creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000264852
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2014년 2월
석사학위논문

친환경 소재를 적용한 500W급 고효율 수평축 풍력터빈 블레이드 설계에 관한 연구

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

박 광 림

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

친환경 소재를 적용한 500W급 고효율 수평축 풍력터빈 블레이드 설계에 관한 연구

- A Study on Design of 500W Class High Efficiency Horizontal Axis Wind Turbine System(HAWTS) Blade Using Natural Fiber Composites -

2014 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

박 광 림

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

친환경 소재를 적용한 500W급 고효율 수평축 풍력터빈 블레이드 설계에 관한 연구

지도교수 공 창 덕

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2014 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

박 광 림

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

박광림의 석사학위 논문을 인준함

위원장 호원대학교 교수 박 현 범 인

위원 (주)유니슨 책임연구원 방 조 혁 인

위원 조선대학교 교수 공 창 덕 인

2014 년 11 월 27 일

조 선 대 학 교 대 학 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES iii

LIST OF TABLES v

NOMENCLATURE viii

ABSTRACT x

제 1 장 서 론 1

제 2 장 설 계 개 요 3

제1절 설계 및 해석 절차 3

제2절 설계 요구 조건 4

제 3 장 공력 설계 및 성능 해석 5

제1절 블레이드 공력설계 5

1.공력 설계 절차 및 방법 5

가. 설계초기자료 입력 5

나. 축 방향 속도비와 선회속도비의 계산 5

다. 깃 각 결정 6

라. 시위길이 결정 6

2.공력 설계 변수 분석 및 최적화 6

가. 에어포일의 특성 6

나. 블레이드 직경 7

다. 시위 및 깃 각 설계 방법 8

라. 깃 끝 속도비 8

3.공력 설계 결과 8

제2절 공력 성능 해석 10

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.공력 해석 절차 및 방법 10
가. 공력 설계 결과 입력 10
나. 단면 에어포일의 받음각 결정 10
다. 블레이드의 출력 계산 10
2.공력 해석 결과 11

제 4 장 자연섬유 복합재료 분석 13
제1절 자연섬유 및 수지 종류 13
제2절 자연섬유와 수지 선정 14
제2절 Flax fabric/ Vinyl ester 기계적 물성치 연구 결과 15

제 5 장 블레이드 구조설계 17
제1절 하중조건 및 하중계산 17
1. 굽힘 하중 계산 17
가. 정상 작동 시 돌풍에 의한 굽힘 하중 18
나. 정지 시 폭풍에 의한 굽힘 하중 20
다. 하중 해석 결과 21
제2절 기본구조단면 형상설계 23
제3절 구 조 해 석 25
1. 구조해석 결과 (Glass/Epoxy 복합재 경우) 25
2. 구조해석 (Flax fabric/vinyl ester 복합재 경우) 26
3. 고유진동수 해석 및 공진 가능성 검토 28
4. 좌 굴 해 석 30
5. 구조 해석 결과 검토 30

제 6 장 제작공법 및 수지 침투 해석 32
제1절 RIM(Resin Infusion Molding) 제작공법 32

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 Poly-Worx 수지 침투 모사 전산프로그램 33
제3절 수지 침투 해석조건 34
제4절 해석결과 및 검토 36

제 7 장 시제품 제작 및 시험 38
제1절 시제품 제작 38
제2절 구 조 시 험 48
1. 고유 진동수 측정 시험 48
2. 정 하중 구조시험 50

제 8 장 결 론 56

참 고 문 헌 57

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Flow of aerodynamic and structural design 3
Fig. 2 Airfoil shape and aerodynamic characteristics of DU 93-W-210 7
Fig. 3 Designed aerodynamic shape of 500W class wind turbine blade 9
Fig. 4 Power coefficient vs. The Speed Ratio 12
Fig. 5 Power of aerodynamic analysis 12
Fig. 6 2-D Fabric flax fiber 14
Fig. 7 Types of natural fibers 15
Fig. 8 Flax composite applications 16
Fig. 9 Section of a rotor blade in gust 18
Fig. 10 Aerodynamic force due to storm in stop 20
Fig. 11 Flapwise bending moment diagram for load case Ⅰ 21
Fig. 12 Flapwise bending moment diagram for load case Ⅱ 21
Fig. 13 Flapwise bending moment diagram for load case Ⅲ 22
Fig. 14 Section design model for blade structure 23
Fig. 15 Mesh generation for FEM analysis 25
Fig. 16 Stress analysis result of load case Ⅱ 27
Fig. 17 Displacement analysis result of load case Ⅱ 27
Fig. 18 Campbell diagram for resonance check 28
Fig. 19 First flap mode shape and frequency 29
Fig. 20 First lead-lag mode shape and frequency 29
Fig. 21 Second flap mode shape and frequency 29
Fig. 22 Second lead-lag mode shape and frequency 30
Fig. 23 First buckling mode shape and load factor at load case Ⅱ 30
Fig. 24 Second buckling mode shape and load factor at load case Ⅱ 31
Fig. 25 Resin flow analysis process 33
Fig. 26 Modeling result of the blade 34

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 27 Flow analysis result of glass blade 36
Fig. 28 Flow analysis result of flax blade 37
Fig. 29 Frekote mold release agent(770-NC) 38
Fig. 30 Applying mold releasing agents 39
Fig. 31 built-up sequence 40
Fig. 32 Laminating flax 40
Fig. 33 Laminating peel ply 40
Fig. 34 Applying sealant tape & bagging film 41
Fig. 35 Resin reservoir tank installation 41
Fig. 36 Vacuum condition check 42
Fig. 37 Adhesive of Hysol EA9360 43
Fig. 38 Resin injection 43
Fig. 39 Resin injection 43
Fig. 40 Form removal 44
Fig. 41 Grinding of blade 44
Fig. 42 Upper and lower blades 45
Fig. 43 Adhesive of Hysol EA9360 45
Fig. 44 Blade adhesive of upper&lower 46
Fig. 45 Polyurethane Foam 47
Fig. 46 First blade prototype 47
Fig. 47 Natural frequency test 49
Fig. 48 Natural frequency results 49
Fig. 49 Static strength test loads simulated by three-point loading method 50
Fig. 50 Strain analysis results on upper surface 51
Fig. 51 Strain analysis result of lower surface 51
Fig. 52 Static test of the blade 52
Fig. 53 Strain gage specification 52
Fig. 54 KYOWA 4 channel strain data acquisition system 52
Fig. 55 Strain data acquisition of blade 53

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 56 Strain data during upper structural test 54
Fig. 57 Strain data during lower structural test ,,,,..... 54

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1 System specification 4

Table 2 Aerodynamic design results of 500W class wind turbine blade 9

Table 3 The result of aerodynamic analysis 12

Table 4 Mechanical properties of thermosetting matrix materials 14

Table 5 Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen 16

Table 6 Load cases for structural design 17

Table 7 Structural design results using flax fabric/vinyl ester composites 24

Table 8 Mechanical properties of materials used in the present blade design 24

Table 9 Structural analysis results 26

Table 10 Structural analysis results 28

Table 11 Comparison between glass analysis results and flax analysis results 31

Table 12 Condition of injection port of glass 35

Table 13 Condition of injection port of flax 35

Table 14 Injection time of analysis and manufacture 37

Table 15 Properties of release agent(770-NC) 39

Table 16 Resin specification 42

Table 17 Uncured adhesive properties of Hysol EA9360 46

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 18 Natural frequency data acquisition system 48

Table 19 Comparison of natural frequencies between analysis results and test results ... 49

Table 20 Simulated design load for static test 50

Table 21 Strain gage specification 53

Table 22 Data acquisition system of strain gage 53

Table 23 Comparison between static analysis and test results 55

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NOMENCLATURE

A	Swept area
b	Number of blades
α	Setting angle
C_d	Drag coefficient
C_F	Force coefficient
C_l	Lift coefficient
C_m	Pitching moment coefficient
C_n	Normal (flap wise) force coefficient
C_p	Power coefficient
C_r	Total aerodynamic force coefficient
C_t	Tangential (chord wise) force coefficient
D	Rotor diameter or Drag
E_x	Longitudinal tensile modulus
E_y	Transverse tensile modulus
F	Force
F_D	Aerodynamic force by drag
F_L	Aerodynamic force by lift
F_n	Normal (flapwise) force
F_r	Total aerodynamic force
F_t	Tangential (chordwise) force
F_x	Axial force
FS	Shear strength
FXT	Longitudinal tensile strength
FXC	Longitudinal compressible strength

