한국신·재생에너지학회 2007년도 추계학술대회논문집 pp.341~344

U50 풍력발전기 하중측정 실증연구

조 주석[1], 홍 혁수[2], 방 조혁[3], 박 진일[4], 류 지윤[5], 길 계환[6]

The study of load measurement on U50 wind turbine

Joosuk Cho, Hyeoksoo Hong, JoHyug Bang, Jinil Park, Jiyune Ryu, Kyehwan Gil

Key words : Wind turbine(풍력터빈), Load measurement(하중측정), Fatigue load(피로하중), Equivalent load(등가하중), Load spectrum(하중 스펙트럼), Strain gauge(스트레인게이지)

Abstract : This paper addresses the measurement of structural loads on the Unison U50 wind turbine. The load measurement are carried out to determine the actual loads acting on a wind turbine. This is needed not only the certification process but also improving the technical development for prototype wind turbine.

The measurement system is consists of measuring load, operating quantities and meteorological signal. All data that occur during the operating of a WT are stored the data acquisition system automatically. With using the measured data, load spectrum and equivalent load are evaluated according to IEC61400-13 "Measurement of mechanical loads".

Nomenclature

L_{eq} : equivalent load
R_i : load range of the i^{th} class of the fatigue load spectrum
n_i : number of cycles in the i^{th} class
N_{eq} : equivalent number of cycles
m : slope of S-N curve for the relevant material

subscrip

WTGS : Wind Turbine Generator System
RFC : Rainflow Counting Method
IEC : International Electrotechnical Commission
WS : Wind speed
TI : Turbulence Intensity
DAS : Data Acquisition System
PLC : Programmable Logic Controller

1. 서 론

풍력발전기는 바람으로부터 발생되는 공기역학적인 하중을 받는다. 날개(blade)에는 공기역학적 하중에 자중과 원심력이 작용하며, 타워(tower)와 나셀(nacelle)에는 날개로부터 전달되는 하중, 공기역학적 항력과 중력이 작용한다. 풍력발전기의 구조 설계 시 위와 같은 하중특성을 충분하게 파악하여 반영해야 한다. 이를 검증하기 위해 풍력발전기의 날개, 타워, 나셀 등에 센서를 설치하고 측정 시스템을 구축하여 데이터를 수집하고 분석하는 하중측정 작업이 필요하다. 또한 하중측정은 구조적으로 안정적이고 효율적인 풍력발전기를 개발하는데 있어서 중요한 자료를 제공한다. 본 논문은 유니슨에서 개발한 750kW U50 풍력발전기를 대상으로 IEC61400-13에 따라서 하중측정을 수행하였다.

2. 하중측정 시스템

이 장에서는 대상 풍력발전기의 사양, 하중측

1) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : jscho@unison.co.kr
Tel : (041)620-3427 Fax : (041)552-7416
2) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : hshong@unison.co.kr
Tel : (041)620-3425 Fax : (041)552-7416
3) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : bjhzone@unison.co.kr
Tel : (041)620-3417 Fax : (041)552-7416
4) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : parkji@unison.co.kr
Tel : (041)620-3411 Fax : (041)552-7416
5) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : jyryu@unison.co.kr
Tel : (041)620-3410 Fax : (041)552-7416
6) 포항공과대학교 가속기연구소
E-mail : khgil@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1366 Fax : (054)279-1599

정 시스템의 구성, 데이터 수집 및 측정신호 정에 대한 소개를 한다.

2.1 대상 풍력발전기 사양

본 연구의 대상 발전기 UNISON U50은 3엽 날개, 전방위형(upwind), 50m의 로터 직경을 갖는 수평축 풍력발전기이다. 로터시스템과 나셀은 50m인 원통형 타워 상단에 설치된다. 풍력발전기는 Active yaw장치, Active blade pitch control 장치 및 전력 변환장치가 구성되어있다. 또한 동력전달장치에 증속기어박스가 없는 직접구동형 풍력발전기로서 다극형 동기발전기가 채택되어 운전 풍속 전 범위 내에서 가변속으로 운전되도록 설계되었다. 그림1은 강원도 대관령에 설치되어있는 발전기의 모습이다.

