100 kW급 풍력발전기는 로터블레이드 허브와 나셀 사이의 간격이 작아, 슬립링(slip ring) 설치가 불가능하였다. 따라서, Manner사의 4채널 telemetry system을 사용하였다(그림 7 참고). 센서는 HBM사의 스트레인 게이지를 사용

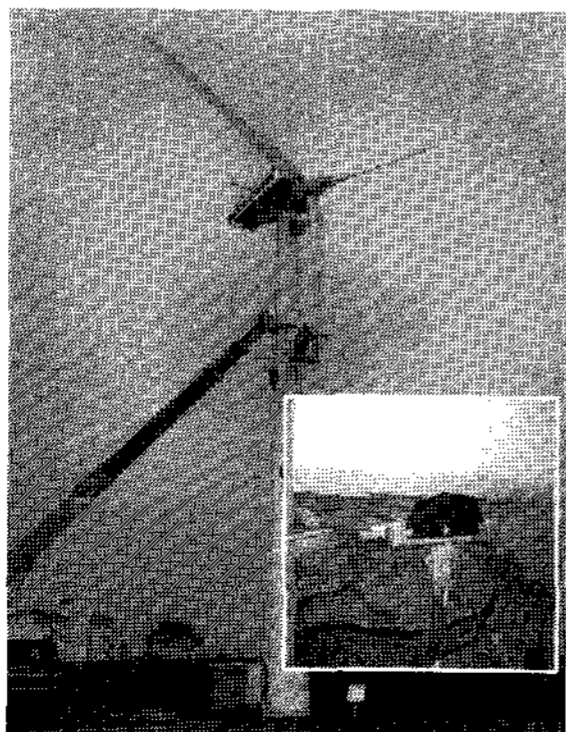


그림 5. 지그 및 로드셀 설치전경(FBM).

하였다. 스트레인 게이지와 telemetry와의 결선은 블레이드의 경우는 half-bridge를 구성하고, 타워는 full-bridge를 구성하였다. telemetry를 통해 나온 스트레인 게이지의 신호는 Garrad-Hassan사의 4개의 DAU를 거쳐, T-Mon system을 통해 모니터링 되고, 저장된다. T-Mon 시스템은 블레이드, 타워의 스트레인 신호와 풍속, 기온, 회전수, 방위각 등의 신호를 출력하고, 저장한다.

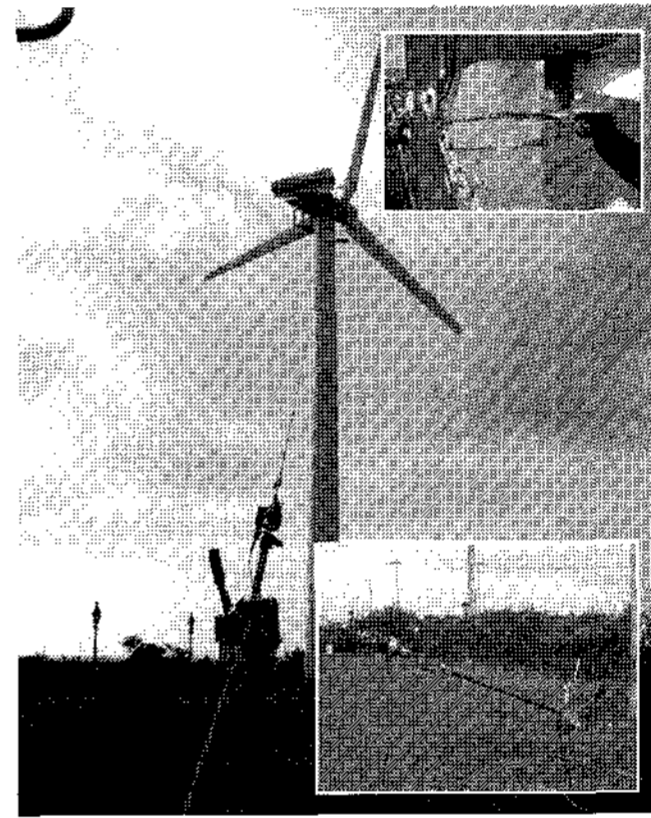


그림 6. 지그 및 로드셀 설치전경(Tower).



그림 7. 4채널 telemetry system.

