

수평축 풍력발전기의 Blade 동특성분석에 관한 연구

A Study on the Dynamic Characteristic Analysis of the Horizontal Axis Wind Turbine System Blade

손충렬* · 변효인** · °박명우** · 류지윤***

Choong-Yul Son, Hyo-In Byun and Myung-Woo Park

Key Words : Wind Turbin(풍력발전기), Rotor(날개), Vibration Test(진동실험), F.E.M Analysis(유한요소해석)

ABSTRACT

The purpose of this paper is that investigates the dynamic behavior characteristic of W.T.S(Wind Turbine System) and carries out the evaluation analysis during operating W.T.S. To investigate the dynamic behavior characteristic of W.T.S, the experiments to measure vibration of the blade from the attached accelerometer on the flap and edge section of the blade that is one of the most important elements of dynamic characteristic of W.T.S are performed. Natural frequency and mode shape are calculated with commercial program (STAR MODAL) using the measured vibration acceleration that receives the signal with F.F.T Analyzer from the accelerometer. For validation of these experiments, the finite element analysis is performed with commercial F.E.M Program (ANSYS) on the basis of the natural frequency and mode shape. The results indicate that experimental values have good agreements with the finite element analysis.

1. 서론

일반적으로 충격, 왕복운동, 저/고속회전 기계의 운전으로 인한 동적하중을 받는 구조물의 설계 및 해석은 구조역학 뿐 아니라 기계진동, 구조동역학 등의 상호 관련된 문제이며, 운전성능 확보, 작업환경 개선 및 환경영향 개선, 구조물의 구조적 안전도 확보 등의 목적으로 동적하중으로 인해 진동을 발생시키는 기계·구조물의 설계 과정에서는 설계가 만족스러운 지의 여부를 판별할 수 있는 수단을 제공하는 엄격한 설계기준의 설정이 필요하다. 일반적으로 동하중으로 인해 진동하는 기계·구조물의 설계시에는 다음과 같은 제반사항의 만족여부를 설계기준에서 고려해야 한다.

- 기계 및 구조물의 진동에 의한 손상여부
- 기계 자체의 진동으로 인한 손상이나 성능 상실 여부
- 인접 기계의 성능 손상 여부

· 기계 및 구조물에 지나친 유지보수 발생 여부

이상과 같은 사항을 평가하기 위해서는 기계, 구조물의 진동의 효과에 관한 정확한 지식과 정보가 요구되며, 이에 따른 합리적인 제반 설계 기준의 설정이 필요하다.

풍력발전 시스템은 변화하는 바람(fluctuating winds)에 노출되어 있으며, 변화하는 힘을 받는다. 회전 날개와 같이 반복되는 힘을 받는 요소들에는 극단적으로 요소의 파괴로까지 발전할 수 있는 돌발적인 갈라짐(crack)이 발생할 수 있다. 따라서, 풍력 발전 시스템을 설계할 때 각 부품들이 개별적 진동과 조립완료 후의 진동이 어느 정도인지 미리 영향을 계산하는 것은 매우 중요한 일이며, 각 요소들의 고유 진동수를 파악하는 것은 풍력 발전 시스템이 설계 범위를 벗어나 운전 효율의 상실 및 구조적 안정성을 유지하는 것이 매우 중요한 일이다.

본 연구에서는 풍력발전 시스템의 동적 거동 특성을 분석하기 위해 주요 요소인 날개의 진동 실험을 수행하였으며, 실험결과를 유한요소 해석결과와 비교·분석하여 본 논문에 제시하였다. 실험은 비교적 용이한 충격 가진법을 이용하여 수행하였으며, 구조물의 가진에 의해 발생된 신호를 진동신호 분석기인 F.F.T Analyzer 및 modal analysis program STAR BASE를 사용하여 실험 결과

* 정희원, 인하대학교 선박해양공학과
E-mail : soncy@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7338, Fax : (032) 864-5850

** 인하대학교 선박해양공학과 대학원

*** 유니슨기술연구소 연구원

를 분석하였다.

2. 진동계측실험

2.1 실험모델

본 연구에서 사용된 실험모델은 풍력발전기 날개로 제작·사용되는 (a)LW-750, (b)CHO-750, (c)New-typ 세가지이다. (b) CHO-750 실험모델에 대한 물성치와 Dimension은 Table. 1과 같다.

