

복합재료 FRP로 제작된 Rotor Blade 진동특성 분석에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Vibrational Characteristics of the Rotor Blade with Fiber Reinforced Plastics

손충렬* · 변효인** · 백진성*** · 신중연**** · 이정탁*****

C. Y. Son, H. I. Byun, J. S. Paik, J. Y. Shin and J. T. Lee

Key Words : Natural Frequency(자유진동수), Resonance(공진), Glass Fiber Reinforced Plastic(유리 섬유 강화 플라스틱), Finite Element Method(유한요소법), Beam Theory(보 이론), The static deflection(정적처짐), Blade element theory(블레이드 요소이론), Fast Fourier Transform Analyzer(주파수분석기)

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 (ANSYS) 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. 서 론

풍력발전시스템(Wind Turbine System)은 우리 주변에 존재하는 바람에너지를 전기적 에너지로 변환하는 각광받고 있는 대체에너지 기술로써 자원의 무한정성, 에너지의 청정성 그리고 기술의 범용성을 장점으로 지닌 미래 지향적인 기술 중의 하나이다.

풍력발전시스템(Wind Turbine System)은 크게 바람에너지를 기계적 에너지로 변환하는 기계 장치부와 이렇게 변환된 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 전기 장치부 그리고 시스템의 작동성을 제어하는 제어 장치부로 구성된다.

바람에너지를 기계적 에너지로 변환하는 구성 요소 중의 하나인 블레이드(Blade)는 에너지를 변환하는 1차적 요소로써 풍력발전시스템에서 핵심기술요소 중의 하나이다. 이러한 블레이드는 복합재료인 FRP(Fiber Reinforced Plastics)로 제작되어지는데 국내에서 제작되어진 블레이드의 경우 시험 평가에 대한 Data가 부족한 상태이다.

블레이드에 대한 시험 평가 중의 하나인 Modal Test는 복합재료로 만들어진 블레이드의 동특성(Dynamic Behavior)을 분석하는 방법의 일종으로 블레이드 자체의 고유진동수(Natural Frequency) 파악과 Mode Shape에 대한 진동현상을 예측하여 요소에 의해 발생하는 진동수와 고유진동수가 일치하여 발생할 수 있는 공진(Resonance)을 피하고자 함이다.

국내의 경우, 풍력발전시스템에 대한 연구가 몇몇 대기업과 중소기업 그리고 연구소에서 활발히 진행되고 있으나 체계적인 Data 확보가 불가능하였으며, 선진국에 비해 연구되어야 할 분야가 상당히 많으므로 이에 대한 체계적인 연구가 요구되어지는 상태이다. 이에 블레이드에 대한 Modal Test

* 인하대학교 기계공학부 정교수
E-mail : soncy@inha.ac.kr

Tel : (032)860-7338, Fax : (032)864-5850

** 유니슨 R&D 센터 기술연구소 연구원

*** 인하대학교 선박공학과 대학원

**** 인하대학교 선박공학과 대학원

***** 인하대학교 선박공학과 대학원

를 실시하게 되었으며 앞으로 블레이드의 굽힘 실험 (Bending Test)도 실시할 예정이다.

2. 진동계측 실험

2.1 실험 모델

본 실험 연구에 사용된 블레이드(Blade)는 현재 제주도 월령 풍력발전 단지내에서 운용중인 10Kw급 풍력발전시스템의 날개이다. 실험에 사용된 블레이드는 같은 원자재, Layer배열, 물성치(Material Property)를 갖는 블레이드를 측정하였으며, 블레이드의 제작이 많은 수작업을 요구하므로 이에 대한 제작상의 동일성을 확보하기 위해서 2개의 블레이드를 측정하였다.