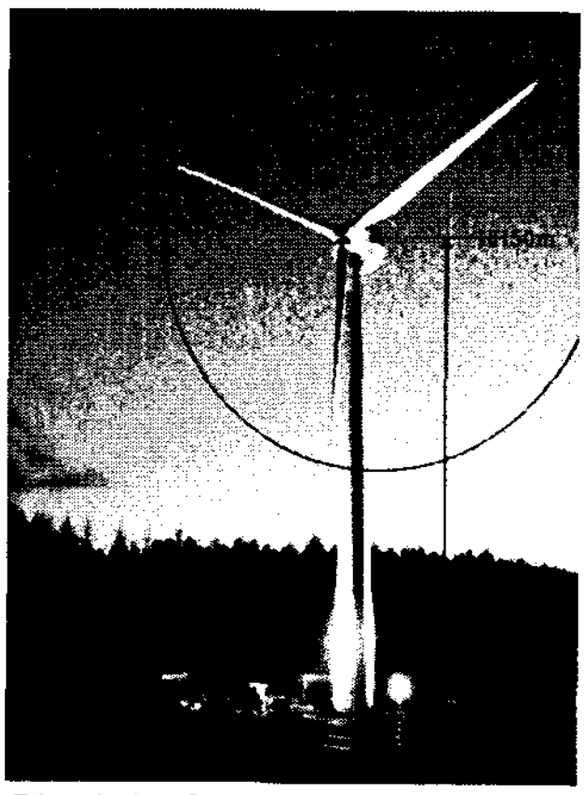


Fig.1 An Overview of UNISON U50

2.2 하중측정 시스템 구성

하중측정은 크게 세 가지로 나누어 분류 할 수 있다. 첫째는 풍력 발전기 날개, 주축(main shaft), 타워 등에서 스트레인게이지를 사용하여 기계적 하중을 측정한다. 둘째는 기상계측타워(meteorological mast)를 사용하여 풍력발전기에 인가되는 바람의 특성을 측정한다. 셋째는 풍력발전기의 운전 상태에 대한 신호를 측정한다. 그림2에 하중측정 시스템의 구성이 나타나 있다. 날개의 신호는 슬립링(slip -ring)을 통해서 CAN-bus통신 방식을 사용하여 나셀에 설치된 중계 모듈로 전송된다. 또한 주축의 신호는 텔레메트리(Telemetry)를 사용해서 중계모듈로 전송된다. 그리고 발전기의 운전 상태에 대한 신호들은 PLC(Programmable Logic Controller)에서 아날로그의 형태로 중계모듈로 전송된다. 중계 모듈에 전송된 신호, 기상 관련 신호, 타워 신호 들은 아날로그의 형태로 타워하부에 설치되어 있는 데이터 수집 장치(Data Acquisition System)로 전송되어 최종적으로 데이터 수집 프로그램에 저장된다. 표1은 하중측정 시스템을 이용해서 계측하는 신호들이 나타나 있다.

