

## F.R.P로 제작된 10kW급 소형 Rotor Blade의 특성 분석

### Analysis the 10kW-grade Rotor Blade with Fiber Reinforced Plastics

손 충 열\*                      김진훈\*\*                      신 중 연\*\*\*                      이 정 탁\*\*\*\*  
Son, Choong-Yul      Kim, Keon-Hoon      Shin, Jong-Yeon      Lee, Jung-Tak

#### ABSTRACT

Wind Turbines of big scale of modern stage are made of a part glass F.R.P. Carbon Reinforced Plastic and Kevlar can be used to reinforcement but those are not economical in big scale of Wind Turbines. In this study life sized 10kW-class Rotor Blade is made of F.R.P. which is high stiffness and good dynamic behavior characteristic for light weight. It is accomplished an experimental research of Bending analysis blade. Bending analysis blade are calculated with F.E. Analysis performed with commercial F.E.M program ANSYS. Finally, experimental research is compared with F.E. Analysis. The results indicate that experimental values have good agreements with the F.E. Analysis.

#### 1. 서    론

복합재료 풍력터빈 회전날개 구조설계에는 1980년 H. W. Gewehr 등이 대형 복합재 풍력터빈용 회전날개 개발 경과를 발표했고, 풍력터빈 동적 구조해석용 특수 목적 코드로 1993년 Lindenburg 등이 네델란드 에너지 연구소(ECN)에서 개발한 PHATAS-II가 있는데, 풍력터빈의 회전날개 및 타워의 동적변위, 응력 및 모달 해석 등에 사용되고 있다. 또한, 국내에서는 2000년에 한국화이바에서 중형급 풍력발전기의 로터시스템 중점 개발 연구를 수행하여 로터 블레이드의 공력해석 및 구조해석, 대형 복합재 구조물의 제조기술 및 시험평가 기술연구가 수행된 바 있다. 풍력발전 시스템(Wind Turbine System)의 구성요소 중의 하나인 블레이드에 대한 특성을 분석하기 위해서 (주)화신 FRP에서 제작하여 제주도 월령 풍력시험단지에서 가동 중인 풍력발전 시스템의 블레이드와 같은 1:1 비율의 실물 블레이드를 가지고 굽힘실험을 실시하였다.

대형 회전체의 구조물로서, 작용하는 하중을 지지하고 전달하는 구조적인 임무를 수행하며, 안정된 강도를 가지고 있어야 하는, 풍력발전기용 복합재료 로터 블레이드(Rotor Blade) 수치적 구조해석 및 구조시험을 통하여 복합재료의 우수한 성질을 실제 요구 분야에 적용하여 연관되는 연구에 도움을 주며, 복합재료로 구성되는 구조물의 응력해석 및 강도설계 방법을 얻고자 하였다. 또한 3차원 모델 유한요소 해석결과 및 이상화 된 보 유추 해석을 통하여 구조시험 결과와 비교, 검토함으로써 블레이드의 이상화 과정과 해석결과를 검증하였다.

- \*     정회원 · 인하대학교 기계공학 정교수
- \*\*    인하대학교 선박해양공학 박사과정
- \*\*\*   인하대학교 선박해양공학 석사과정
- \*\*\*\*   인하대학교 선박해양공학 석사과정

범용 Package 유한요소 해석프로그램인 ANSYS의 3-D 모델링을 통하여 블레이드의 굽힘 특성 분석을 하였고 이의 검증을 위하여 굽힘시험을 실시하였다.

## 2. 블레이드 제조

블레이드는 Fig. 1와 같이 독일 Feldman社의 10kW 풍력발전기의 익형을 사용하였으며, Laminate ply는 9장으로  $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ 로 대칭 적층하였다. 블레이드의 제작은 (주)화신 FRP에 의뢰하여 수적층(Hand lay-up) 방법으로 제작하였으며, 제원은 Table 1와 Table 2에 나타내었다. Fig. 1, Fig. 2는 블레이드의 형상 및 익형(Air Foil)을 보여주고 있다.