(1)항 블레이드의 치수 (Basic Dimension of Blade)

Table 1. Basic Dimension of Blade

항목	치수
Rotor Speed (rpm)	variable, 120~170
Material	Fiber Reinforced Plastic
Blade Length (m)	3.4
Root Chord Length (m)	0.34
Tip Chord Length (m)	0.06
Twist Angle (degree)	15
Blade Weight (kg)	38.2
Blade Area (m ²)	2.4
Blade Density (kg/m ³)	1500

(2)항 실험에 대한 전체적인 Work Flow

블레이드에 대한 동적 거동(Dynamic Behavior)을 규명하기 위한 실험은 일정한 신호(Signal)를 주는 가진기(Exciter)에 의해 블레이드를 가진 시킨 후, 그 신호를 받은 블레이드가 응답하는 신호를 주파수분석기(Fast Fourier Transform)을 이용하여 Frequency Response Function으로 블레이드의 진동특성을 분석하는 것이다. 이때 범용 Package 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 블레이드에 대한 진동특성을 함께 분석하여 블레이드의 모드현상(Mode Shape)과 고유진동수(Natural Frequency)를 분석한다. 그리고 실험에 의한 Data와 이론 구조해석에 의한 Data를 비교·분석하여 블레이드에 대한 동특성(Dynamic Behavior)을 규명하게 된다. 실험에 대한 전체적인 Work Flow는 다음의 Fig.1과 같다.

2.2 실험장치구성과계측방법

Fig.2에서의 실험에 대한 계통도에서처럼 2개 채널의 25kHz 입력단자와 1채널의 발생단자를 가지고 있는 B&K사의 Type 3550 F.F.T 주파수 분석기와 Type 2635 Pre

Amplifier, Type 2706 Power Amplifier, Type 4809 Vibration Exciter, Type 8200 Force Transducer, Type 4370 Accelerometer를 사용하여 가진력에 의한 F.R.F(Frequency Response Function)를 측정하였다.

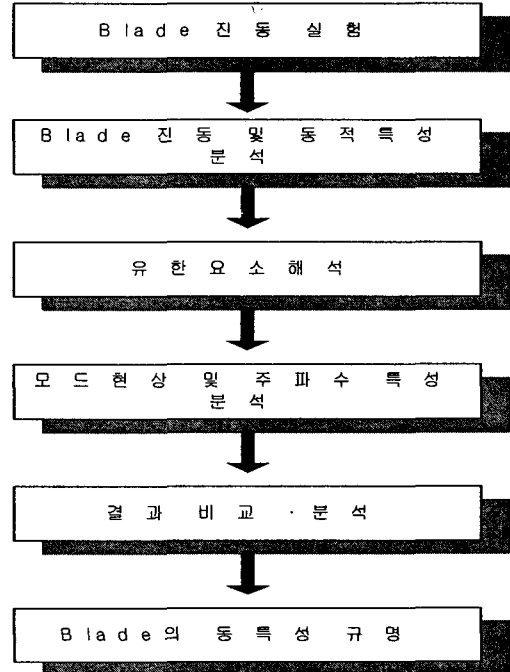
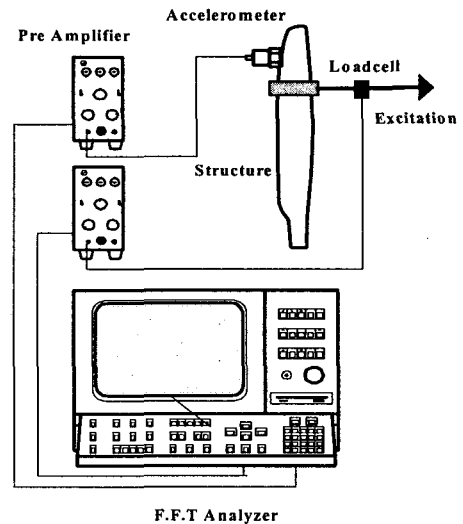


Fig.1 실험에 대한 전체적인 Work Flow



F.F.T Analyzer

Fig.2 실험 계통도

본 실험에서는 크게 실험 대상물, 대상물에 가진력을 주어 진동을 일으키게 하는 가진부, 가진력에 의한 신호응답을 측

정하는 신호 검출 및 증폭부, 검출된 신호를 습득하여 분석하는 신호 분석부로 나누었다. 구조물의 경계조건(Boundary Condition)은 Fixture에 블레이드 허브의 끝 부분을 볼트로 체결하여 구현하였다. 특히 실험 대상물이 비선형성(Nonlinear)을 가지는 재료로 구성되어 있으며, 블레이드 자체의 곡률이 심하여 가진 위치 선정의 어려움이 있었으나 곡률이 있는 부분의 가진을 정확하게 하기 위해서 가진기(Exciter)에 방향성을 줄 수 있는 지그를 제작하여 곡률이 있는 부분에서의 가진을 할 수 있었다.