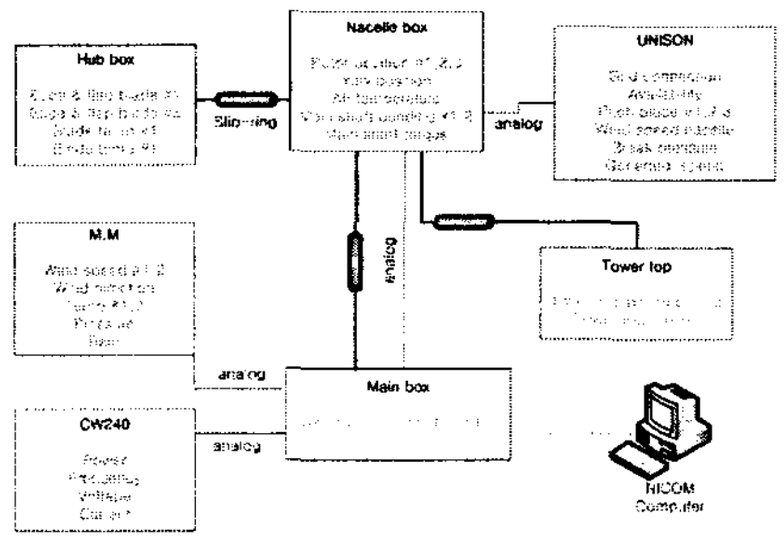


Fig. 2 Schematics of load measurement system

Table 1 Recorded quantities

Location	Channel	Sample rate	unit
Blade	Edge-wise bending	50Hz	kNm
	Flap-wise bending	50Hz	kNm
Main Shaft	Bending, 0°	50Hz	kNm
	Bending, 90°	50Hz	kNm
	Torsion	50Hz	kNm
Tower	Bending top, 0°	50Hz	kNm
	Bending top, 90°	50Hz	kNm
	Torsion top	50Hz	kNm
	Bending bottom, 0°	50Hz	kNm
	Bending bottom, 90°	50Hz	kNm
Met. Mast	Wind speed, hub	1Hz	m/s
	Wind direction, hub	50Hz	°
	Air temp, nacelle	50Hz	℃
	Barometric pressure	50Hz	hPa
	Precipitation, 2m	50Hz	-
Status	Yaw position	50Hz	°
	Rotor position	25Hz	°
	Generator speed	50Hz	rpm
	Blade pitch 1,2,3	50Hz	°
	Break pressure	50Hz	bar
	Electric power	50Hz	kW

2.3 측정 신호 보정

본 논문에서는 측정신호를 보정하기 위해서 외부하중을 가하여 켈리브레이션(calibration)을 수행하였다. 이를 위해서 블레이드 리그, 크레인, 로드셀, 체인 블록, 와이어 등이 필요하다. 또한 바람에 의한 공력하중이 작용하지 않도록 저풍속에서 시행하는 것이 바람직하다. 먼저 켈리브레인션 작업을 수행하기 위해서 그림3에서처럼 로터 중심으로부터 20m 떨어진 곳에 블레이드 리그를 설치하고, 와이어를 연결해서 로드셀을 거쳐 크레인에 부착된 체인 블록과 연결한다. 네 차례에 걸쳐 하중시험을 수행 했다.

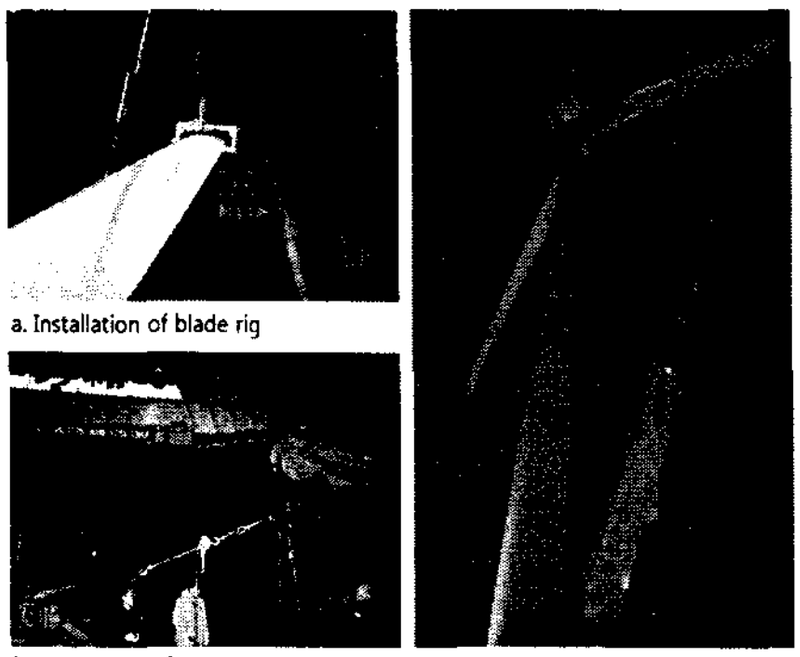
(1) 대상 날개(instrumental blade)의 피치각을 90도로 조정하고 방위각을 270도 고정한 후 나셀을 정서 방향으로 향하게 한다. 이때 0~1.4톤의 하중을 0.1톤의 간격으로 수직 하방 방향으로 하중을 부가한다.

(2) 날개의 피치각을 90도로 조정하고 방위각을 270도로 고정한 후 나셀을 정서 방향으로 향하게 한다. 이때, 0~0.8톤의 하중을 0.1톤의 간격으로 수평방향으로 하중을 부가한다.

(3) 날개의 피치각을 90도로 조정하고 방위각을 270도로 고정한 후 나셀을 정북 방향으로 향하게한다. 이때, 0~1.4톤의 하중을 0.1통의 간격

으로 수직 하방 방향으로 하중을 부가한다.