3. 하중 보정 실험

3.1 블레이드 하중 보정

Edge방향(lead-lag 방향)의 하중보정실험을 위해 블레이드를 그림 4와 같이 9시 방향에 고정시키고, 와이어와 렌치를 이용해 하중을 가하였다. 하중은 5 kg에서 200 kg까지 4회 반복하여 가하

였고, 하중이 가해진 지점은 로터 허브축에서 7.5 m 떨어진 지점이다. 하중 보정 실험으로부터 얻은 데이터를 선형 곡선적합(curve-fitting)하였다. 그림 8은 edge 방향의 하중-스트레인 선도를 보여준다. 하중과 스트레인이 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있고, edge 방향의 센서 민감도(sensor sensitivity)는 5.932×10^{-4} V/kgf-m 이다.

플랩 방향은 블레이드를 그림 5와 같이 6시 방향에 위치시키고, 하중을 가하였다. 하중은 2 kg에서 200 kg까지 반복하여 가하였다. 그림 9는 플랩 방향의 하중-스트레인 선도를 보여준다. flap 방향의 센서민감도는 5.87×10^{-4} V/kgf-m 이다.

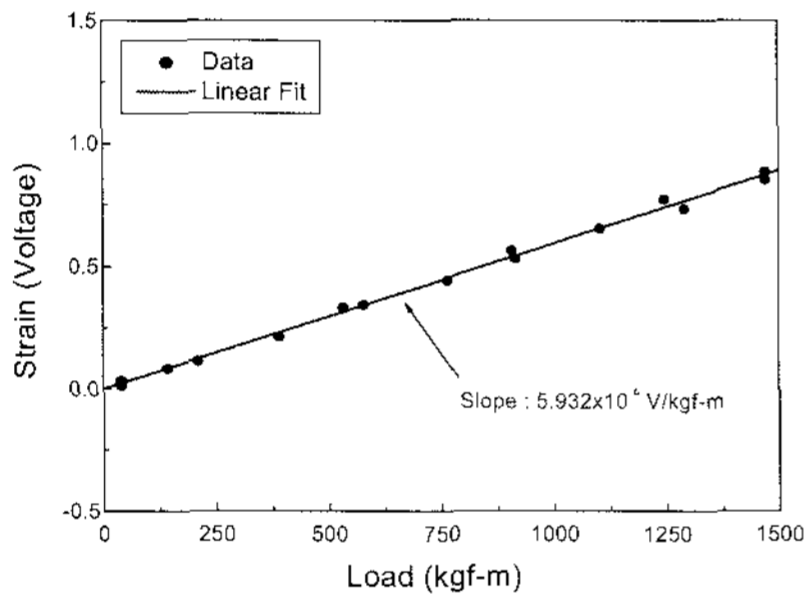


그림 8. 하중-스트레인 선도(Edge 방향).

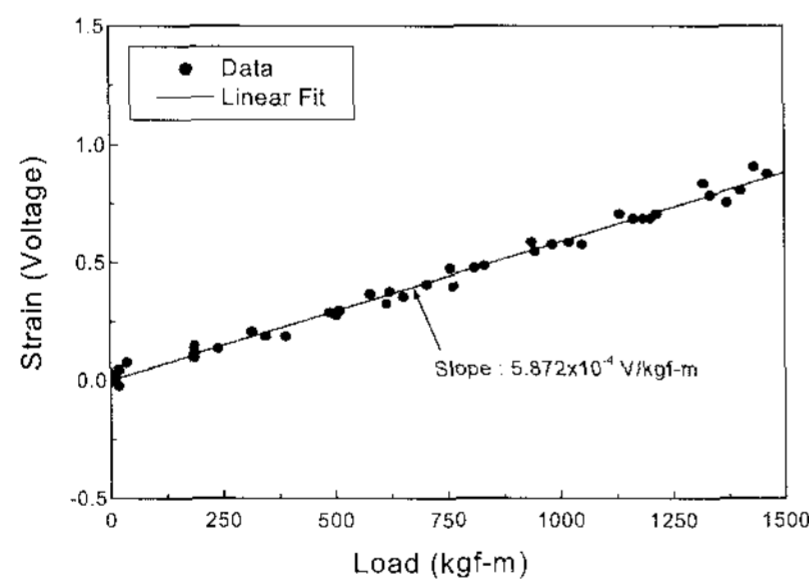


그림 9. 하중-스트레인 선도(Flap 방향).