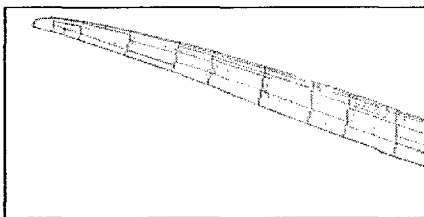


Fig. 1 로터 블레이드의 유한요소 모델

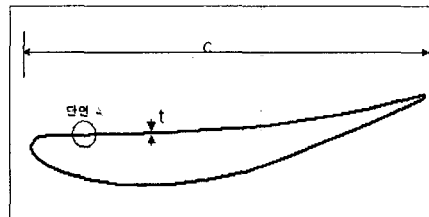


Fig. 2 블레이드의 익형

Table 1 블레이드 재료의 물성치

| $E_x$ [Gpa] | $E_y$ [Gpa] | $G_{xy}$ [Gpa] | $\nu_{xy}$ |
|-------------|-------------|----------------|------------|
| 9.71        | 9.07        | 4.77           | 0.419      |

Table 2 블레이드 적층 제원

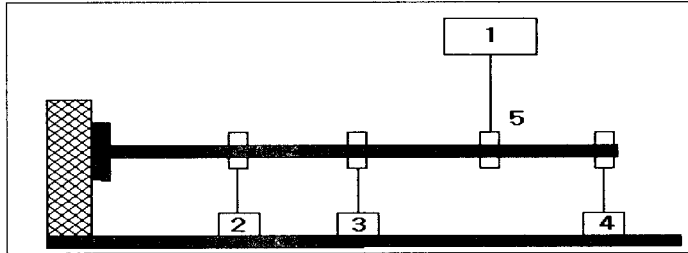
| Layer | Material | Thickness [mm] | 단위 면적당 중량 [kg] |
|-------|----------|----------------|----------------|
| 1     | M300     | 0.4            | 0.3            |
| 2     | LT600    | 0.7            | 0.6            |
| 3     | M300     | 0.3            | 0.3            |
| 4     | DB600    | 0.7            | 0.6            |
| 5     | M300     | 0.4            | 0.3            |
| 6     | DBLT1340 | 1.5            | 1.3            |
| 7     | DB600    | 0.7            | 0.6            |
| 8     | DB600    | 0.7            | 0.6            |
| 9     | M300     | 0.4            | 0.3            |
| Total |          | 5.8            | 4.9            |

## 3. 블레이드 굽힘시험

### 3.1 굽힘시험 방법

본 구조시험 장치의 구성은 풍력발전기 로터 블레이드 구조시험에 관한 국제기술사양인 IEC 61400-23

(Full Scale Structural Testing of Rotor Blades)를 참조하여 정적 구조시험을 위한 시험 장치를 설계하여 구성하였다. Fig. 3은 블레이드의 0.7R 지점에 용량 10ton, 속도 1mm/s(로드 스텝은 30초를 한 주기로 하여 20초간 하중을 가하고, 10초간 변위를 측정) 유압 액추에이터로 단일집중하중 방식을 적용하여 하중을 가하고 0.3R, 0.4R, 0.5R, 0.7R 및 1.0R 지점에서 로드셀을 이용하여 변위를 동시에 측정하였다.



- 1 : Load Cell 및 유압 액추에이터 (0.7R)
- 2 : 0.3R 변위 측정    3 : 0.5R 변위 측정
- 4 : 1.0R 변위 측정    5 : 0.7R 하중 작용점

Fig. 3 굽힘시험 장치 구성도

변위의 측정은 각 지점에 평형추를 설치하여 계측하였다. 여기서는 곡률이 있는 블레이드 표면을 고려하여, 블레이드 코드의 법선 방향으로 하중이 주어지도록 치구를 제작하여 하중이 가해짐에 따라 블레이드에 Torsion이 발생하는 것을 방지하였다. Fig. 4는 굽힘시험을 위한 블레이드의 설치 모습이며, Fig. 5는 하중을 가하기 위한 액추에이터와 곡률이 있는 블레이드 표면을 고려하여 제작된 치구의 모습이다.