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

FYT	Transverse tensile strength
FYC	Transverse compressible strength
G	Shear modulus
h	Rotational wind speed ratio
I	Inclination angle (flow angle)
i	Incidence angle (angle of attack)
k	Axial wind speed ratio
L	Lift
λ	Tip speed ratio
Λ	Taper ratio
l	Chord length of airfoil
M_n	Flap wise moment
M_t	Chord wise moment
N	Number of cycles, Shape function
ν	Poisson's ratio
ω	Angular velocity
P	Power
P_r	Rated power
P_u	Useful power
R	Radius of rotor
R_e	Reynolds number
ρ	Density of air or material
σ	Stress
V	Wind speed
V_i	Cut-in wind speed
V_o	Cut-out wind speed
V_r	Rated wind speed

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Design of 500W Class High Efficiency Horizontal-Axis Wind Turbine System(HAWTS) Blade Using Natural Fiber Composites

by Park, Gwang-Lim
Advisor : Prof. Kong, Chang-Duk, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently due to increasing interest in eco-friendly materials, studies on eco-friendly fiber obtained from nature have been actively conducted to the area of composite. Although the natural fiber has less strength than the high strength fiber such as the carbon fiber, it has similar strength to glass fiber. Accordingly ,it can be applied as very advantageous composite when an appropriate resin has been selected.

The wind turbine system is the cheapest technology which uses one of new and reusable energy resources, although it has a disadvantage of low efficiency of the system and little quantity of power generation because it is totally dependant upon wind resource.

Because the output of the generation system become larger in proportion to the square of the diameter, generators in the MW class is used sometimes, but it has a restriction of cost and location; it needs a great amount of investment and vast place to be located. In contrast, the small sized wind turbine system, which is the lower class than the kW class, requires just a individual installation with low cost, and it occupies only a small space.

However, the small sized system that is made and sold by other countries is not effective enough, because, to operate properly, it needs an appropriate wind velocity; more that 12 m/s, but this condition will not be satisfied with our environment. And we have

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

also a situation of exceeding the limit of velocity levels. A typhoon is a good example of it; it is more than 50 m/s in summer. This is why we need our own effective and safe blades for power generation.

As composites resources are used, the blades have achievement in structural intensity, hardness, durability, and cost. There are many kinds of the composites resources: glass/epoxy, carbon/epoxy, wood/epoxy, etc., but the glass/epoxy is mostly used because it is cheap, light, and it has a great performance.

This study evaluates mechanical properties of natural fiber composites. Finally the flax is selected as a natural fiber due to higher strength and better mechanical behaviors than other natural fibers, and the vinyl ester is selected as a resin due to lower cost, easier procurement and better treatment for the resin injection. For easy and fast production of the complicated configuration structure, the resin infusion molding (RIM) manufacturing method is selected.

After investigation on mechanical proper-ties of flax/vinyl ester composite, the design of eco-friendly structure using flax/vinyl ester was performed. This composite is used for the proposed wind turbine blade in this study.

A structural design of 500W class horizontal axis wind turbine blade using natural-fiber composite was performed using both the netting rule and the rule of mixture. The proposed structural type is the skin-spar-foam sandwich, and the aerodynamic configuration that has been designed by the previous work of S. Choi[15] is used for this work. The structural design result of flax fabric composite blade is compared with the result of glass fabric composite blade designed by Choi's work.

The structural safety of the designed blade structure was investigated through the various load cases, stress, deformation, natural frequency and buckling analyses using the commercial FEM(Finite Elements Method) code, MSC. NASTRAN. In addition, when blade was manufactured using the RIM(Resin Infusion Molding) method under 1 bar vacuum pressure due to better production efficiency and lower defect rate than the hand

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

lay-up process method. Before applying the RIM process to manufacture the blade, the resin flow simulation was carried out to predict the manufacturing possibility using Poly-worx software. The predicted resin filling time was well agreed with the measured filling time during the RIM process.

The structural test of the manufactured prototype blade was performed to confirmed the structural analysis results including strains, natural frequencies and deformations. According to the comparison results, it was confirmed that the analysis results are well agreed with the experimental results.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

세계적으로 복합재료는 부품 등 구조적으로 다양한 용도로 사용되고 있다. 기존에 사용되어진 금속을 대체하여 경량화를 통해 항공기 및 자동차 분야와 같은 고성능 분야에도 동일한 효과로 사용 가능 하게 되었다.

일반적으로 이러한 복합재료 분야에 사용되는 제품의 수명이후에 합성화학성분과 유독성분이 많이 생겨나 재활용이 거의 불가능하여 폐기하게 된다. 이에 최근에는 복합재료 설계 및 제조에서 자연섬유에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. 자연섬유는 화학적인 합성으로 만들어진 섬유에 비해 상대적으로 낮은 비용과 지속적으로 섬유 제공을 가능토록하며 재활용 할 수 있다.[1-2] 이전 선행 연구들 중 P.J Herrera-Franco 등은 헤네켄(Henequen) 자연섬유의 기계적 특성에 대해 조사 및 연구 되었다. 이 연구에서는 헤네켄 섬유로 강화된 HDPE(High Density Polyethylene) 기계적 거동에 관해 지속적으로 연구되었다.[3] M. Zampaloni 등은 케나프 자연섬유의 강화폴리프로필렌 복합재료에 대한 연구를 하였다. 다양한 분야에 열 성형 될 수 있는 케나프 섬유 강화 폴리프로필렌은 제조에 중점이 된 연구로 기존의 합성 복합재료에 대등한 특성으로 다양하게 적용 될 수 있다.[4] Vincent Placet 은 대마(Hemp)의 기계적 특성에 대해 연구 했다. 이 연구에서는 대마의 열적기계분석 거동과 동적기계분석 방법에 대해 연구 되었다.[5] 최근 몇 년 동안의 많은 실험 연구들은 자연섬유의 특성을 조사하기 위해 수행되어졌다. 그러나 본 연구는 구조설계 및 천연 복합재료를 적용하기 위해 수행하였다. 그 대상으로 아마(Flax) 자연섬유 복합재료를 이용해 500W급 수평축 풍력터빈 블레이드로 구조설계를 수행 하였다.

구조 설계에 있어서 블레이드는 Flax/vinyl ester 복합재료 및 발포 우레탄 소재를 사용하고, 그 구조는 skin-spar-foam의 샌드위치 구조를 사용하였다. 또한, 아마 섬유 복합재 블레이드의 구조 설계 결과는 유리섬유 블레이드와 비교하였다. 복합재 블레이드의 구조 설계 결과를 평가하기 위해서, 구조 해석을 MSC. Nastran 이용 하여 유한 요소법에 의해 수행 하였다. 이 해석에서는 응력 해석과 좌굴해석 및 고유치 해석을 수행 하였다. 그리고 구조적 안전은 분석 결과를 통해 확인 하였다.

또한 블레이드의 제작을 위해 기존의 수적층 방법(hand lay-up method) 비해서 불량율이 적고 생산효율이 뛰어나며 생산가가 낮은 RIM(Resin Infusion Molding) 공법을 적용 하였다. 마지막으로 이와 같은 방법으로 설계 및 해석된 블레이드의 시제품

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제작을 통하여 구조시험을 수행하고, 구조해석의 결과를 입증하였을 뿐만 아니라 구조적 안전성을 재확인 하였다.