Table. 1 Mechanical property & dimension of CHO-750

- Dimension

Rotor speed	variable, 15 ~ 35rpm
Material	Glass fiber reinforced epoxy
Blade length	23.3m
Root chord length	2.3m
Tip chord length	0.5m
Twist angle	12°

- Mechanical Property

항 목		재 료	
		GNR-630 (UD)	DB-800 (±45°)
Tensile	Strength(MPa)	4693.9	77.9
	Modulus(GPa)	29.3	7.65
Compression	Strength(MPa)	413.5	87
	Modulus(GPa)	-	-
Flexural	Strength(MPa)	646	195
	Modulus(GPa)	-	-
ILSS(MPa)		40	15.2

2.2 실험장치구성 및 계측방법

실험장치의 간략한 계통도는 Fig. 1과 같고, 본 실험에 사용된 장비들과 상용 프로그램 등의 제반사항은 다음 Table. 2와 같다.

Table. 2 Vibration tester and analyzer

기기명	제조회사	모델
Accelerometer (charge type)	B&K	8318
	B&K	4378s
Pre Amplifier	B&K	2813
	B&K	2635
FFT analyzer	B&K	3550
Tape recorder	Sony	PC204A
STAR	B&K	STAR BASE

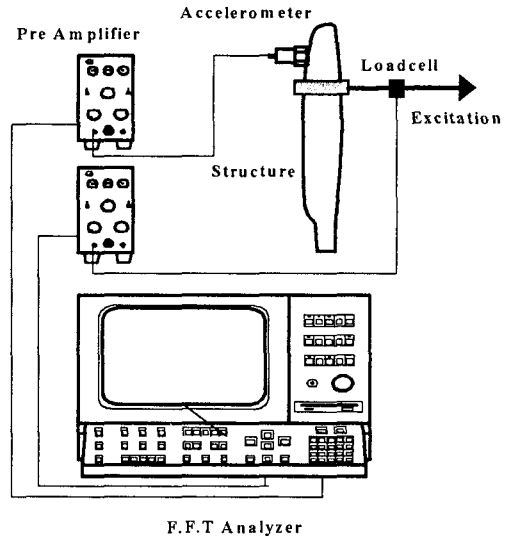


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

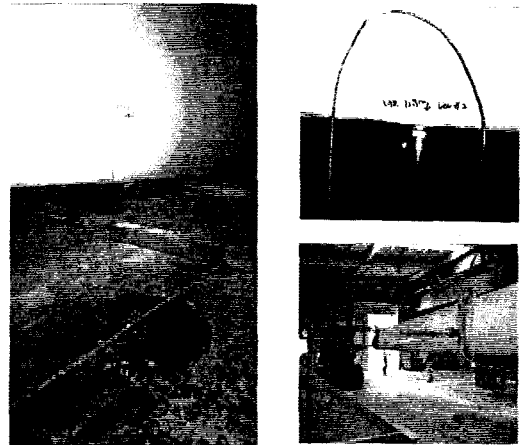


Fig. 2 experimental setup

Fig. 2는 실험장비들을 이용하여 구조물에 장착한 실험 셋팅 모습이다. 본 실험에서는 크게 실험 대상물, 대상물에 가진력을 주어 진동을 일으키게 하는 가진부, 가진력과 응답을 측정하는 신호 검출 및 증폭부, 검출된 신호를 습득하여 분석하는 신호 분석부로 나누었다. 구조물의 경계 조건은 지그에 날개의 허브끝 부분을 볼트로 체결하여 구현하였다. 특히 실험 대상물이 대형 구조물이기 때문에 가진기를 사용하기는 여러 가지 난점들이 있었으며 충격하중을 사용한 미 부착형 가진 방법을 채택하여 실험하였다. 시험대상물을 케이블로 매어 잡아당겼다가 놓

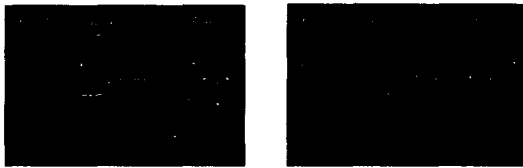
는 방법으로 구조물에 가진력을 주었으며 그 때 구조물에 전달된 가진력을 로드셀로부터 측정하였다. 응답 측정은 고정응답 방법을 사용하여 날개의 한 flap(플랩) 부분과 edge(끝) 부분에 가속도계를 고정하여 진동가속도를 측정하였다. 계측된 진동가속도는 가속도계로부터 F.F.T Analyzer로 신호를 받아 분석하였으며, 상용 Modal 해석

프로그램인 STAR BASE를 이용하여 Mode 형상을 구하였다.