다음의 Fig.3 그림은 블레이드의 Lower Face의 곡률이 있는 부분의 가진을 원활하게 수행하기 위해 가진기(Exciter)에 방향성을 고려한 지그를 부착하여 측정한 모습이다.

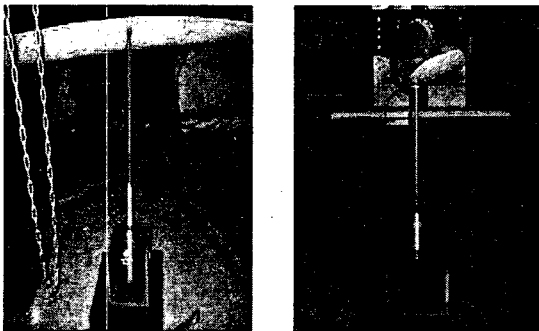


Fig.3 가진기(Exciter)에 방향성을 주는 지그의 모습

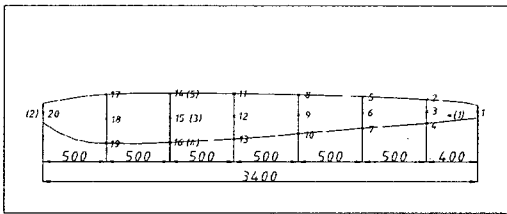


Fig.4 Measurement Point & Exciter Location, ()는 가진기의 위치

3. 블레이드진동실험

3.1 F.F.T분석기에계측된FrequencyResponseFunction

주파수분석기(Fast Fourier Transform Analyzer)는 구조물에 가해진 가진력과 그 가진에 의해 구조물이 응답하는 신호(Signal)를 검출하게 된다. 가속도계(Accelerometer)에서 검출된 신호를 증폭기(Pre Amplifier)에서 전하(Electric Charge) 형태의 신호로 증폭·변환하여 분석기에서 분석하게 된다. 주파수 분석기로 검출되어 증폭된 신호를 습득하여 신호처리 기법을 이용하여 결과를 분석하였으며, 이 때 주파수 분석기는 데이터 습득기능, 습득된 Data를 이용하여 신호를 분석하는 신호처리기능, 습득 및 처리된 신호를 화면에

나타내는 모니터 기능 등을 수행하게 된다. 다음의 Data는 주파수분석기에 검출된 Measurement Point 1~20까지 A, B Type의 블레이드에 대한 Frequency Response Function의 모습이다. (단, 가진기(Exciter)의 위치는 01번만 나타내었다.)

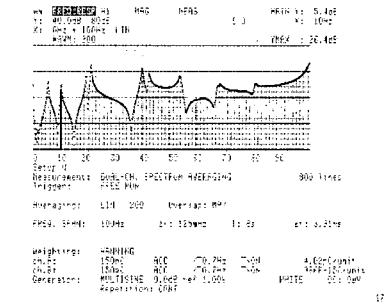
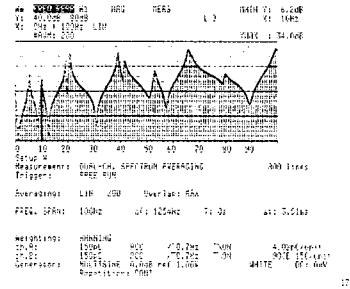


Fig.5 Type : A , Exciter Location : 01
Measurement Location : 01(좌), 02(우)

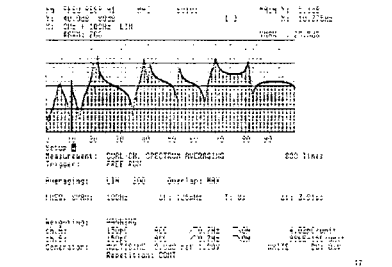
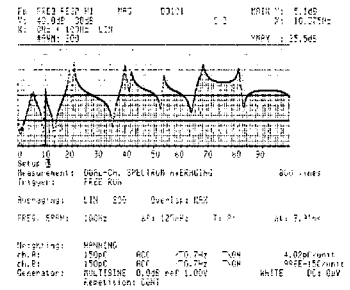


Fig.6 Type : B , Exciter Location : 01
Measurement Location : 01(좌), 02(우)

3.2 블레이드의 주파수 분석

위에서처럼 주파수 분석기에 의해 검출된 Frequency Response Function의 Data를 분석기내에서 Cursor Value의 형태로 저장하여 그 Data를 Techplot을 통해 도시한 후 블레이드에 대한 주파수 분석(Frequency Analysis)을 실시하였다.