다음과 같이 본 연구를 통해서 RIM 제작 공법을 이용해 제작된 자연섬유 복합재의 블레이드 적용가능성을 판단하고 향후 이와 같은 분야에 기존 금속 구조물을 대체하여 친환경 구조물로 충분히 활용할 수 있음을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 설 계 개 요

제 1 절 설계 및 해석 절차

설계를 수행하기 설계는 크게 공력 설계와 구조 설계로 나뉜다. 먼저 설계요구조건으로부터 블레이드의 크기 및 비틀림 각, 깃 끝 속도비 등의 공력 설계를 수행하고, 공력 해석 및 공력 시험을 통하여 요구 성능 만족 여부를 검토한 후 설계를 개선하거나 확정하게 된다. 공력 설계 완료 후 구조에 영향을 미칠 하중을 분석하고 이를 바탕으로 구조 설계를 한다. 구조설계결과는 변형율 및 응력분포를 확인하기 위한 정하중 해석, 고유진동수해석, 좌굴 해석, 피로수명 해석을 수행하여 블레이드에 대한 안전성을 판단한다. 다음으로 시제품 제작한 뒤 구조 시험을 수행하여 구조해석결과와 비교를 통해 타당성을 검증하고 설계를 확정하게 된다. Fig. 1은 이러한 설계 절차를 보여준다.[7 8]

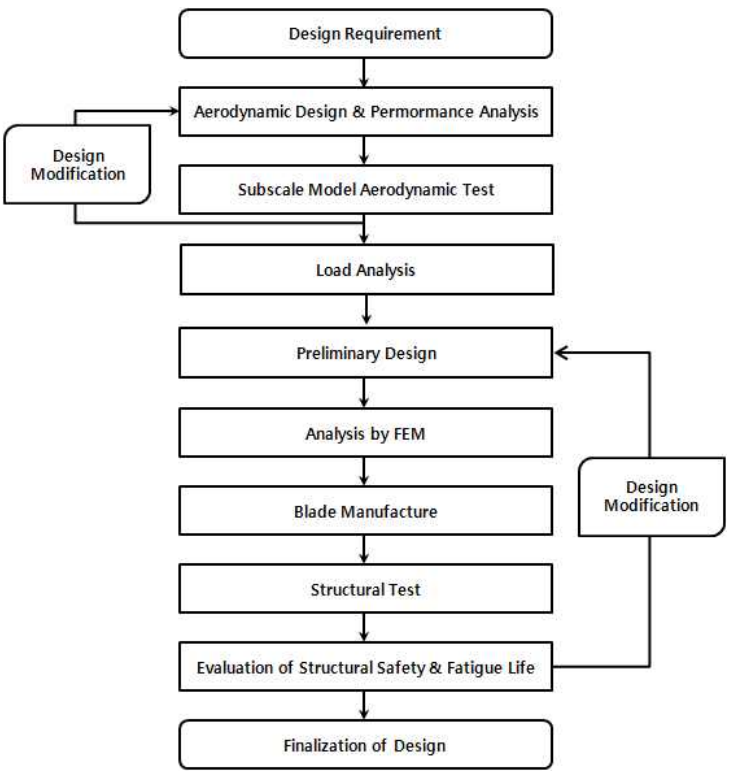

Fig. 1 Flow of aerodynamic and structural design

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 설계 요구 조건

시스템의 사양은 장소, 목적 등에 따라 달라지며, 시스템의 규격이 정해지면 세부적인 설계 요구조건을 정립할 수 있게 된다. Table 1은 본 연구의 시스템 사양이다.[7, 8]

Table 1 System specification

Type	Horizontal-Axis Wind Turbine System(HAWTS)
Rated power	500W
Working range	Cut-in wind speed : Less than 3 m/s Rated wind speed : 4～10 m/s (Determine the optimal value) Cut-out wind speed : 20 m/s Maximum survival wind speed : 55 m/s Planned fatigue lifetime : 20 year
Rotor orientation	Upwind
Number of blades	Three
Rated rotor speed	200～500 rpm (To be determine the optimal value)
Direction of rotation	Clockwise, looking down wind
Blade airfoil	To be determine the optimal airfoil for low wind speed
Rotor diameter	To be determine the optimal rotor diameter for low wind speed
Blade material	Flax/vinyl ester composite
Manufacturing process of blade	Lay-up molding
Yaw-control	Tail vane

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 공력설계 및 성능 해석

제 1 절 블레이드 공력설계

1. 공력설계 절차 및 방법

블레이드 공력설계는 선행 연구되었던 기존의 블레이드를 사용하였으며 절차 및 방법은 다음과 같다.[15]

가. 설계초기자료 입력

설계 초기자료로는 일종의 설계 변수로써 깃 끝 속도 비, 로터직경, 블레이드 수, 블레이드의 테이퍼 비, 에어포일의 양·항 자료 등이 있으며 이들은 문헌 자료를 통해 대략적인 범위를 결정할 수 있으나 보다 효율적인 설계를 위해서는 각각의 설계변수변화에 따른 공력설계 결과가 충분히 분석되어 최적의 설계가 이루어 져야 한다.

일반적으로 수평축 풍력발전기는 보통 3개의 깃을 사용하고 깃 끝 속도비는 5~8이며 에어포일은 종전에는 NACA계열을 그대로 사용하거나 개선하여 사용하였는데, 최근에는 풍력발전 전용으로 개발된 여러 가지 에어포일들이 사용된다. 또한 블레이드의 설계방법으로는 보다 용이한 제작을 위해 일정한 테이퍼 비를 갖도록 설계하여 선형적인 시위길이 변화를 갖도록 설계하는 방법과 경량화를 위해 에어포일의 양항비가 최대가 되는 최적 받음각으로 설계하는 방법이 있다. 그리고 블레이드의 직경은 정격출력의 근사식으로부터 계산된다.

나. 축 방향 속도비와 선회속도비의 계산

(1) 설계 깃 끝 속도비로부터 설계하고자 하는 단면의 속도 비를 $\lambda = \lambda_0\left(\frac{r}{R}\right)$인 관계를 이용하여 계산한다.

(2) 속도비가 λ가 계산되면 (1)식에 의해 θ를 계산한다.

$$\theta = \frac{1}{3}cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda^2+1}}\right) + \frac{\pi}{3} = \frac{1}{3}tan^{-1}\lambda + \frac{\pi}{3} \qquad (1)$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

(3) 계산된 θ를 이용하여 k값을 계산하고, 이를 이용하여 h값을 계산한다.

다. 깃 각 결정

(1) (2)식을 이용하여 $\cot I$값을 계산하고 이로부터 유동 각 I를 계산한다.

$$\begin{cases} \cot I = \dfrac{U'}{V} = \dfrac{wr}{V_1}\dfrac{1+h}{1+k} = \lambda\dfrac{1+h}{1+k} = \lambda_e \\ W = \dfrac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \dfrac{wr(1+h)}{2\cos I} \end{cases} \tag{2}$$

(2) $\alpha = I - i$인 관계를 이용하여 블레이드 단면의 깃 각을 결정한다.

라. 시위길이 결정

(1) $\tan\varepsilon = C_d / C_l$인 관계를 이용하여 ε을 계산한 후 (3)식이나 (4)식을 이용하여 깃 하중을 계산한다.

$$C_l bl = \frac{8\pi r(1-k)\sin^2 I cos\epsilon}{(1+k)\cos(I-\epsilon)} \tag{3}$$

$$C_l bl = \frac{4\pi r(h-1)\sin 2I cos\epsilon}{(h+1)\sin(I-\epsilon)} \tag{4}$$

(2) 계산된 깃 하중으로부터 시위길이를 결정한다.

2. 공력설계변수 분석 및 최적화

가. 에어포일 특성

깃 단면의 에어포일은 풍력 발전기의 여러 가지 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 일반적으로 에어포일을 선정하는 기준은 레이놀즈 수 변화에 따른 양력의 변화가 적을 것, 최대 양력계수 및 실속 받음각이 클 것, 최대 양항비가 클 것, 구조적 강도 보장을 위해 두께가 비교적 두꺼울 것, 등이 있다. 또한, 출력 제어 방법에 따라서도 각각의 목적에 맞는 에어포일 선정되는데 가변 피치 제어 방식으로 운용되는 경우 깃 각 변화에 따른 동력 계수의 변화가 큰 에어포일이 효과적이다.[9]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 연구에서는 저 풍속형 고효율 블레이드에 적합한 DU 93-W-210을 적용하였다.