3. 실험 Data 및 결과 분석

3.1 F.F.T Analyzer에 계측된 FRF(Frequency Response Function)

주파수 분석기(F.F.T Analyzer)는 구조물에 가해진 가진력과 구조물의 응답을 검출한다. 가속도계(Sensor)에서 검출된 신호를 증폭기에서 전하(Electric Charge) 형태의 신호로 증폭·변환하여 분석기에서 처리하였다. 주파수 분석기로 검출되어 증폭된 신호를 습득하여 신호처리 기법을 이용하여 결과를 분석하였으며, 이때 주파수 분석기(F.F.T Analyzer)는 데이터 습득기능, 습득된 Data를 이용하여 신호분석을 하는 신호 처리 기능, 습득 및 처리된 신호를 화면에 나타내는 모니터 기능등을 하였다.



<Flapwise F.R.F> <Edgewise F.R.F>

(a) LW-750



<Flapwise F.R.F> <Edgewise F.R.F>

(b) CHO-750



<Flapwise F.R.F>

<Edgewise F.R.F>

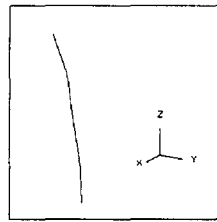
(c) New Type

Fig. 3 Model Blade Signal

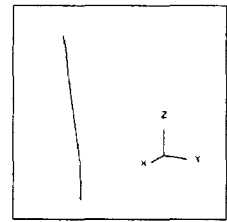
Fig. 3은 주파수분석기를 통하여 푸리에 변환되어 얻어진 각 실험모델의 주파수응답함수를 나타낸다.

3.2 응용소프트웨어(STAR MODAL)에 의한 고유진동수 및 Mode Shape

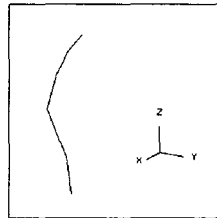
습득 및 푸리에 변환된 신호의 후처리를 담당하는 응용부는 분석기와 정보 교환이 가능하도록 인터페이스 된 컴퓨터와 응용 소프트웨어(STAR BASE)로 구성하였으며, 주파수 분석기에서 처리된 신호를 받아서 고유진동수의 확인 및 날개의 Mode 형상을 확인하였다.