3.2 타워 하중 보정

타워의 하중 보정을 위해 그림 6과 같이 와이어를 타워 윗부분의 지그에 연결하여 렌치를 이용하여 하중을 가하였다. 하중은 44.8 kg에서부터 1600 kg까지 4회 반복하여 가하였다. 그림 10

은 타워의 하중-스트레인 선도를 보여준다. 그림 8과 그림 9와 마찬가지로 하중과 스트레인 신호가 선형관계를 가지며, 타워의 센서민감도는 5.65×10^{-6} V/kgf-m 이다.

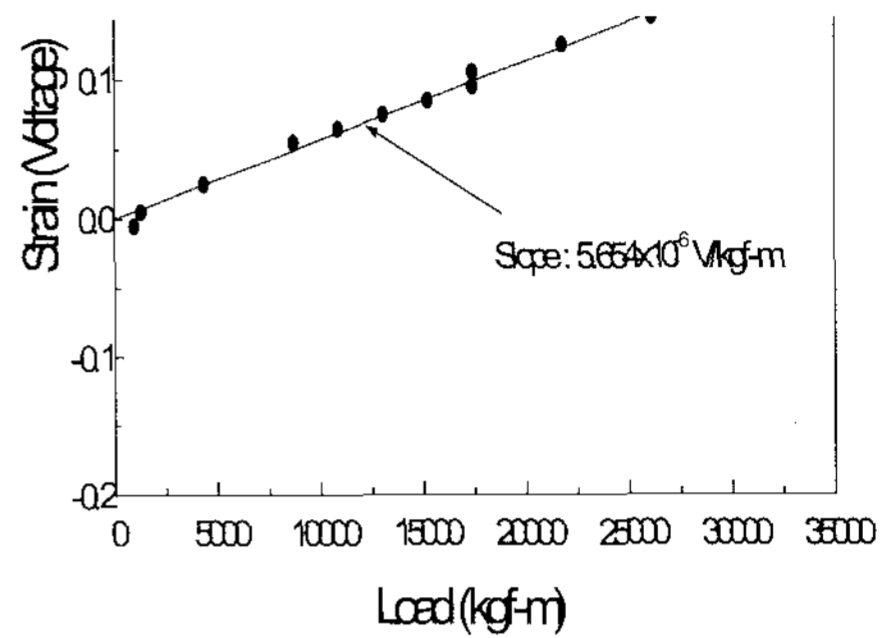


그림 10. 하중-스트레인 선도(타워).