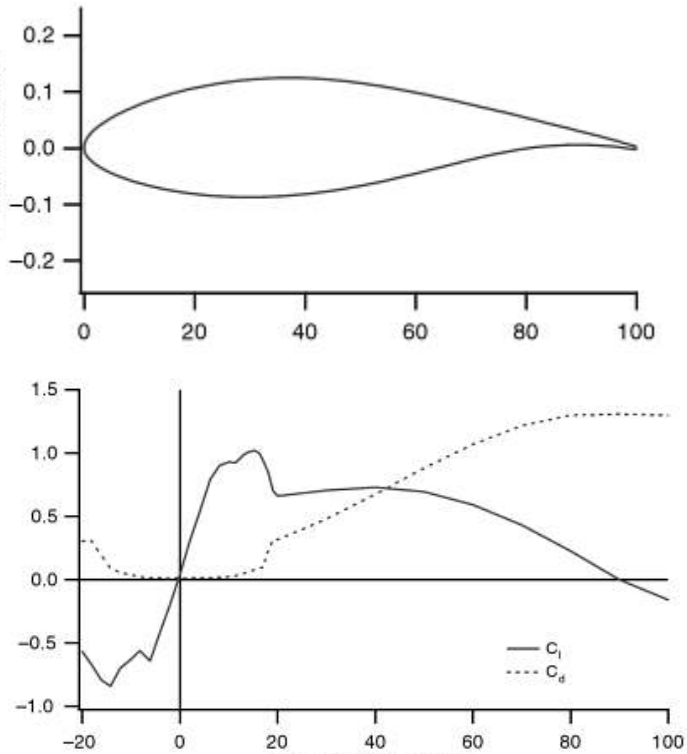

Fig. 2 Airfoil shape and aerodynamic characteristics of DU 93-W-210

나. 블레이드 직경

풍력 발전 블레이드의 직경은 (5)식 및 (5)식과 같은 정격 출력에 대한 근사식으로 구할 수 있다.

$$P_{\max} = 0.37 A V^3 \tag{5}$$

$$P = 0.2 D^2 V^3 \tag{6}$$

여기서, $P_{\max}$는 Betz의 이론에 의한 풍력터빈의 최대 출력이며 P는 설계하고자 하는 정격출력 이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 시위 및 깃 각 설계 방법

시위 길이를 설계하는 방법으로는 여러 가지가 있으나, 가장 일반적으로 적용되는 최대 양항비를 갖는 최적의 받음각으로 설계하는 방법과 제작의 편의성을 위해 선형적인 시위 길이 변화를 갖도록 설계하는 방법을 검토하였다.

라. 깃 끝 속도비

설계 깃 끝 속도비에 따른 블레이드의 특성은 일반적으로 깃 끝속도비가 커질수록 블레이드의 시위 길이는 작아져서 경량화에 유리하다. 또한 이러한 경우에는 블레이드의 폭이 좁아지더라도 정격 회전속도가 커져 이때 발생하는 원심력에 의해 블레이드의 굽힘 모멘트는 감소하기 때문에 구조적으로 크게 불리하지는 않다. 그러나 회전속도가 너무 빠르면 발생되는 소음이 매우 커 소음공해를 일으킬 수 있기 때문에 너무 큰 깃 끝 속도비로 설계하는 것은 피해야 한다. 깃 끝 속도비가 커지면 날개 뿌리 부위의 동력계수는 커지는 반면 날개 끝 부분의 동력 계수는 작아지므로 전체적인 동력계수에는 큰 변화가 없게 된다. 그러나 깃 끝 속도비가 과도하게 커지면 동력계수는 점차 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 따라서 깃 끝 속도비는 적절한 범위 내에서 선택하되 소음 감소 및 경량화를 위해 가능한 낮은 값을 선택하는 것이 타당할 것으로 판단된다. [9]

3. 공력설계 결과

본 연구의 대상인 풍력터빈의 정격 출력은 500 W 이므로 발전기 효율, 동력 전달 계통의 기계적 효율 등을 고려하여 공력 설계를 위한 출력을 625 W로 하였다. 블레이드의 정격풍속은 과도한 직경증가를 피하면서도 저 풍속에 유리하도록 8 m/s로 결정하였다. 이에 따라 블레이드의 직경은 정격 출력의 근사식을 통해 2.5 m로 결정되었다. 설계 깃 끝 속도비(λ_0)는 출력을 높이면서도 소음을 감소시키기 위한 가장 합리적인 값으로서 7을 선택하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 최종적으로 설계된 블레이드의 제원은 Table 2과 같고 3차원 모델링 한 결과는 Fig. 3과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2 Aerodynamic design results of 500W class wind turbine blade

Blade power	500 W
Cut in wind speed	3 m/s
Rated wind speed	8 m/s
Cut out wind speed	20 m/s
Design tip speed ratio	7
Rated RPM	433 rpm
Blade number	3
Rotor diameter	2.5 m
Aerodynamic profile	DU 93-W-210
Blade root chord	149.208 mm
Blade tip chord	42.727 mm
Blade total twist	24.353 deg

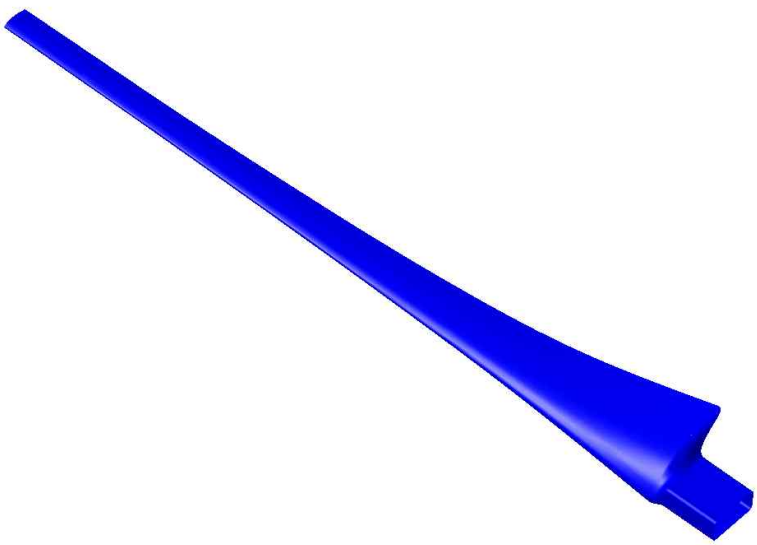

Fig. 3 Designed aerodynamic shape of 500W class wind turbine blade

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 공력 성능 해석

1. 공력 해석 절차 및 방법

설계된 블레이드의 설계 요구 성능 만족 여부를 검토하기 위해 수행되었고 이를 위해 다음과 같은 절차 및 방법을 적용하였으며 앞선 설계와 마찬가지로 수치적인 계산은 전산해석 코드를 작성하여 이용하였다.

가. 공력설계 결과 입력

공력 설계 결과는 각 단면별 시위길이와 깃 각 및 에어포일의 양력 및 항력 자료, 블레이드 수 등을 의미하며 공력 해석을 위해 이와 같은 값들이 초기 자료로 입력된다.

나. 단면 에어포일의 받음각 결정

(1) 유동각 I를 $0^\circ \sim 90^\circ$ 범위 내에서 적절한 단위로 나누어 고려하며 $I=\alpha+i$인 관계를 이용하여 각각의 받음각을 계산한다.

(2) 계산된 받음각에 해당하는 에어포일의 양·항력계수를 찾고 $\tan\epsilon = C_d/C_l$인 관계를 이용하여 ϵ값을 계산한다.

다. 블레이드의 출력 계산

(1) (7)식과 (8)식의 Glauert의 와류 이론 의 깃 요소 이론과 운동량 이론의 결합 식으로 G와 E 정의 된 값으로 각각을 계산한다.

$$G=\frac{1-k}{1+k}=\frac{C_l blcos(I-\epsilon)}{8\pi rcos\epsilon \sin^2 I} \tag{7}$$

$$E=\frac{h-1}{h+1}=\frac{C_l blsin(I-\epsilon)}{4\pi rcos\epsilon \sin 2I} \tag{8}$$

(2) $k=(1-G)/(1+G), h=(1+E)/(1-E)$인 관계를 이용하여 k값과 h값을 계산한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

(3) (9)식의 결과를 이용하여 유동각 I에 관한 설계 깃 끝 속도비 λ_0를 계산한다.

$$\begin{cases} \cot I = \dfrac{U'}{V} = \dfrac{wr}{V_1}\dfrac{1+h}{1+k} = \lambda\dfrac{1+h}{1+k} = \lambda_e \\ W = \dfrac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \dfrac{wr(1+h)}{2\cos I} \end{cases} \tag{9}$$

$$dM = \dot{m}\triangle wr^2 = \dot{m}r^2\Omega = p\pi r^3 dr\, V_1(1+k)\Omega \tag{10}$$

또한, $\Omega = (h-1)w$를 대입하면 회전 토크 는 다음과 같다.

$$dM = p\pi r^3 dr w\, V_1(1+k)(h-1) \tag{11}$$

(4) 블레이드 길이발향으로 적분하면 다음과 같은 축 방향 하중과 모멘트를 계산 할 수 있다.

$$F = \int_0^R p\pi v_1^2(1-k^2) r dr \tag{12}$$

$$M = \int_0^R p\pi v_1 w(1+k)(h-1) r^3 dr \tag{13}$$

또한 추력계수 및 모멘트계수, 출력계수를 다음과 같이 정의하여 계산한다.

$$C_F = \frac{2F}{pSV_1^2} = 2\int_0^1 (1-k^2)\frac{r}{R} d(\frac{r}{R}) \tag{14}$$

$$C_M = \frac{2M}{pSV_1^2 R} = 2\int_0^1 (1+k^2) Ecot I \frac{r^2}{R^2} d(\frac{r}{R}) \tag{15}$$

$$C_p = C_M \times \lambda_0 \tag{16}$$

(5) 계산된 결과를 검색하여 설계 깃 끝 속도비가 1 ~ 20인 범위를 유효 범위로 압축하고 이에 대한 결과들을 따로 종합한다.