(1)항 A,B Type의 비교분석 실시

블레이드는 원자재의 특성상 많은 수작업을 요구하게 된다. 이에 같은 원자재로 동일하게 만들어진 블레이드라 할지라도 동특성(Dynamic Behavior)에서 차이가 발생할 수 있으므로 이런 특성을 규명하기 위해서 2개의 블레이드에 같은 Point에 대한 진동 테스트를 실시하였으며, 이에 대한 주파수분석 결과가 일정하게 산출되는지를 비교·분석하였다. 다음의 비교·분석의 결과는 Fig.7와 같다.

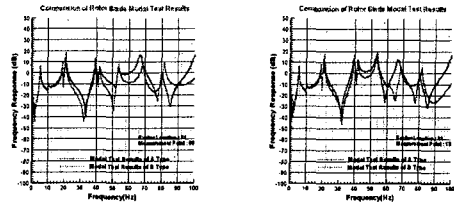


Fig.7 A-01 vs B-01

4. FEM(Finite Element Method) 해석결과

4.1 보(Beam)로 간주한 블레이드의 해석 결과

블레이드를 일정한 두께와 높이를 가지는 외팔보(Cantilever Beam)로 간주하여 블레이드의 자중(Self-Weight)에 의한 처짐(Deflection)과 모드형상 및 고유진동수를 예측해 보았다.

(1)항 블레이드의 자중(Self Weight)에 의한 처짐계산

블레이드의 자중에 의한 처짐을 범용 Package해석 프로그램인 ANSYS를 통하여 계산하였다. 자중에 의한 처짐의 결과는 Fig.8과 같다.

블레이드(Blade)에 자중에 의한 처짐 결과 제작된 블레이드는 자중에 의해 대략 11.0cm으로 계산되었다. 이는 블레이드의 이론 모드 해석 시 자중에 의해 동특성에 영향을 미치게 되므로 P-Stress를 고려해야 할 것으로 판단된다.

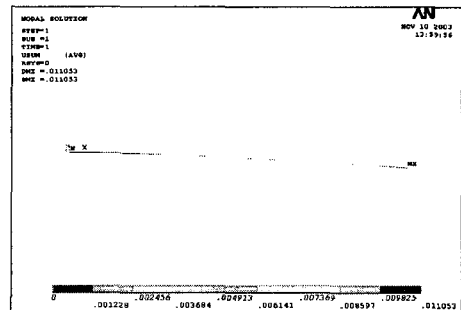
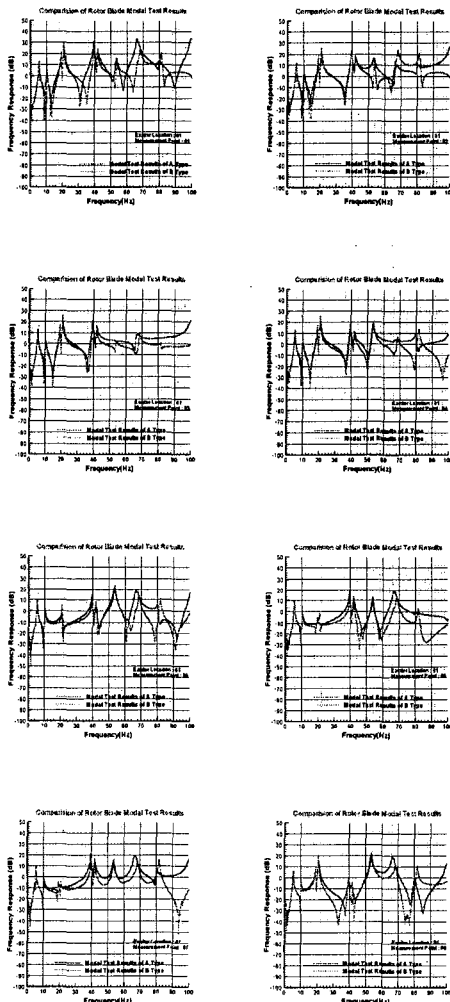


Fig.8 블레이드의 자중에 의한 처짐계산

(2)항 보(Beam)로 간주된 블레이드의 모드형상 및 고유진동수

위의 자중(Self Weight)에 의한 P-Stress를 고려하여 블레이드를 보(Beam)로 간주한 상태에서 모드형상 및 고유진동수를 ANSYS를 이용하여 계산하였다. 블레이드의 모드형상은 Fig.9~11와 같이 5차 모드까지 계산을 수행하였다.