(4) 날개의 피치각을 90도로 조정하고 방위각을 270도로 고정한 후 나셀을 정북 방향으로 향하게 한다. 이때, 0~0.8톤의 하중을 0.1톤의 간격으로 수평방향으로 하중을 부가한다



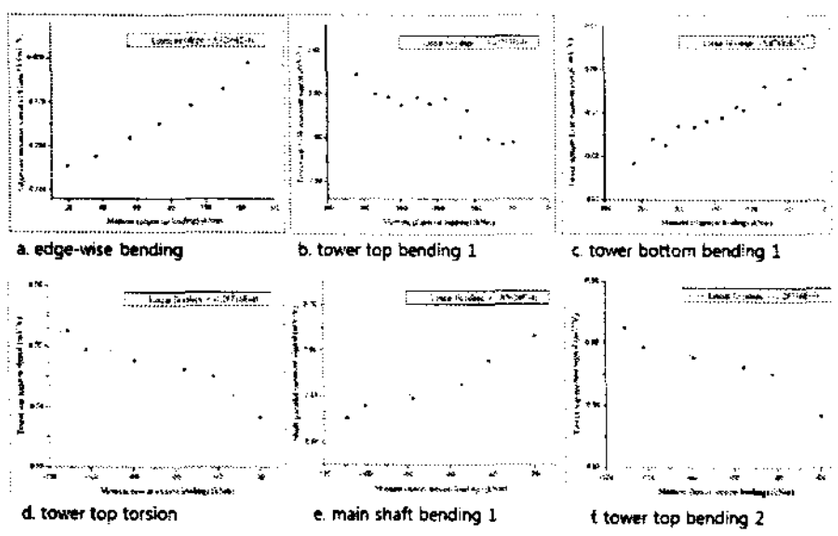
a. Installation of blade rig

b. Installation of load ceil

c. Loading of blade flap

Fig. 3 Mechanical calibration

위에서 설명한 방법으로 하중부가 시험을 한 결과가 그림 4에 나타나 있다.



a. edge-wise bending

b. tower top bending 1

c. tower bottom bending 1

d. tower top torsion

e. main shaft bending 1

f. tower top bending 2

Fig. 4 Experimental data of mechanical calibration

3. 기계적 하중측정

본 장에서는 하중측정 작업을 통하여 수집한 데이터를 캡쳐메트릭스(capture matrix)를 이용하여 분류하고 하중통계(load statistics), 주파수 해석(frequency analysis),등가하중(equivalent load), 하중 스팩트럼(load spectrum) 등의 해석결과를 소개한다.

3.1 하중 통계

측정된 시계열 데이터를 풍속 1m/s 및 난류강도 2%의 빈(bin)으로 분류한다. 표2에 캡쳐메트릭스를 작성한 결과가 나타나 있다. 이때 풍향 측정영역(measurement sector)외에 데이터, 10분 이하의 데이터 셋, 발전기 오류가 발생 했을 때 데이터 등을 제외시키고 작성해야 한다.

Table 2 Capture matrix

Bin	TI / WS		0 3	3 5	5 7	7 9	9 11	11 13	13 15	15 17	17 19	19 21	21 23	23 25	25 27	27 29	29	tot
1	0	2.5	7	-	-	1	-	12	13	19	17	10	8	6	6	7	33	139
2	2.5	3.5	-	-	-	1	14	36	14	14	2	1	1	2	3	-	4	91
3	3.5	4.5	-	-	1	10	7	-	2	-	1	2	2	-	1	-	-	26
4	4.5	5.5	-	-	-	6	7	13	9	9	6	6	3	2	1	-	1	63
5	5.5	6.5	-	-	6	14	16	20	12	14	11	5	4	5	1	-	1	109
6	6.5	7.5	-	1	4	13	19	13	16	15	13	7	12	3	3	2	-	121
7	7.5	8.5	-	3	14	24	11	11	22	9	15	8	5	-	2	1	-	125
8	8.5	9.5	-	-	10	24	12	10	17	12	16	9	2	1	-	1	-	114
9	9.5	10.5	-	1	10	10	3	11	21	9	2	3	2	1	-	1	-	74
10	10.5	11.5	-	-	-	1	8	7	7	6	6	2	1	-	-	-	-	38
11	11.5	12.5	-	-	-	1	4	7	8	3	3	-	1	-	-	-	-	27
12	12.5	13.5	-	-	-	-	5	8	4	1	1	1	1	-	-	-	-	21
13	13.5	14.5	-	-	-	1	7	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	14
14	14.5	15.5	-	-	-	1	9	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	16
15	15.5	16.5	-	-	-	2	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
16	16.5	17.5	-	-	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	3
17	17.5	18.5	-	-	-	-	2	-		-	-	-	-	-	-	-	-	2