(6) 이상의 결과에서 설계 깃 끝 속도비가 계산된 데이터의 사이에 위치한 경우 보간법에 의해 계산한다.

2. 공력 해석 결과

Fig. 4는 깃 끝 속도비에 대한 동력계수의 변화를 분석한 것으로 그래프에서 알 수 있

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

듯이 깃 끝 속도비 7에 대해서 동력계수는 최대값을 가지며 그 외의 다른 깃 끝 속도비에서는 현저하게 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 5은 동력계수를 이용하여 계산된 블레이드 출력곡선으로서 정격풍속인 8m/s에서 요구 출력에 비하여 기존의 블레이드의 공력설계가 잘 되었음을 확인하였다.

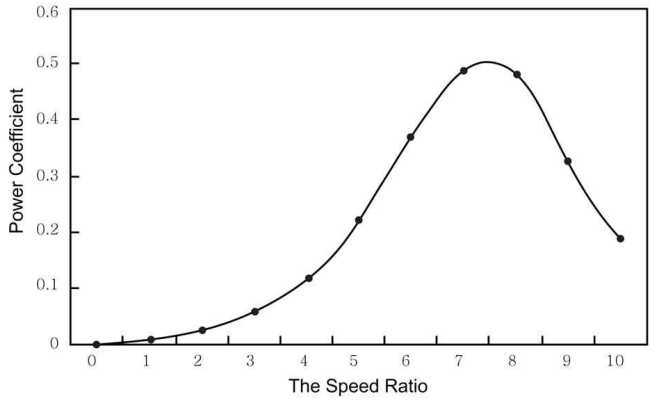

Fig. 4 Power Coefficient vs. The Speed Ratio

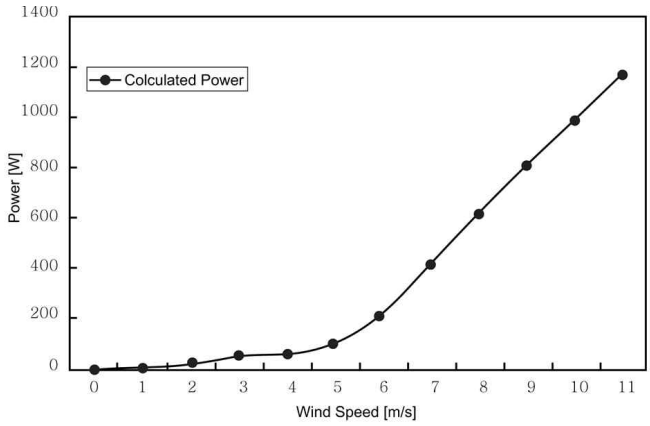

Fig. 5 Power of aerodynamic analysis

Table 3 The result of aerodynamic analysis

V(m/s)	8
λ0	7
Cp	0.49294
P(W)	743.3360077
Pe(W)	669.002

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 자연섬유 복합재료 분석

제 1 절 자연섬유의 및 수지 종류

본 연구는 Flax를 이용한 연구로써 선행 연구로 자연섬유의 종류 및 특성에 관하여 분석하였다. 복합재료로 적용되는 자연 섬유는 크게 유기물과 무기물로 구분이 된다. 유기물은 식물의 섬유가 대표적인 복합재료이고 무기물은 광물 섬유 등으로 분류된다. 본 연구에서 다루어지는 자연 섬유는 식물 섬유인 유기물로서 그 종류를 살펴보면 아마(Flax), 대마(Hemp), 황마(Jute), 용설란 종류인 사이잘(Sisal), 헤네켄(Henequen), 야자열매 겉껍질인 코이어(coir) 등이 대표적인 자연 섬유로 사용되고 있으며 fig. 7은 대표적 자연 섬유를 보여주고 있다. fig. 6은 ±45°로 직조된 2-d fabric 아마 섬유를 보여주고 있다.[10,11,12]

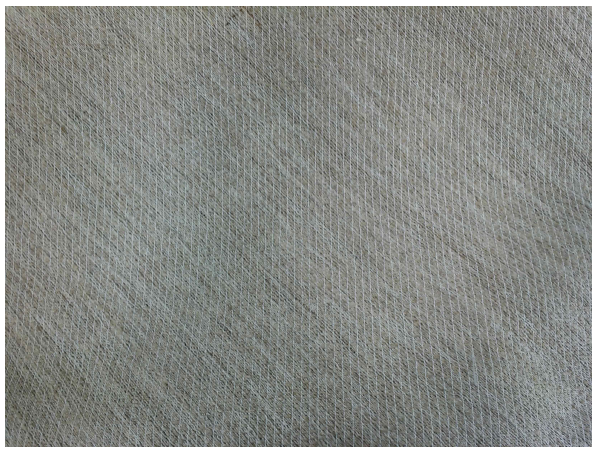

Fig. 6 2-D fabric flax fiber

또한 자연 섬유에 사용되는 수지는 크게 열가소성(Thermoplastic) 수지와 열경화성(Thermoset) 수지로 분리된다. 대표적인 열가소성 수지를 분석해 보면 폴리에틸렌(Polyethylene), 폴리프로필렌 (Polypropylene), 폴리아미드(Polyamide)이다. 열경화성 수지는 에폭시(Epoxy), 비닐 에스테르(Vinyl ester), 페놀(Phenolic) 등이 사용된다. 최근에는 자연 수지도 개발되고 있는데 열대 나무의 열매 껍질에서 채취된 캐슈 넛 쉘 수지(CNSL: Cashew nut shell oil resin)가 대표적인 자연 수지로 활용되고 있다. [13,14]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 7 Types of natural fibers

제 2 절 자연섬유와 수지 선정

본 연구에서 친환경 자연섬유를 이용한 블레이드 설계를 위해 다양한 자연 섬유의 특성 또한 비교하였다. 먼저 섬유질의 함량을 비교했을 때 아마(flax)는 71%, 대마(Hemp)는 65%, 황마(Jute)는 72%, 사이잘(Sisal)은 69%로 분석되었으며 Table 4에서 확인 할 수 있다. 또한 기계적 강도 및 강성을 비교한 결과 아마 섬유가 우수한 것으로 검토되었다. 따라서 본 연구에서는 아마 섬유를 자연 섬유 구조물에 적용할 재료로 선정하였다.[12]

Table 4 Mechanical properties of thermosetting matrix materials

Property	Flax	Hemp	Jute	Sisal
Density [g/cm3]	1.4	1.48	1.46	1.33
Tensile strength [N/mm2]	800 - 1500	550-900	400-800	600-700
Stiffness [kN/mm2]	60-80	70	10-30	38
Moist absorption [%]	7	8	12	11
Cellulose [wt%]	71	65	72	69

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

아마 섬유는 진동 흡수 능력도 뛰어나며 가격이 다른 섬유와 비교했을 때 저렴하고 쉽게 구매할 수 있다. 현재 유럽에서 아마 섬유는 많이 생산되고 있으며, 프랑스가 공급량의 80%를 점유하고 있다. 최근에 아마 섬유는 항공기의 문, 자동차의 내장재, 건축 구조물, 원예공예, 휴대폰 케이스 등에 활용도가 증가하고 있는 것으로 분석되었다. 다음 Fig. 8에는 활용 되고 있는 분야를 나타내었다.[10]

Fig. 8 Flax composite applications

복합재료 섬유에 적용되는 수지는 열경화성 수지가 많이 적용된다. 본 연구에서 폴리에스테르, 비닐 에스테르, 에폭시, 페놀 수지에 대한 기계적 특성을 분석하였다. 페놀 수지는 화염 저항성이 뛰어나지만 제작 공정이 어려운 단점을 지니고 있다. 에폭시 수지는 기존의 탄소, 유리 섬유 복합재에 많이 사용되고 있고, 자연 섬유 복합재에도 연구를 위하여 다양하게 사용되고 있는데 단점은 상대적으로 가격이 비싸서 상용화에는 좋지 않은 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 비록 제반물성치가 에폭시에 비해 다소 떨어지지만 가격이 저렴한 비닐 에스테르 (Vinyl ester)를 선정 하였다.