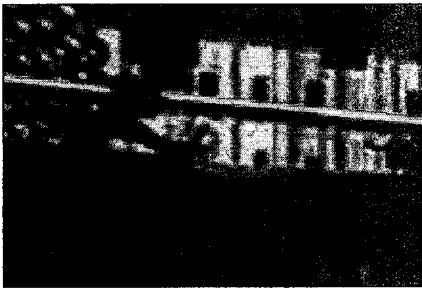


Fig. 4. 굽힘시험 설치 모습

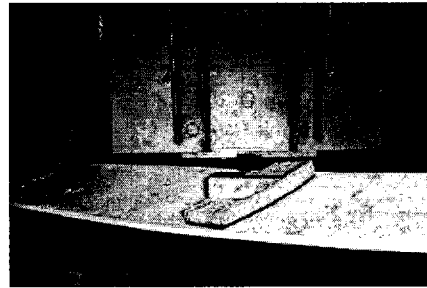


Fig. 5 하중작용 및 치구 모습

### 3.2 굽힘시험 결과 분석

블레이드의 경우 단일 포인트에 하중을 주게 되면 허브 쪽이 고정된 하나의 외팔보가 되어 굽힘 모멘트를 받게 된다. 따라서 길이 방향을 따라 각 부분별로 변위가 다르게 나타난다. 본 실험에서는 블레이드의 5지점에서 각 부분별 변위를 측정하였다.

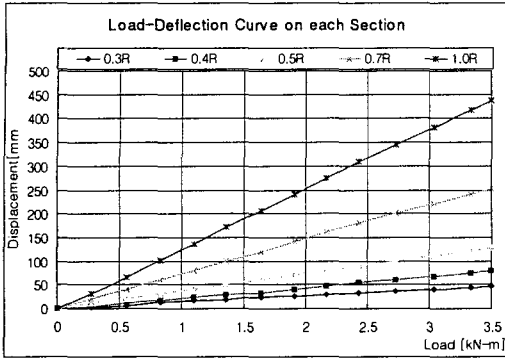


Fig. 6 하중에 따른 블레이드의 각 부분별 변위

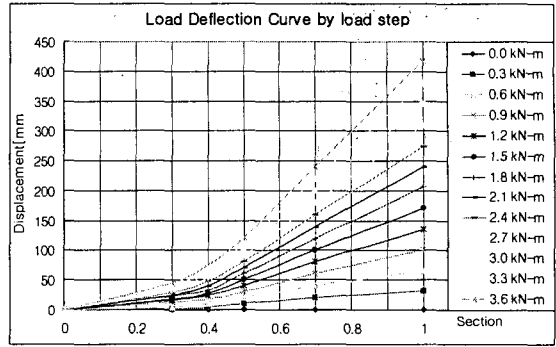


Fig. 7 하중 구간에 따른 변위 변화 Graph

로터 블레이드는 하중이 커짐에 따라, Fig. 6에서 보듯이 끝부분 일수록 변위가 증가하는 현상을 보이고 있는데, 이는 하중의 증가에 따른 길이 방향의 굽힘 모멘트에 의한 것으로 볼 수 있다. 또한 하중이 증가함에 따라 0.35R 부분에서 변위곡선의 변곡점이 발생하여 기하학적 비선형성이 발생하고, 고정단에서 비교적 멀리 떨어진 부분에서는 거의 균일하게 증가하고 있다.

#### 4. 구조해석 결과

블레이드의 구조해석에 사용된 유한요소 코드는 상용 F.E.M. Program인 ANSYS를 사용하여 3-D 모델링 및 블레이드를 보로 유추하여 해석을 수행하였다.