그림 5는 대표적으로 날개의 플랩하중에 대하여 2장에서 구한 보정계수(calibration factor)를 적용해서 얻은 하중정보를 평균, 최소, 최대, 표준편차의 형태로 나타낸 것이다.

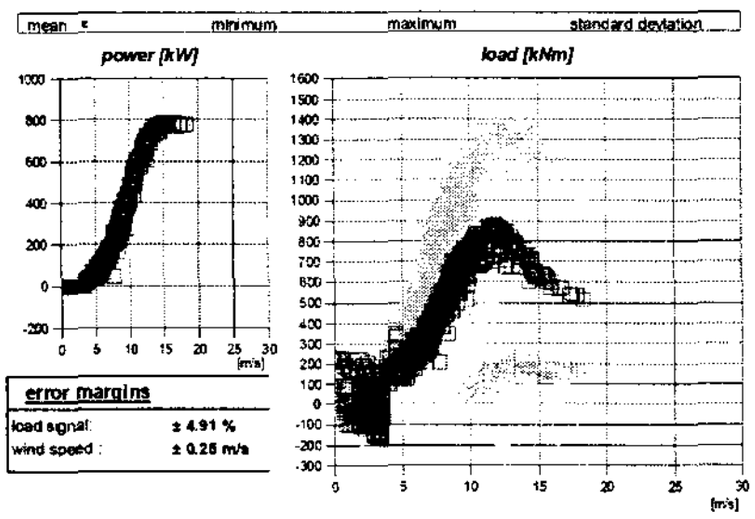


Fig. 5 Load statics

그림6은 대표적으로 풍속이 각 4, 8, 12m/s일 때 날개의 플랩방향 하중에 대한 시계열데이터를 30초 동안 나타낸 것이다.

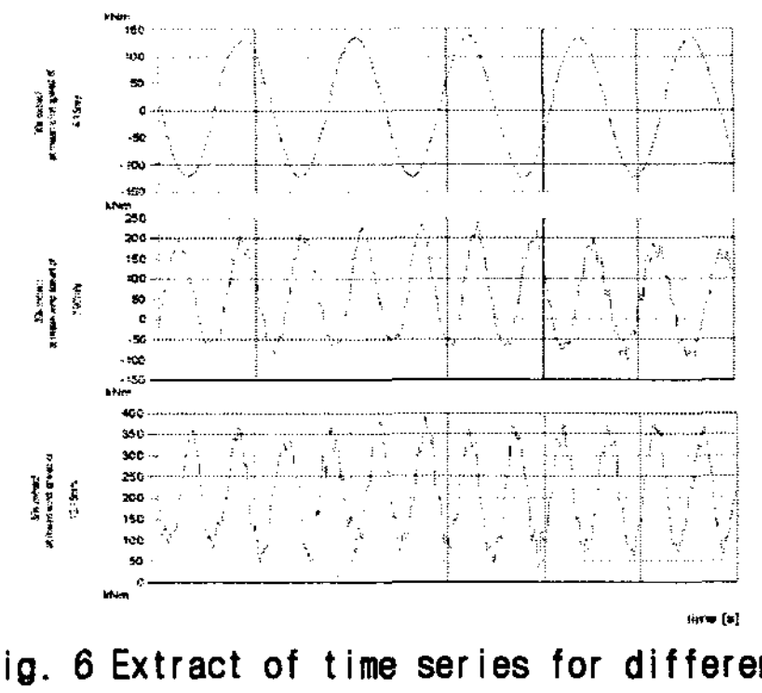


Fig. 6 Extract of time series for different wind speeds

3.2 등가 하중

등가하중은 다양한 작동조건에서 발생하는 피로피해를 직접적으로 비교를 할 수 있게 해주기 때문에 널리 사용하는 방법이다. 주어진 10분 하중 데이터의 피로하중 측정은 식(1)에서처럼 등가하중(L_{eq})과 등가 사이클 횟수(N_{eq})에 의해 간