제 3절 Flax fabric/ Vinyl ester 기계적 물성치 연구 결과

본 연구에 앞서 선행연구 작업으로 VARTM 공법으로 제작된 아마 시편의 물성치를 분석하여 제시된 아마/비닐 에스테르 수지 복합재료 시편의 기계적 물성치를 검토하였다. 연구에 사용된 2-D Fabric인 경우 제작, 시험한 결과 아마 섬유 인장 강도가

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

76.7MPa(섬유함유율 34%)로서 기존에 조사된 문헌 보다 높은 강도임을 확인하였다. Table 5는 강도 시험을 통해 분석된 아마 섬유 시편의 물성치 이며, 이 결과를 바탕으로 RIM 공법적용에는 다소 차이가 있지만 선행 연구에서 제시한 아마 섬유의 기계적 물성치를 채택하여 제작공법에 적용하였다.

Table 5 Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction; 34%)

Test Institute	Jeonnam Technopark	
Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	76.74	9.14
Flexure	108.72	6.75
In Plane Shear	36.19	1.66

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 블레이드 구조설계

제 1 절 하중 조건 및 하중 계산

풍력발전용 블레이드에 작용하는 하중으로는 공력하중, 원심하중, 열적하중, 결빙에 의한 하중 등이 있으나, 본 연구의 블레이드는 상온에서 성형 될 예정이므로 성형조건과 운용조건의 온도차에 의해 발생되는 열적하중은 무시할 수 있으며, 그 표면적이 크지 않으므로 결빙에 의한 무게증가 또한 무시할 수 있다. 따라서 고려되어지는 구조설계 하중은 공력하중과 회전에 의한 원심하중이며 그 내용은 Table 6과 같다. 여기서 공력 하중은 회전날개의 깃에서 발생하는 힘을 말하며, 이 힘은 깃의 굽힘이나 비틀림을 일으키고, 특히 풍력발전용 회전날개에서는 회전하는 힘을 발생시킨다.[15]

Table 6 Load cases for structural design

Load Case	Case Ⅰ	Case Ⅱ	Case Ⅲ
Reference wind speed	8 m/s	20 m/s	55 m/s
Gust condition ($\pm 20 m/s$, $\pm 40°$)	With gust	With gust	Storm condition
Rotational speed	433 rpm	1069 rpm	Stop

1. 굽힘 하중 계산

굽힘 하중은 깃 단면의 시위에 수직하게 작용하는 힘으로 정의되며, 그 크기는 바람의 세기나 깃의 받음각에 따라 달라지므로 각각의 상황에 따라 다르게 계산되어야 한다. 일반적으로 풍력발전기용 회전날개를 설계함에 있어 고려되어야 할 상황은 정상작동시 돌풍의 상황, 정지시 폭풍의 상황이다. 돌풍은 수초 정도의 짧은 시간에 바람의 속도와 방향이 각각 10~20 m/s, 12°~30°정도로 변화하는 상황을 말하는데, 풍력발전기는 바람의 방향이 바뀜에 따라 즉각적으로 움직일 수 없기 때문에, 돌풍의 방향과 블레이드의 회전축이 이루는 각도는 30°~40°까지도 증가될 수 있으며, 이것은 회전날개의 굽힘 응력을 증가시키는 요인이 되고, 일반적으로 회전날개의 굽힘 응력 증가 요

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

인은, 바람의 속도 변화에 의한 것 보다 받음각 변화에 의한 것이 더 큰 것으로 알려져 있다. 한편 폭풍은 풍속 45 m/s 이상으로 정의된다.

가. 정상 작동시 돌풍에 의한 굽힘 하중

돌풍이 고려된 회전날개의 깃에서 발생하는 공기력을 계산하기 위해서는 Fig. 9와 같이 돌풍의 주된 특성인 받음각이나 속도의 변화가 고려되어야 한다. 회전날개의 깃 단면에서 발생되는 공기력은 받음각과 속도의 함수이므로 이를 계산하기 위해서는 돌풍에 의해 변화되는 받음각과 속도의 계산이 선행되어야 한다.

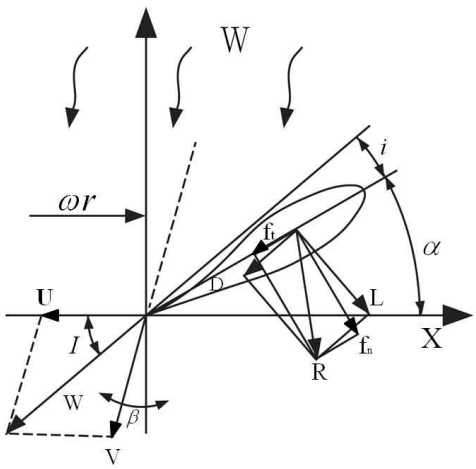

Fig. 9 Section of a rotor blade in gust

회전축으로부터 거리 r인 깃 단면의 회전 선속도는 다음과 같다.

$$U = U_0 \frac{r}{R} \tag{17}$$

회전 선속도가 결정되면 다음 식에 의해 실제 회전하는 깃 단면에 작용하는 돌풍의 속도(W)와 유동각(I)를 구할 수 있다.

$$W = \sqrt{U^2 + V^2 + 2UV\sin\beta} \tag{18}$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$\tan I = \frac{V\cos\beta}{U + V\sin\beta} \tag{19}$$

유동각이 계산되면 $i = I - \alpha$인 관계를 이용하여 받음각을 계산한다. 받음각과 속도가 결정되면 깃 단면에 발생하는 양력(L)과 항력(D)은 다음과 같이 계산된다.

$$L = \frac{1}{2} p C_l W^2 l \tag{20}$$
$$D = \frac{1}{2} p C_d W^2 l$$

이 힘들을 실제 블레이드에 작용하는 굽힘하중의 계산에 적용하기에는 좌표축 설정 등 여러가지 어려움이 있으므로, Fig. 12에서와 같이 깃 단면 시위에 수직한 힘과 수평한 힘으로 분해한다. 먼저 양력계수(C_l)과 항력계수(C_d)를 (14)식과 (15)식을 이용하여, 시위에 수직한 성분(C_n)과 수평한 성분(C_t)으로 분해하고 시위에 수직한 힘(f_n)과 수평한 힘(f_t)을 다음 식에 의해 계산한다.

$$f_n = \frac{1}{2} p C_n l W^2 \tag{20}$$
$$f_t = \frac{1}{2} p C_t l W^2$$

여기서 계산된 f_n과 f_t는 깃 단면에 국한된 힘이므로 회전날개 전체에 발생하는 힘을 구하기 위해서는 거리 r에 대해 적분을 해야 한다. 실제로 회전날개는 테이퍼 되어있기 때문에 각 단면의 시위는 모두 다르지만 계산의 복잡성을 피하기 위해 어느 정도 오차를 허용할 수 있는 구간(Δr)내에서는 일정한 시위길이를 갖는다고 가정하여, 공력에 의해 발생되어지는 하중과 모멘트를 각각 다음 식에 의해 계산하였다.

$$F_t = \sum f_t \times \triangle r, F_{t(i)} = f_{t(i)} \times \triangle r + F_{t(i-1)}$$
$$F_n = \sum f_n \times \triangle r, F_{n(i)} = f_{n(i)} \times \triangle r + F_{n(i-1)} \tag{21}$$

$$M_t = \sum F_t \times \triangle r, M_{t(i)} = F_{t(i)} \times \triangle r + M_{t(i-1)}$$
$$M_n = \sum F_n \times \triangle r, M_{n(i)} = F_{n(i)} \times \triangle r + M_{n(i-1)} \tag{22}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 연구에서는 Table 4의 하중조건에 대하여 $20m/s$의 돌풍을 각각 0°에서 40°까지 1°씩 변화 시키면서 공력 하중을 계산하였으며 이중 가장 큰 힘이 발생할 때를 구조해석에 적용하도록 하였다.