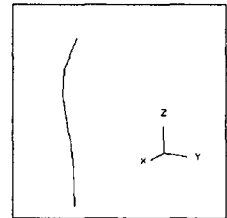
Flapwise 1.25 Hz



Edgewise 5.13 Hz

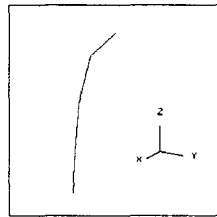


Flapwise 3.88 Hz

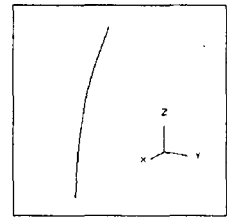


Edgewise 7.2 Hz

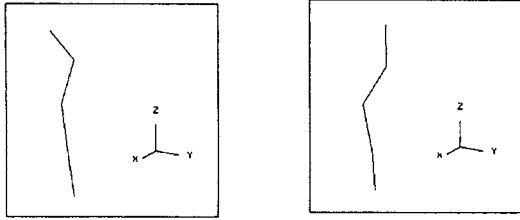
(a) LW-750



Flapwise 1.19 Hz



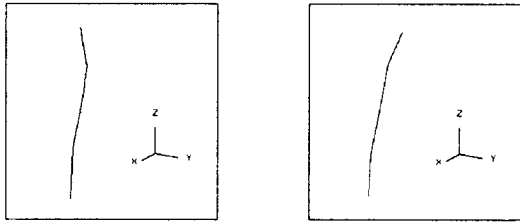
Edgewise 4.56 Hz



Flapwise 3.44 Hz

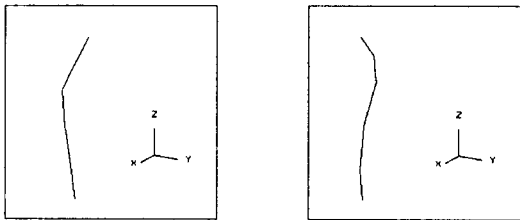
Edgewise 6.25 Hz

(b) CHO-750



Flapwise 1.25 Hz

Edgewise 6.5 Hz



Flapwise 3.69 Hz

Edgewise 7.43 Hz

(c) New-type

Fig. 4 Model Blade 1st, 2nd Mode Shape & Natural frequency

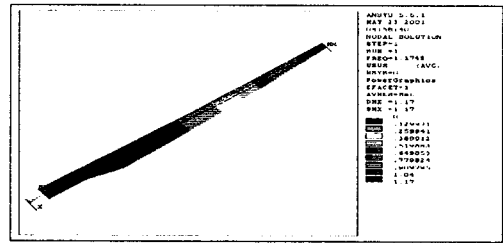
Fig. 4는 모드해석 프로그램인 STAR BASE로 구해진 각 실험모델 날개 (a), (b), (c)의 1차, 2차 Mode 형상 및 고유주파수를 나타낸 모습이다.

4. 유한요소해석

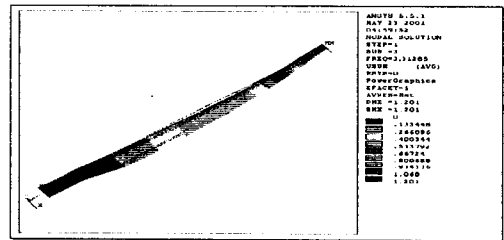
유한요소해석은 진동 실험의 결과에 대한 검증으로 수행되어 졌다. 실험모델 (b) CHO-750의 고유진동수 및 Mode 형상을 구하기 위하여 해석 Tool로는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 해석 결과를 실험에 의해 얻어진 구조물의 고유진동수 및 Mode 형상과 비교·검증하였다. 유한요소 모델링시 사용된 유한요소는 각 절점당 3개의 변위와 3개의 회전을 가지는 8절점 Layered Shell 요소를 사용하였고, 요소의 수는 2679개, 절점(node) 수는 2589개 이다. UX, UY, UZ를

구속하고 RX, RY, RZ 방향의 회전을 허용하는 방법으로 단순지지 경계조건과 복합재료로 구성된 Blade의 유한요소 모델을 구현하였다. 해석시 입력된 실험 모델의 재료 물성치와 Dimension은 Table. 1에 제시되어 있다.

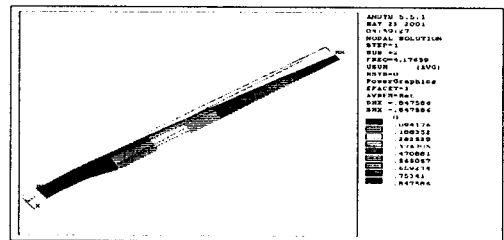
아래의 Fig. 5는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS에 의한 Mode 해석 결과를 나타낸다.



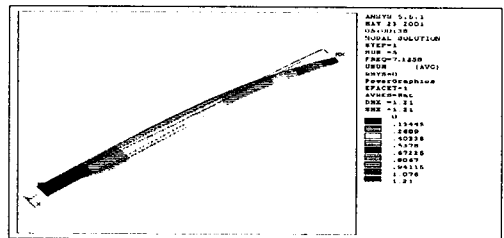
Flapwise 1st Mode 1.174 Hz



Flapwise 2nd Mode 3.312 Hz



Edgewise 1st Mode 4.176 Hz



Edgewise 2nd Mode 7.125 Hz

Fig. 5 CHO-750 Model Blade F.E.M Analysis

5. 날개의 동특성 해석 결과

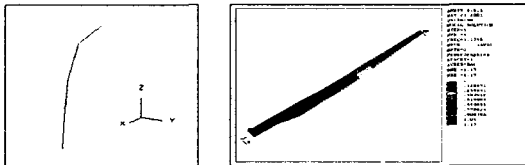
CHO-750 풍력발전 시스템 날개의 동특성 분석을 위하여 진동 계측 실험을 수행하였으며, 실험결과를 바탕으로 주파수 분석 및 Mode 해석을 통하여, 고유진동수 및 Mode 형상을 구하였다. 실험적으로 구하여진 결과는 상용 유한요소 해석 프로그램 ANSYS를 이용한 F.E.M 해석결과와 비교함으로써, 고유진동수 및 Mode Shape를 통하여 날개의 동특성을 파악하였다. 동적 특성 분석 결과 실험과 유한요소해석을 통한 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며, 그 결과로 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) CHO-750 Blade의 Flapwise 및 Edgewise의 1, 2차 고유 진동수를 구하였으며, Table. 2에서는 실험결과와 유한요소해석 결과가 잘 일치하는 것을 보여준다.