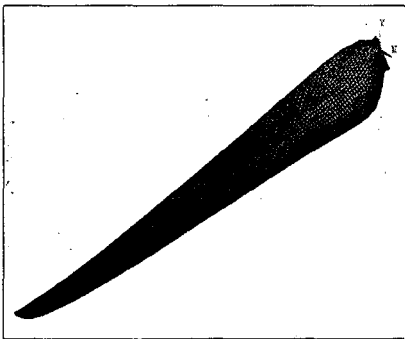


Fig. 8 블레이드 유한요소 모델 및 Mesh

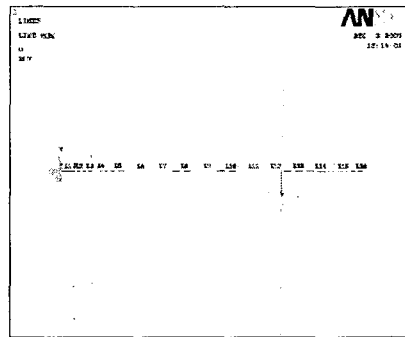


Fig. 9 보 유추 블레이드의 해석 모델

##### 4.1 3차원 유한요소 해석

Table 3은 풍속 3m/s에서부터 45m/s까지의 각 하중조건에 따른 유한요소 선형 정적해석의 결과이며, 이때 하중은 구조시험과 비교하기 위하여 Flat 방향으로 Normal한 하중만을 고려하여, 공력하중을 블레이드의 0.7R 부분 단일포인트 하중으로 적용하여, 공력 하중 계산결과와 일치하도록 적용하였다.

Table 3 정적 구조해석 결과

| Case  | Results | Max. Stress [Mpa] | Max. Displacement [mm] | Max. Distorsion [Deg] |
|-------|---------|-------------------|------------------------|-----------------------|
| 3m/s  |         | 4.09              | 9.87                   | 0.12                  |
| 12m/s |         | 45.08             | 108.52                 | 0.34                  |
| 25m/s |         | 180.31            | 434.06                 | 0.89                  |
| 45m/s |         | 172.11            | 414.32                 | 0.82                  |