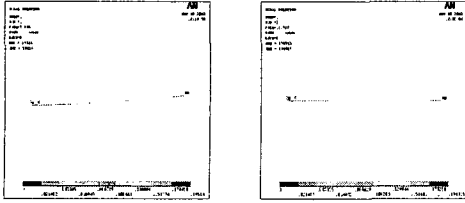


Fig.9 1차 모드(좌), 2차 모드(우)

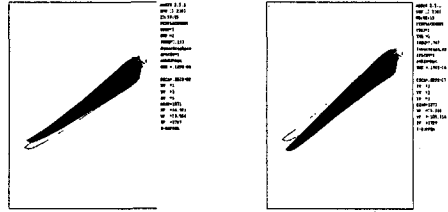


Fig.13 1차 모드(좌), 2차 모드(우)

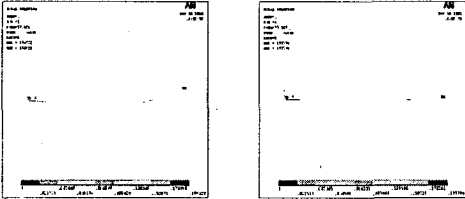


Fig.10 3차 모드(좌), 4차 모드(우)

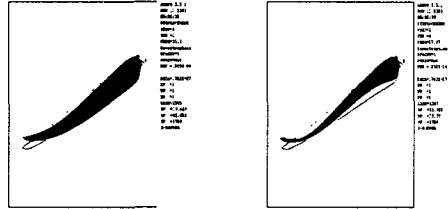


Fig.14 3차 모드(좌), 4차 모드(우)

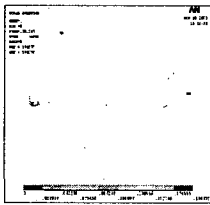


Fig.11 5차 모드

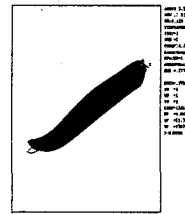


Fig.15 5차 모드

4.2 3-D 모델링을 통한 블레이드의 FEM 해석결과

블레이드(Blade)를 3-D 모델링(Modeling)을 통해 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 위에서 보 (Beam)로 간주하여 해석한 블레이드와 물성치(Material Property)는 같으며, 물성치 고려 시 방향성을 고려한 물성치 값을 대입하였으며, 모드형상은 Fig.13~15와 같이 5차 까지 해석 수행하였다.

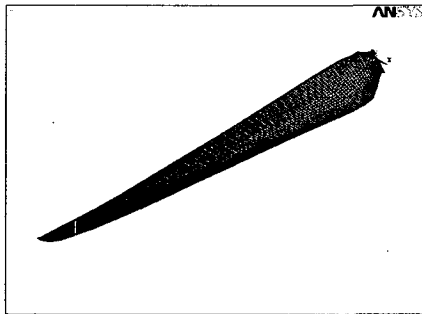


Fig.12 3-D Modeling Blade의 모습

4.3 실험결과와 FEM해석결과 비교 · 분석

다음의 Table 2.은 실험결과와 FEM 해석결과를 비교해 본 것이다. 실험을 통해 얻은 결과는 1~100Hz 사이의 Span에서 총 9개의 Peak Frequency가 측정되었다. 그러나 블레이드의 특성상 고주파영역보다는 저주파영역이 공진을 발생시킬 수 있는 구조상의 문제가 될 수 있으므로 FEM해석은 총 5개의 저주파영역의 모드를 설정하고 분석을 실시하여 Table 2.와 같은 결과값을 나타낸다.