단히 설명 될 수 있다. 또한 주어진 범위 내에서 데이터는 동일한 피해를 주는 하중으로 가정된다. 여기서는 등가 사이클의 횟수를 600으로 계산을 했으며, 소재의 특성을 대표하는 S-N 곡선의 기울기(m)는 각 4, 8, 12로 계산하였다.

$$L_{eq} = \left[\frac{\sum R_i^m \cdot n_i}{N_{eq}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

그림 7은 날개, 주축, 타워 등에서 측정한 하중데이터를 이용해서 계산한 등가하중의 결과를 나타낸다.

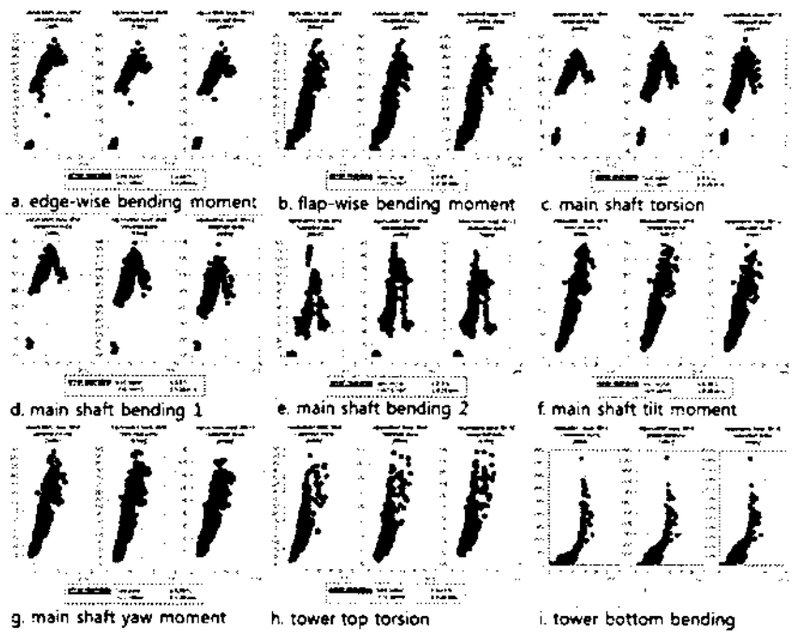


Fig. 7 Equivalent load

3.3 하중 스펙트럼

풍력터빈 수명에 대한 하중 스펙트럼을 구하기 위해서 레인플로우 카운팅 방법(Rainflow Counting Method)을 사용한다. 각 10분 단위의 시계열 데이터에서 최소(valleys),최대(peaks) 값 들을 루프(loop)로 구성하고, 루프를 구성하지 못한 시계열 데이터들 절반 사이클(half cycle)로 간주한다. 시계열 데이터를 평균응력과 반복 응력의 60개 빈으로 분류한다. 각 빈에서 사이클의 횟수(number of cycle)를 다음의 풍속분포(wind speed distribution)에 곱한 하중 스펙트럼의 결과가 그림8에 나타나 있다.

(1) 레일리 풍속분포(평균풍속이 4m/s일 때)
(2) 레일리 풍속분포(평균풍속이 7m/s일 때)
(3) 레일리 풍속분포(평균풍속이 10m/s일 때)
(4) 와이블 풍속분포(k=2, A=9.59)