나. 정지 시 폭풍에 의한 굽힘 하중

f_v 폭풍이 부는 상황에서의 회전날개에 작용하는 공기력은 돌풍이 불때와 다소 차이가 있다. 이때의 회전날개는 이미 피치각 및 방향 제어장치에 의해 정치되는 있기 때문이다. 그러므로 이 경우의 회전날개는 Fig. 10과 같이 이상화하여 평판이론을 적용할 수 있다. 평판에 작용하는 힘 는 다음의 (23)식에 의해 계산할 수 있고 이때의 항력계수 C_d의 값은 2.0을 사용하였다.

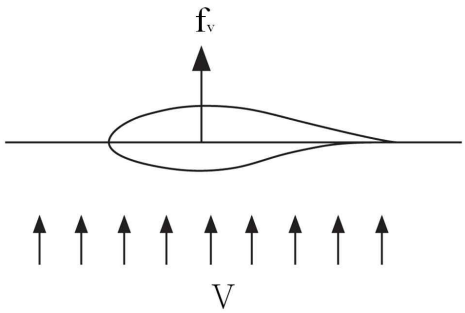

Fig. 10 Aerodynamic force due to storm in stop

$$f_v = \frac{1}{2} p C_d l V^2 \tag{23}$$

여기서 계산된 힘 역시 돌풍을 고려할 때와 마찬가지로 단면에 국한된 힘이므로 회전날개의 길이 방향에 대해 적분해야 한다. 힘과 모멘트를 적분하는 방법과 적분 구간은 돌풍일 때와 같으며 그 계산식은 다음과 같다.

$$F_v = \sum f_v \times \triangle r, F_{v(i)} = f_{v(i)} \times \triangle r + F_{v(i-1)} \tag{24}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 하중 해석 결과

Fig. 11 ~ Fig. 13는 각 하중조건별 하중해석 결과이며 load case Ⅱ의 경우가 블레이드에 가장 큰 모멘트를 유발함을 확인하였다. 따라서 본 연구의 구조설계는 이와 같은 load case Ⅱ의 하중을 기준으로 수행하였다.

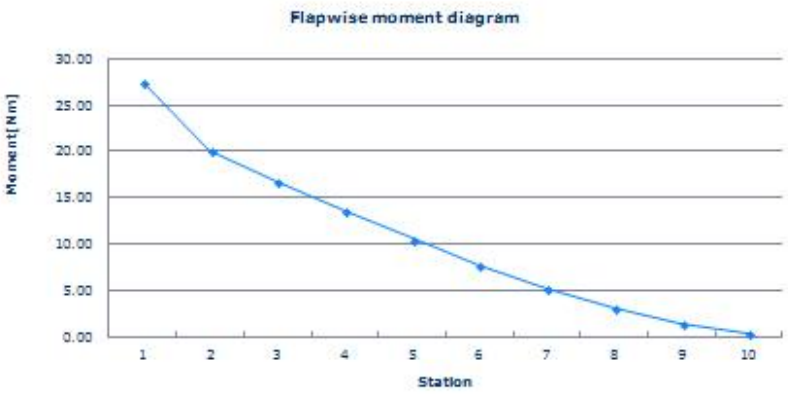

Fig. 11 Flapwise bending moment diagram for load case Ⅰ

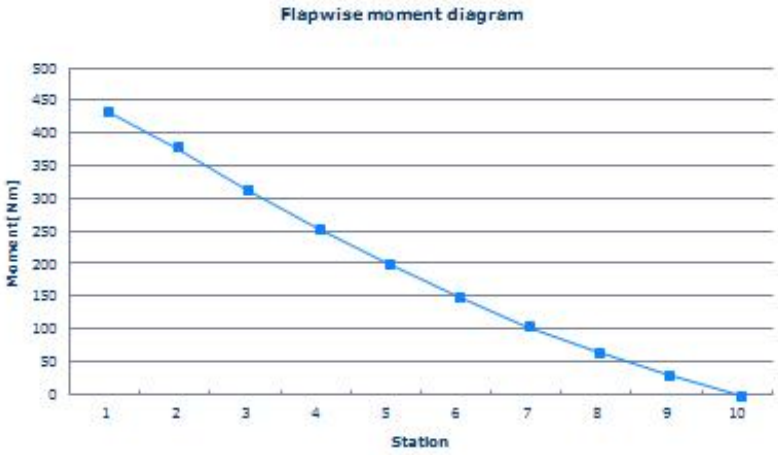

Fig. 12 Flapwise bending moment diagram for load case Ⅱ

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

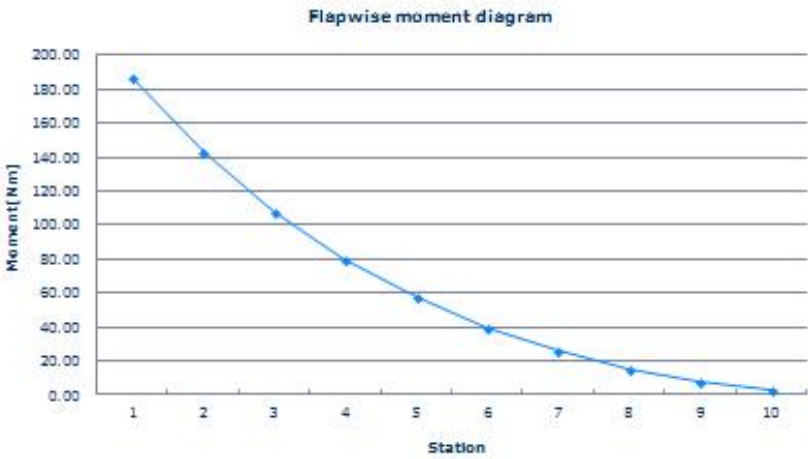

Fig. 13 Flapwise bending moment diagram for load case Ⅲ

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 구조단면 형상설계

자연섬유를 이용한 복합재 블레이드의 구조설계를 위해 기존에 설계되어진 유리섬유를 재설계 후 자연아마섬유로 구조설계를 진행 하였다. 일단 기본 블레이드의 구조는 Fig. 14와 같이 샌드위치 구조를 채택하였다. 이러한 구조는 45° 방향으로 적층하여 주로 전단하중을 담당하는 Skin과 블레이드의 길이방향으로 적층되어 주로 굽힘하중을 담당하는 Spar로 구성하였다. 또한 블레이드 내부에는 좌굴 강도 향상시키고 진동감쇠효과를 높여주도록 우레탄 폼을 적층하였다.

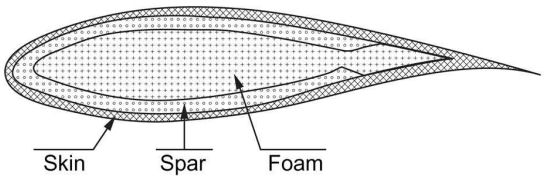

Fig. 14 Section design model for blade structure

각 구획별 하중을 계산하여 길이방향으로 자연섬유 복합재료를 적용하여 적층수를 결정하였다. 복합재료 설계 방법을 적용하여 초기 구조 설계 결과를 확정한 이후 구조해석을 통해 설계를 개선하는 방법을 적용하였다. Table 7은 이와 같은 방법으로 최종 확정된 Flax구조 설계의 결과이다. Table 8은 블레이드에 적용된 Flax fabric/Vinyl ester 복합재의 물성 값이다.