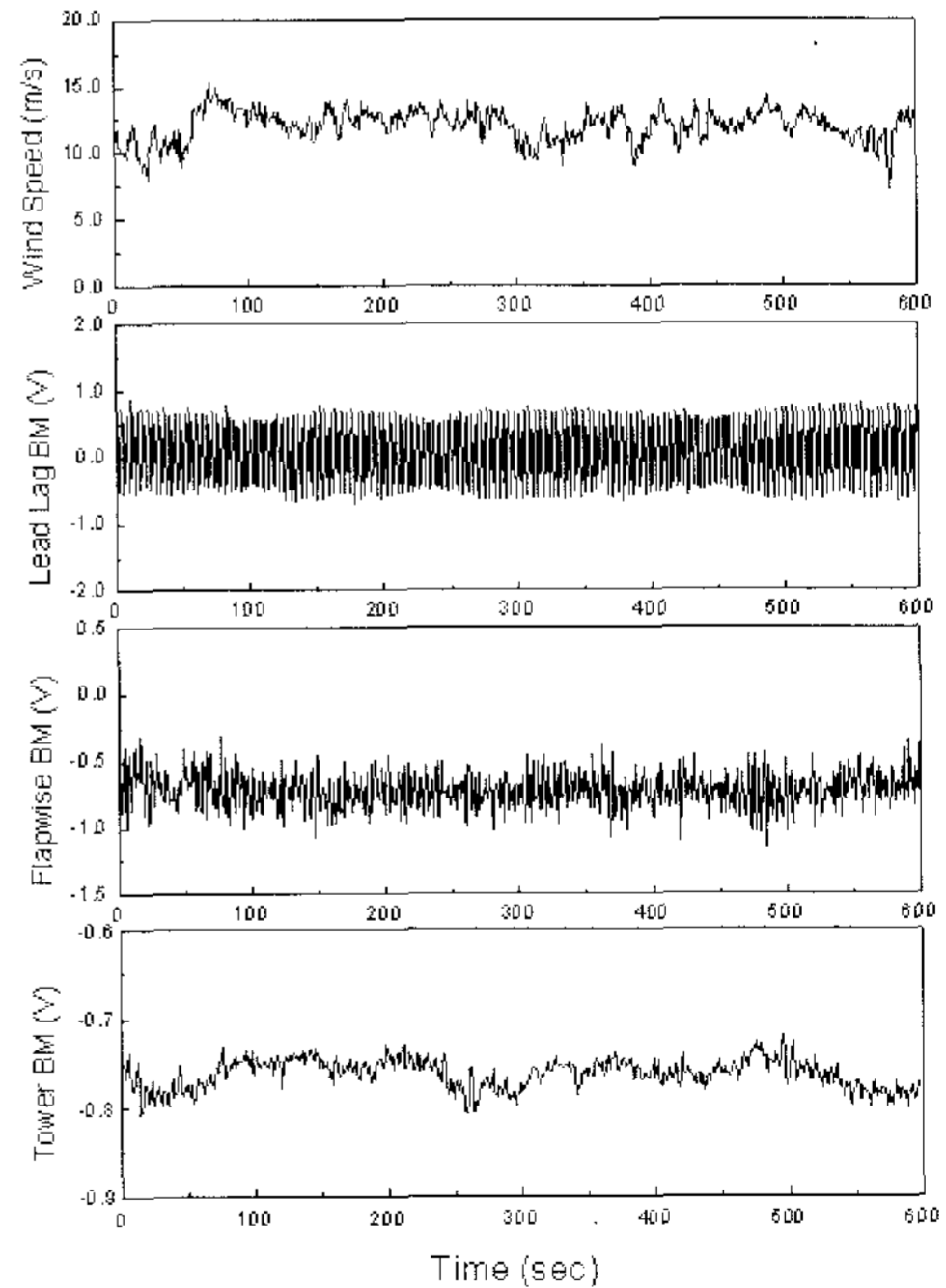


그림 11. 풍속과 스트레인게이지 신호의 시간이력.

4. 하중 모니터링 및 파워스펙트럼

3 절에서 구한 edge방향, flap방향, 타워의 센

서민감도를 이용하여 100 kW급 풍력발전기의 로터블레이드와 타워에 작용하는 하중을 측정하였다. 하중 보정 실험이 끝난 2004년 7월 29일 이후부터 풍력발전기 운전 중에 가해지는 하중 및 풍속을 포함한 데이터들을 T-Mon 시스템으로부터 모니터링하고 있다. 2004년 8월 19일에 10분간 측정된 데이터로부터 가해진 하중을 측정하였다. 참고문헌 2의 IEC 61400-13은 정상상태 MLC (Measurement Load Case)를 정의하고 있으며 측정속도범위에 대해 10분간의 데이터를 모니터링하도록 규정하고 있다. 본 연구에서 사용된 T-MON 시스템은 10분간의 데이터와 평균값을 저장한다. 그림 11은 T-Mon 시스템을 통해 모니터링된 풍속과, edge방향, flap방향, 타워의 스트레인 게이지 신호이다. T-Mon 시스템의 샘플링 주파수는 70 Hz이며, 10분간 평균 풍속은 12.0 m/s이다.

T-Mon 시스템에 의해 저장된 데이터들 중 스트레인 게이지의 신호를 하중으로 변환하였다. 그림 12는 그림 11의 스트레인게이지 신호 중 처음 10초 동안의 신호를 off-line으로 3절에서 구한 보정값을 이용하여, 하중으로 변환시킨 것이다. 각 하중들의 범위가 하중 보정 실험 시 가해진 하중의 범위와 유사함을 알 수 있다.