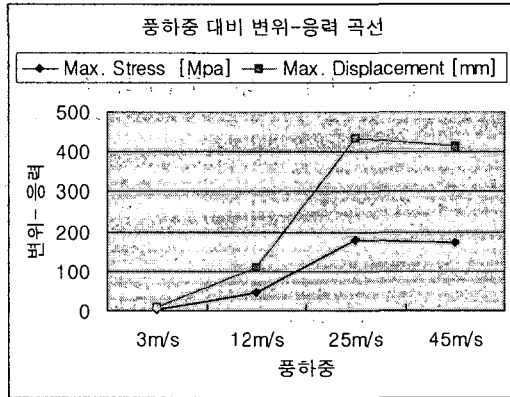


Fig. 10 풍하중 대비 변위, 응력 곡선

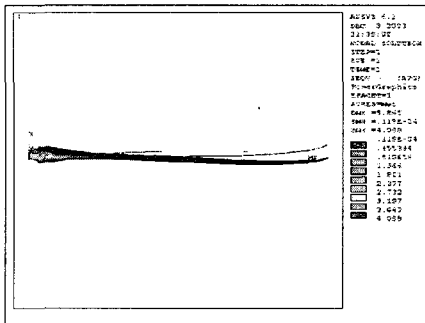


Fig. 11 3m/s 풍하중 작용시의 변위-응력

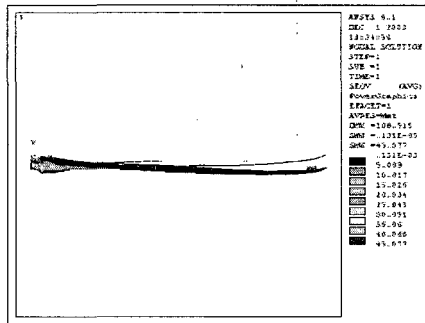


Fig. 12 12m/s 풍하중 작용시의 변위-응력

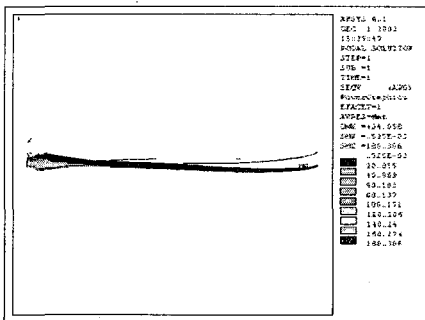


Fig. 13 25m/s 풍하중 작용시의 변위-응력

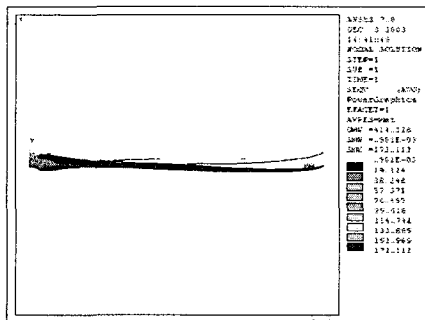


Fig. 14 45m/s 풍하중 작용시의 변위-응력

#### 4.2 보 유추 모델 해석

비선형성을 갖는 복합재 로터 블레이드의 구조해석을 수행함에 있어 Beam 요소로 유추하여 해석을 수행하였다. 이때, 복합재료 로터 블레이드는 Cantilever Beam 요소로 경계조건을 설정하였고, 2차원 단면 유한요소 해석으로부터 결정된 단면 상수를 통하여, 두께 방향의 전단변형 효과, 비틀림 효과들을 고려하였다. 블레이드 단면상수 결정을 위해서 블레이드를 16등분, 25cm 간격으로 세분하여 각 단면의 단면상수를 해석하였으며, Root 및 Tip 부는 12.5cm 간격으로 세분하여 해석의 정확도를 높이고자 하였다. Fig. 15는 Cantilever Beam로 모델링된 블레이드 경계조건을 나타낸다. 하중은 3-D FEM 모델과 동일한 위치, 같은 하중을 주었다.

Table 4 보 유추 정적 구조해석 결과

| Case \ Results | Max. Stress [Mpa] | Max. Displacement [mm] | Max. Distorsion [Deg] |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------|
| 3m/s           | 4.35              | 10.49                  | 0.12                  |
| 12m/s          | 47.95             | 115.43                 | 0.35                  |
| 25m/s          | 191.76            | 461.71                 | 0.91                  |
| 45m/s          | 183.10            | 440.77                 | 0.84                  |