Table. 2 Comparison Exp.Results & F.E.M Results

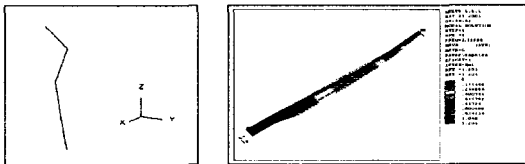
CASE Mode No.	Experiment	F.E.M
Flapwise 1st Mode	1.19 Hz	1.174 Hz
Error(%)	1.3%	
Flapwise 2nd Mode	3.44 Hz	3.312 Hz
Error(%)	3.7%	
Edgewise 1st Mode	4.56 Hz	4.176 Hz
Error(%)	8.4%	
Edgewise 2nd Mode	6.25 Hz	7.125 Hz
Error(%)	14%	

(2) (b) CHO-750 날개의 Flapwise 및 Edgewise의 1, 2차 Mode에 대한 Mode 형상을 구하였으며, 실험결과와 유한요소해석 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.



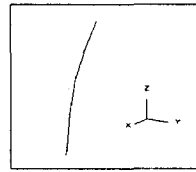
Flapwise 1.19 Hz

Flapwise 1st Mode 1.174 Hz



Flapwise 3.44 Hz

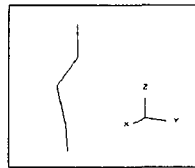
Flapwise 2nd Mode 3.312 Hz



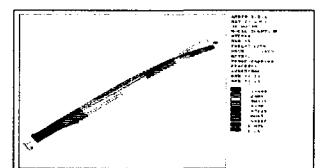
Edgewise 4.56 Hz



Edgewise 1st Mode 4.176 Hz



Edgewise 6.25 Hz



Edgewise 2nd Mode 7.125 Hz

Fig. 6 Comparison Mode Shape Exp. Results & F.E.M Results

Fig. 6은 실험결과와 유한요소해석 결과의 모드 형상 비교를 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 750kW급 수평축 풍력발전 시스템의 복합재 회전 날개의 동특성 분석 연구를 수행하였다. 진동 실험과 유한요소해석을 통하여 해당 고유진동수에 대한 진동모드 해석을 하였으며, 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 본 실험결과를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 750kW급 수평축 풍력터빈 복합재 날개의 진동 특성 및 해석 절차를 확립하였다.
2. 동특성 분석을 통하여 Blade의 고유진동수와 (b) CHO-750 풍력발전 시스템의 정상 운영 속도(15~35 rpm : 0.25~0.58HZ)에 의한 기진력이 서로 공진이 없음을 확인하여, 구조물의 안정성을 입증하였다.
3. 본 연구의 수평축 풍력발전 시스템의 복합재 회전 날개의 동특성 분석 결과 자료는 풍력 발전 시스템의 국산화 개발 기술의 응용에 활용 될 것이다.

참고 문헌

- (1) Germanisher Lloyd., 1999, "Regulation for the Certification of Wind Energy Conversion System".
- (2) David A. Spera., 1995, "Wind Turbine

Technology" , ASME Press.

(3) Kenneth G. McConnell., 1995, "Vibration Testing" , JOHN WILEY & SONS, INC.

(4) R. B. Randall., 1977, "주파수 분석" , Bruel & Kjaer.

(5) IEC., 2000, "Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades for WTG" .

(6) M. C. Cheney., 1999, "Analysis and Tests of Pultruded Blades for Wind Turbine Rotors" , National Renewable Energy Laboratory.

(7) M. O. L. Hansen., 2000, "Aerodynamics of Wind Turbines" , JAMES & JAMES.

(8) R. Harrison., 2000, "Large Wind Turbines" , JOHN WILEY & SONS,LTD.

(9) Ronald F. Gipson., 1994, "Principle of Composite Material Mechanics" , McGraw-Hill,Inc., p.1-61.