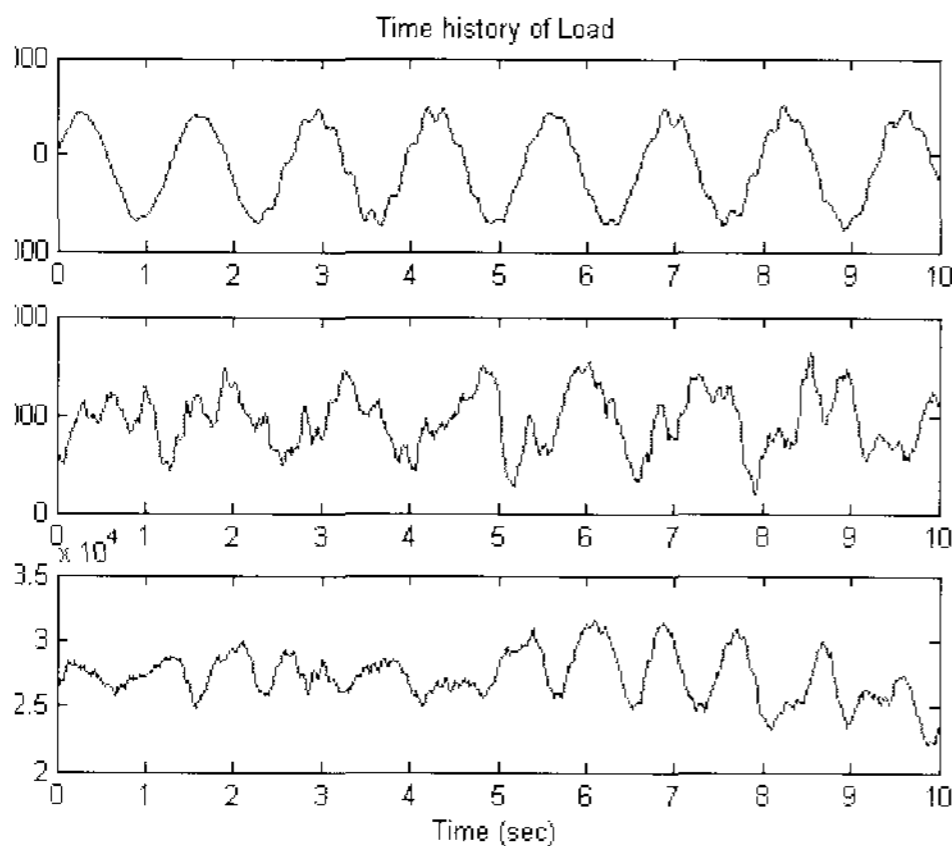


그림 12. 하중의 시간이력.

그림 13은 측정된 10분간의 하중데이터를 이용하여 블레이드에 가해지는 EBM와 FBM, 타워에 가해지는 TBM의 PSD를 보여준다. 그림 11의 측정된 10분간의 하중데이터를 10초간 총 60개 구역으로 나누어서 PSD를 구한 후 평균을 구하였다. PSD를 구하기 위해 MATLAB의 Toolbox 중 'periodogram'을 사용하였다. 그림 13의 EBM과 FBM의 경우, 약 0.7 Hz의 주파수를 가지는 큰 하중이 존재함을 알 수 있다. 이는 로터 블레이드의 회전(약 45 rpm)으로 발생하는 블레이드 자체 중력에 의해 로터 블레이드 뿌리에 작용하는 하중이다. 중력에 의한 하중이외에 EBM의 경우는 약 5 Hz의 하중이 작용한다. FBM의 경우는 약 1.5 Hz, 2.4 Hz의 하중이 존재하고, TBM의 경우, 약 1.2 Hz, 2.5 Hz, 7 Hz, 10 Hz 등의 하중이 존재한다. 이상과 같이 설치된 하중 측정 장비 및 모니터링 시스템을 이용하여 풍력발전기의 하중신호를 모니터링하고 있으며, 저장된 신호로부터 블레이드와 타워에 가해지는 하중을 구하고, 신호처리하여 하중의 PSD를 구하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기의 로터 블레이드와 타워의 하중 측정 및 모니터링을 위한 하중 측정 장비 및 모니터링 시스템을 풍력발전기에 설치하고, 하중 모니터링을 수행하였다. 하중 측정 및 모니터링 시스템은 스트레인 게이지, telemetry 시스템, DAU, T-Mon 시스템으로 구성되었다. 설치된 하중 측정 시스템의 하중 보정을 위한 실험을 수행하여 하중 센서의 민감도를 측정하였다. 설치된 하중 측정 시스템을 사용하여, Vestas 100 kW급 풍력발전기의 운전 시 블레이드와 타워에 작용하는 하중을 모니터링하였다. 저장된 하중신호들로부터 EBM, FBM, TBM를 구하고, PSD를 구하였다. 따라서, 풍력발전기에 설치된 본 연구의 하중 측정 장비 및 모니터링 시스템은

풍력발전기의 운전 중 성공적으로 하중을 모니터링하고 있음을 알 수 있으며, 현재 측정 하중 케이스(measurment load case) [2]의 하중을 측

정하는데 사용되고 있다. 향후, 본 연구의 하중측정 시스템에 대한 설치/보정 및 모니터링 기술은 풍력발전기의 성능평가 및 인증을 위한 연구에 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회의 연구비지원으로 수행되었으며, 본 연구의 수행에 있어서 많은 조언을 준 한국항공우주연구원의 유재석 박사에게 감사의 말을 전합니다.