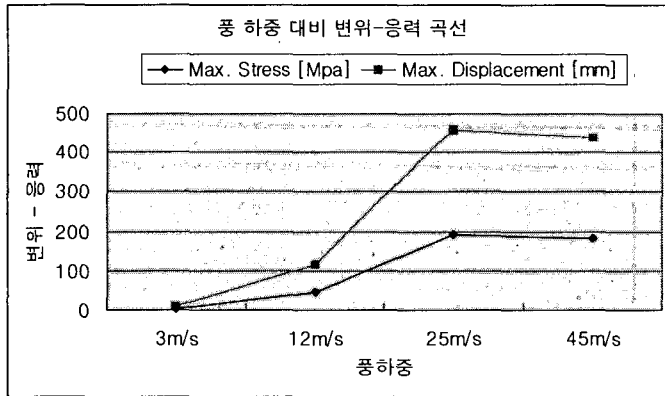


Fig. 15 풍하중 대비 변위, 응력 곡선

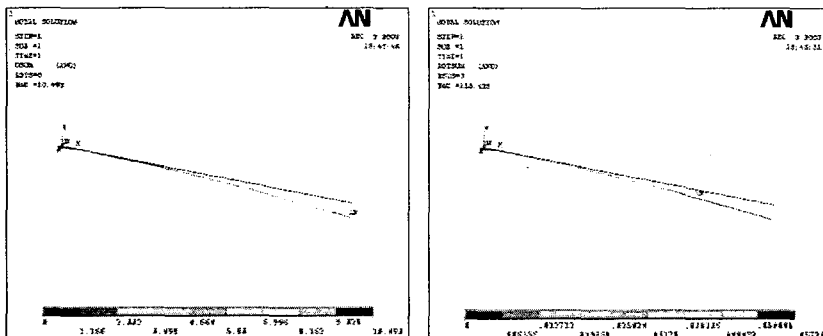


Fig.16 3m/s, 12m/s 풍하중 시의 보 유추 블레이드의 구조해석 결과

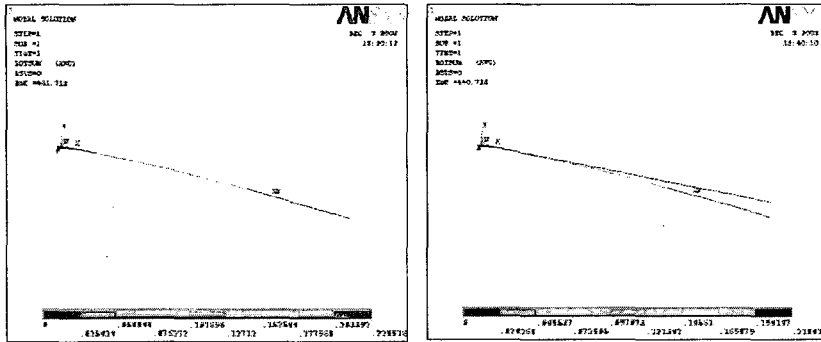


Fig.17 25m/s, 45m/s 풍하중 시의 보 유추 블레이드의 구조해석 결과

## 5. 결과 분석 및 고찰

블레이드 굽힘 실험 및 3-D Modeling에 의한 F.E.M 해석 결과, 그리고 단면 정보를 기초로 보 유추된 블레이드 해석결과를 비교하였다. 이때에는 Tip에서 발생하는 최대변위, 최대 응력 그리고 최대 비틀림을 검토하였다.

Table 5 최대 변위 비교

| Results | Max. Displacement [mm] |           |         |
|---------|------------------------|-----------|---------|
|         | 구조시험                   | 3D FEM 해석 | 보 유추 해석 |
| 3m/s    | 9.64                   | 9.87      | 10.49   |
| 12m/s   | 102.5                  | 108.52    | 115.43  |
| 25m/s   | 436.3                  | 434.06    | 461.71  |
| 45m/s   | 419.7                  | 414.32    | 440.77  |

Table 6 최대 응력 비교

| Results | Max. Stress [Mpa] |         |
|---------|-------------------|---------|
|         | 3D-FEM 해석         | 보 유추 해석 |
| 3m/s    | 4.09              | 4.35    |
| 12m/s   | 45.08             | 47.95   |
| 25m/s   | 180.31            | 191.76  |
| 45m/s   | 172.11            | 183.10  |

Table 7 최대 비틀림 비교

| Case \ Results | Max. Distorsion [Deg] |         |
|----------------|-----------------------|---------|
|                | 3D-FEM 해석             | 보 유추 해석 |
| 3m/s           | 0.12                  | 0.12    |
| 12m/s          | 0.34                  | 0.35    |
| 25m/s          | 0.89                  | 0.91    |
| 45m/s          | 0.82                  | 0.84    |

## 6. 결 론

본 연구는 복합재료로 제작된 10kW급 로터 블레이드의 굽힘 거동에 대한 실험 및 유한 요소 해석을 수행하였다. 복합재료의 적층과 단면 형상에 의한 2차원 단면 특성 값에 의한 구조변수들을 고려한 보 유추 블레이드의 해석 결과는 굽힘시험과 3차원 유한요소 해석과 비교하였을 때 비교적 일치하는 경향을 보였다. 응력 및 변위 특성에서는 3차원 유한요소 해석과 5%이내에서 오차를 보이는 것은 블레이드를 보로 유추하는 과정에서 질량분포 및 블레이드의 이산화(Discrete) 정도에서 오는 오차로 판단된다.

구조적으로 로터 블레이드는 허브 쪽이 고정된 외팔보의 거동을 하며, 블레이드에 작용하는 하중이 커짐에 따라, 끝부분 일수록 변위가 증가됨을 알 수 있다. 또한 각 부분별로 변위가 다르게 나타나며, 0.35R 부분에서 처짐 곡선의 변곡점이 발생하는데, 이는 허브 쪽의 고정단 경계 조건이 블레이드의 강성에 영향을 미친 것으로 판단되며, 피로 해석의 연구가 추후 필요할 것으로 사료된다.

## 7. 참고문헌

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.
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. Ronald F. Gipson., 1994, "Principle of Composite Material Mechanics", McGraw-Hill, Inc., p.1-61.
8. 정찬권, 1999, "Kevlar/Ep FRP Sandwich Plate의 판요소 두께에 따른 Fundamental Frequency 변화에 관한 연구" 인하대학교, 석사학위논문.
9. 박명우, 2001, "수평축 풍력발전시스템 Blade 동특성 분석에 관한 실험적 연구" 인하대학교, 석사학위논문.
10. 김성준, 2003, "복합재료 F.R.P로 제작된 Rotor Blade의 진동특성 분석에 관한 실험적 연구" 인하대학교, 석사학위논문