Table 2. 결과 비교 · 분석

Mode	실험결과(Hz)	3-D Modeling(Hz)
1차	4.823	3.113
2차	10.25	5.767
3차	18.25	15.30
4차	21	27.87
5차	40	36.237

이 결과를 보면 1차 모드, 3차 모드, 5차 모드에서는 실험결과와 FEM해석결과가 유사한 것으로 판명되었다. 그러나 2차 모드와 4차 모드에서는 오차가 좀 크게 발생하였다. 이는 실험과정에서 블레이드를 매단 Fixture와 블레이드의 연결허브가 유사한 강성(Stiffness)을 가진 상태로 지지되어서 가진 시 Fixture의 성분이 어느 정도 블레이드의 진동특성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또 블레이드의 구조상 많은 곡률을 포함하고 있는데 이는 가진기와 연결된 Force Transducer 블레이드와 수직으로 닿아야 정확한 시그널이 나오는데 이를 극복하기 위해서 가진기(Exciter)에 방향성을 줄 수 있는 지그를 부착하여 실험을 수행하였음에도 불구하고 오차가 발생한 것으로 판단된다.

Beam으로 간주된 블레이드의 모드형상과 3-D 모델링을 통해 알아본 모드형상은 일치하였으며, 실험Data를 통해 본 것처럼 블레이드는 Bending과 Torsion에 작용력에 의한 모드형상을 가지는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 10kW급 풍력발전 시스템의 복합재 회전 날개의 동특성 분석 연구를 수행하였다. 진동실험과 유한요소해석을 통하여 해당 고유진동수에 대한 진동 모드 해석을 하였으며, 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 어느 정도 일치함을 확인하였다.

10kW급 풍력발전시스템 복합재 날개의 진동 특성 및 해석 절차를 확립하였다.

로터블레이드는 종횡비(aspect ratio)가 크기 때문에 굽힘 모드가 비틀림 모드보다 불안정한 요소를 포함하고 있으며, 이는 스펜방향으로의 강성을 증가시키는 것이 필요한 것으로 판단된다.

회전에 의한 원심력의 증가효과는 고유진동수를 증가시키는 것으로 계속되었다. 그러나 강성이 큰 비틀림 방향의 모드보다는 휨 모드의 고유진동수를 증가시키는 것으로 계속되었다. 회전에 의한 원심력의 증가효과는 고유진동수를 증가시키는 것으로 계속되었다. 그러나 강성이 큰 비틀림 방향의 모드보다는 휨 모드의 고유진동수를 증가시키는 것으로 계속되었다. 진동의 모드형상에 있어서는 날개 끝(tip)부분이 진동변위가

크며, 모드형상이 복잡하게 계속되었다. 이는 날개 끝 부분의 단면형상에 따른 강성의 저하로 인하여 진동변위가 크게 계속된 것으로 판단되며, 공력특성 및 피로성능 향상을 위한 진동제어가 요구된다.

참 고 문 헌

- (1) David A. Spera., 1995, "Wind Turbine Technology", ASME Press.
- (2) Germanisher Lloyd., 1999, "Regulation for the Certification of Wind Energy Conversion System".
- (3) IEC., 2000, "Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades for WTG
- (4) Kenneth G. McConnell., 1995 "Vibration Testing", JOHN WILEY & SONS, INC., New York.
- (5) M. C. Cheney., 1999, "Analysis and Tests of Pultruded Blades for Wind Turbine Rotors", National Renewable Energy Laboratory.
- (6) M. O. L. Hansen., 2000, "Aerodynamics of Wind Turbines", JAMES & JAMES.
- (7) R. B. Randall., 1997, "주파수 분석", Bruel & Kjaer.
- (8) R. Harrison., 2000, "Large Wind Turbines", JOHN WILEY & SONS. LTD.
- (9) Ronald F. Gipson., 1994, "Principle of Composite Material Mechanics", McGraw-Hill, Inc., pp.1-61.
- (10) 백진성, 1997, "알루미늄 하니컴 코어를 갖는 샌드위치 평판의 구조거동과 진동특성에 관한 실험적 연구" 인하대학교, 석사학위논문.
- (11) 정찬권, 1999, "Kevlar/Ep FRP Sandwich Plate의 판요소 두께에 따른 Fundamental Frequency 변화에 관한 연구" 인하대학교, 석사학위논문.
- (12) 박명우, 2001, "수평축 풍력발전시스템 Blade 동특성 분석에 관한 실험적 연구" 인하대학교, 석사학위논문.