참 고 문 헌

1. BTM Consult Aps, World Market Update 2003, Denmark, March 2004.
2. IEC, Wind Turbine Generator Systems - Part 13 : Measurement of Mechanical Loads, IEC 61400-13, 1992.
3. Morfiadakis, E., Papadopoulos, K. H., Philippidis, T.P., and Lekou, D.J., Assessment of the Strain Gauge Technique for Measurement of Wind Turbine Blade Loads, European Wind Energy Conference, Nice, France, 1-5 March 1999, pp. 671-674.
4. Seifert, Henry, DEWI/MADE Load Measurements in Spain, DEWI Magazin, Nr. 15, August 1999, pp. 50-56.

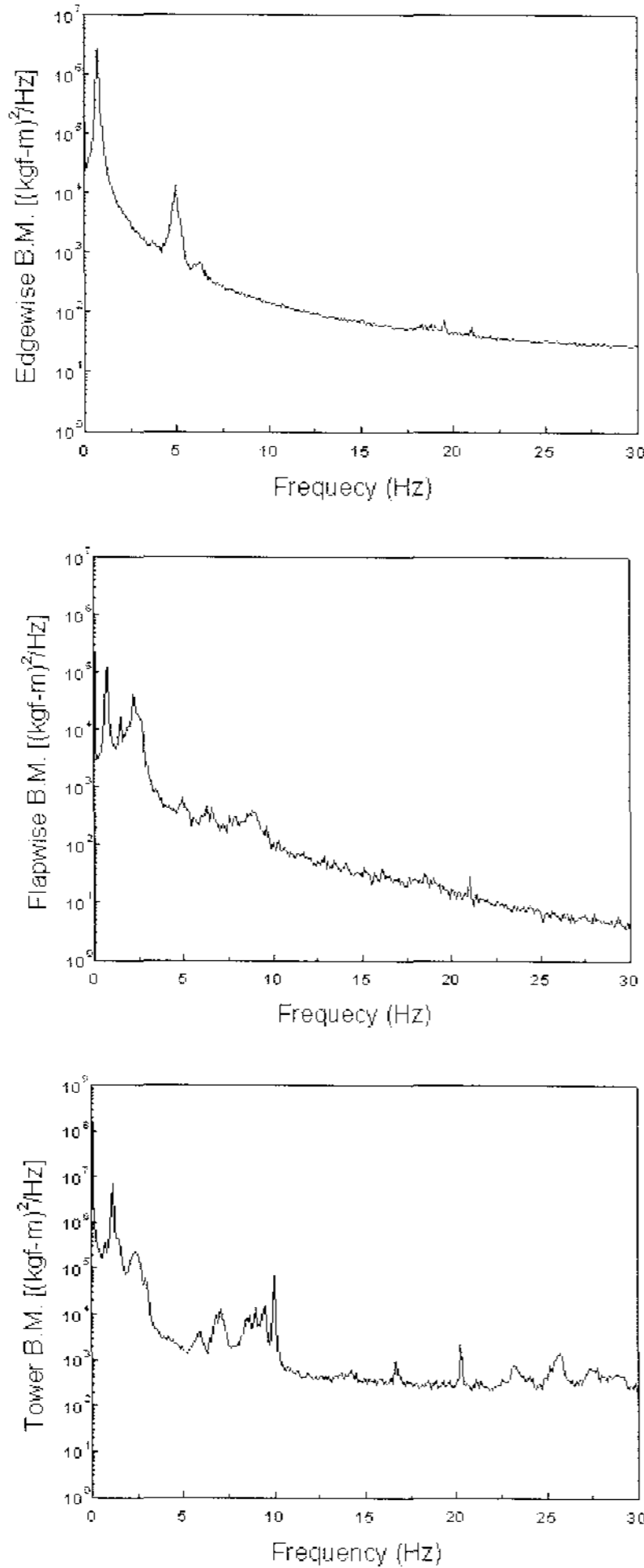


그림 13. 블레이드와 타워 하중의 PSD.