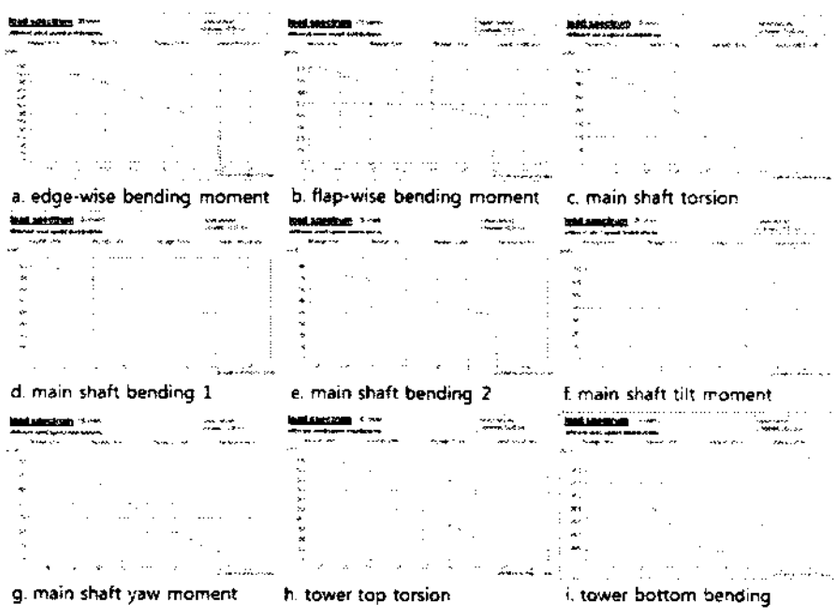


Fig. 8 20 years load spectrum for different wind speed distribution

3.4 주파수 해석

풍력발전기의 운동적 거동 특성을 파악하기 위해 주로 사용하는 방법이 시계열 데이터의 주파수 해석이다. 주파수 분석결과를 발전기 설계시 고유진동수(natural frequency) 비교를 통해 설계 검증을 할 수 있다. 그림9는 대표적으로 풍속이 4, 8, 12m/s에서 날개의 플랩방향 하중데이터를 주파수 해석 한 결과를 나타낸다.

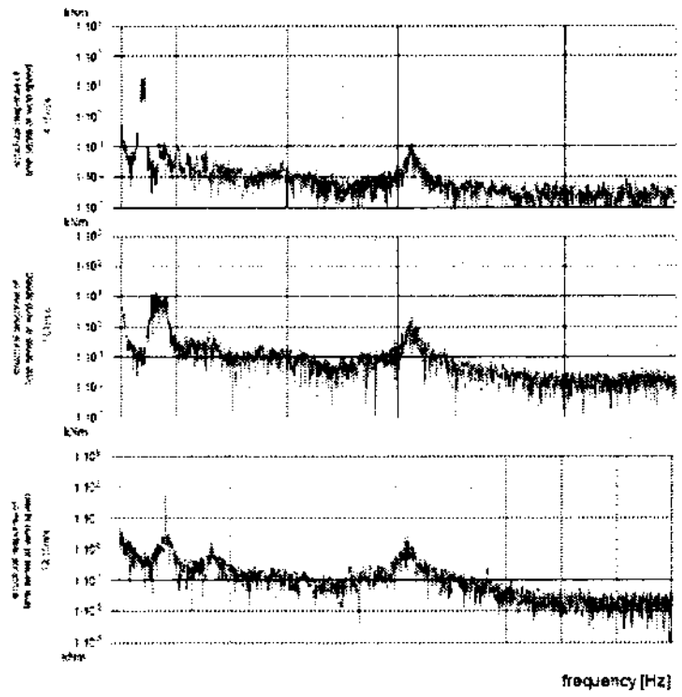


Fig. 9 Frequency analysis for different wind speeds

4. 결 론

본 연구에서는 IEC61400-13 규격에 따라서 국산 개발된 U50 풍력발전기의 날개, 타워, 주축 및 타워에 계측장비를 설치하고 하중을 측정하여, 하중통계, 등가하중, 하중 스펙트럼 및 주파수 분석을 수행하였다.

현재 측정하중 결과를 설계하중과 비교·분석 중에 있으며, 지금까지의 결과로는 유사한 것으로 나타났다. 향후에는 이에 대한 세밀한 분석을 수행하여 시스템 최적화를 위한 기초자료로 활용할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 시행한 에너지자원 기술개발사업(과제명:750kW Gearless형 국산화 풍력발전시스템 실증연구)의 일환으로 수행되었으며, 에너지관리공단의 지원에 감사드립니다.

References

[1] Holger Soker, Martina Damaschke, 2006, "A guide to design load validation", Deutsches Windenergie-Institut GmbH
[2] Sutherland, H.J., 1990, "On the fatigue analysis of wind turbines," Sandia National Laboratory
[3] WINDTEST, Load measurement on the UNISON U50 at Kangwon province in Korea, WT5944/07, September 2007
[4] "IEC 61400 13 : Wind turbines", International Organization for standardization, part 13 measurement of mechanical loads