다음 Crippling 좌굴에 의한 Spar 설계 결과는 2.85mm 이며 아마섬유의 경우 1장당 두께가 1mm 임에 따라 적층 두께가 다소 늘어나게 되었다. 이에 대한 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{M_y}{h} = 1.5 \times P_{comp,ten}$$

$$\frac{\sigma_{crip}}{\sqrt{\sigma, E}} = \frac{C}{\left(\frac{b}{t}\right)^{0.75}} \quad \left(Where, \sigma_s = \frac{\sigma_{comp}}{S.F = 3} \right) \tag{25}$$

$$A_1 = \frac{P}{\sigma_{crip}} = bt = 15t^2 \quad \left(Where, \frac{b}{t} \approx 15 \right) \tag{26}$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

다음 전단 응력에 의한 Skin의 두께는 0.95mm로 해당 계산식을 통해 결정하였다.

$$M_t = M_x + Q_y Z_g - Q_z y_g \tag{27}$$

$$q = \frac{M_t}{2A} \tag{28}$$

$$q_{proof} = q \times S.F(=1.5) \tag{29}$$

$$t_{s1} = \frac{q_{proof}}{\tau_{allow}} \quad (Where, \tau_{allow} = \frac{Shear\,Strength}{S.F=3}) \tag{30}$$

(M_x=Pitching Moment Q_y=Normal Force Q_z=Tangential Force)

Table 7 Structural design results using flax fabric/vinyl ester composites

Station (r/R)	Thickness (mm)	
	Upper surface	Lower surface
Root ~ 0.1	Skin 1t(1ply) / Spar 5t (5ply)	Skin 1t(1ply) / Spar 5t (5ply)
0.1 ~ 0.2	Skin 1t (1)/ Spar 3t(3)	Skin 1t (1)/ Spar 3t(3)
0.2 ~ 0.3	Skin 1t (1)/ Spar 3t(3)	Skin 1t (1)/ Spar 3t(3)
0.3 ~ 0.4	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)
0.4 ~ 0.5	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)
0.5 ~ 0.6	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)
0.6 ~ 0.7	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)	Skin 1t (1)/ Spar 4t(4)
0.7 ~ 0.8	Skin 1t (1)/ Spar 2t(2)	Skin 1t (1)/ Spar 2t(2)
0.8 ~ 0.9	Skin 1t (1)/ Spar 1t(1)	Skin 1t (1)/ Spar 1t(1)
0.9 ~ 1.0	Skin 1t (1)/ Spar 1t(1)	Skin 1t (1)/ Spar 1t(1)

Table 8 Mechanical properties of materials used in the present blade design

	Flax fabric/vinyl ester composites	Polyurethane Foam
E11[N/mm2]	9900	60.86
E22[N/mm2]	9900	59.86
G12[N/mm2]	2070	19.18
v	0.18	0.2
Xt[N/mm2]	76.7	2.63
Xc[N/mm2]	72.8	1.41
Yt[N/mm2]	76.7	2.49
Yc[N/mm2]	72.8	1.41
S[N/mm2]	36.2	0.71
S[N/mm2]	1.43	0.1197
Ply thickness[mm]	1	12.5

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 구 조 해 석

풍력발전용 블레이드의 구조해석에는 일반적으로 강도해석이 고려되며, 공진 등의 동적인 문제와 좌굴 등이 검토된다. 특히 복합재료는 일반적으로 압축하중에 약하기 때문에 압축응력이 작용하는 부위의 안전성을 면밀히 검토하여야 한다.[16] 본 연구에서는 정적강도해석과 고유진동수해석 및 좌굴해석을 위해 유한요소 상용코드인 MSC.Nastran을 사용하였으며, 안전성 검토를 위한 파괴기준으로는 최대응력파괴이론[17]과 Tasi-Wu 파괴이론[18]을 적용하였다. Fig. 15는 유한요소 해석을 위한 격자(mesh) 생성 결과이며, 총 12632개의 요소로 구성되었다. 하중은 0.1 r/R 간격으로 분포 하중을 적용하였으며, 경계 조건은 날개의 뿌리 부분에 고정 조건을 적용하였다.

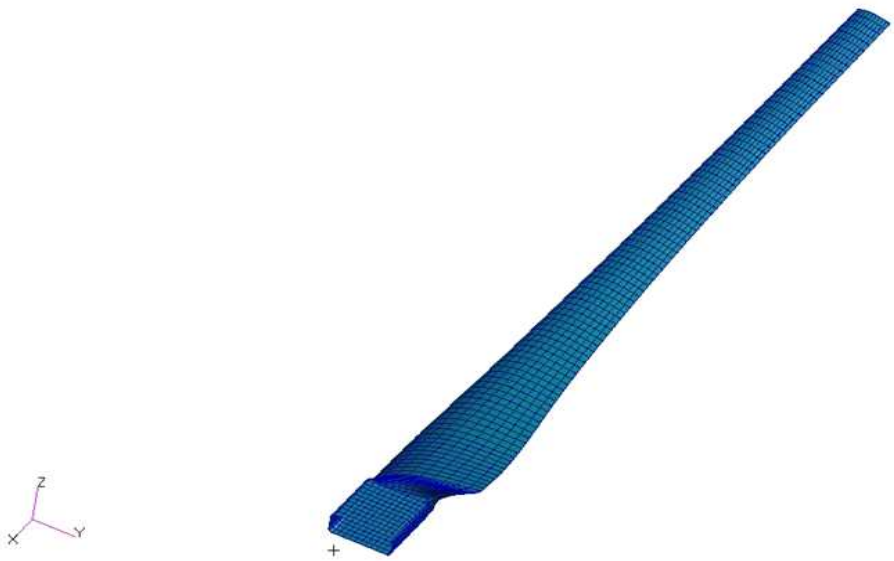

Fig. 15 Mesh generation for FEM analysis

1. 구조 해석 결과 (Glass/Epoxy 복합재 경우)

유리섬유를 이용하여 선행 연구를 재해석 결과 블레이드 한 개의 무게는 약 1.3 kg으로서 크기에 비해 경량의 블레이드로 설계되었다. 각 하중 조건에 따른 유한 요소 선형 정적 해석에 대한 검토 결과는 Table 9와 같다. 고유 진동수 검토결과 공진이 발

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

생하지 않았으며, 좌굴 해석의 경우 하중 배수가 1.2 로서 운용 중 좌굴 안정성을 충분히 확보한 구조임을 확인하였다. 여기서 하중 배수(load factor)란 현재 작용 하중에 이 값을 곱하면 해당 모드의 좌굴이 발생함을 의미하는 것으로서 주어진 하중에 대해 구조물의 좌굴에 대한 안전성을 나타내는 일종의 안전계수이다.

Table 9 Structural analysis results

		Case Ⅱ
Max. stress [MPa]	Ten.	68.7
	Com.	25.5
Max. disp. [mm]		166
Buckling load factor		1.2
Weight [kg]		1.3

2. 구조 해석 (Flax fabric/Vinyl ester 복합재 경우)

다음으로 본 연구에 맞춰 Flax fabric/Vinyl ester 복합재로 선형 정적 해석을 한 결과 이다. 블레이드 한 개의 무게는 약 1.5 kg로 이며 Table 10은 각 하중 조건에 따른 유한 요소 선형 정적 해석의 결과 및 이에 대한 파괴 여부를 검토한 것이다. 파괴 기준은 그 값 1 이상이면 파괴됨을 의미하며, 구조물의 안전도를 판단하는 기준이 된다. 선형 정적 해석 결과를 검토한 결과 최소 안전계수 4.33이 확보되는 안전한 구조로 설계되었음을 확인하였다. Fig. 16은 최대 하중인 설계하중(load case Ⅱ)에 대한 응력 분포로써 최대 압축응력은 11.6 MPa 최대 인장응력은 19.3 MPa 이며, Fig. 17은 이때의 변위 분포로서 최대 깃 끝 변위가 76.9 mm로 확인되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

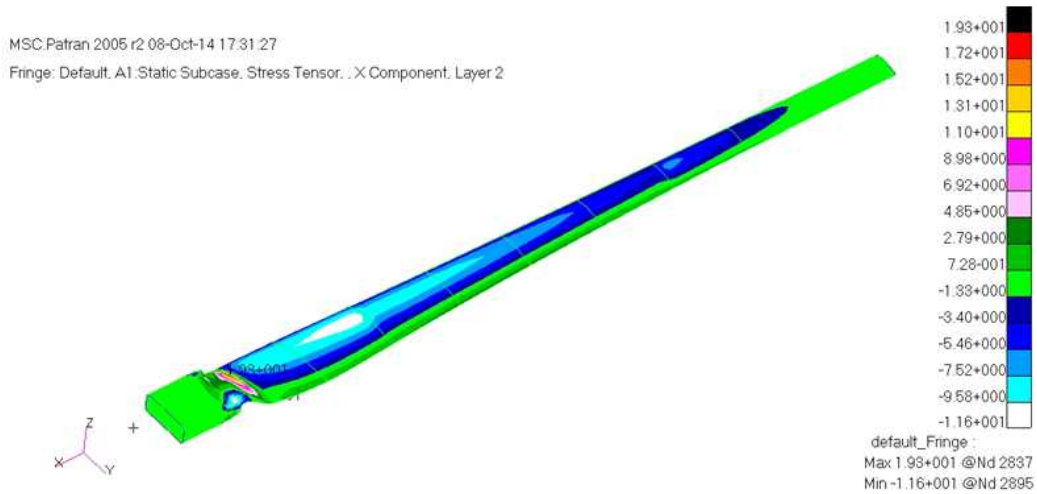

Fig. 16 Stress analysis result of load case Ⅱ

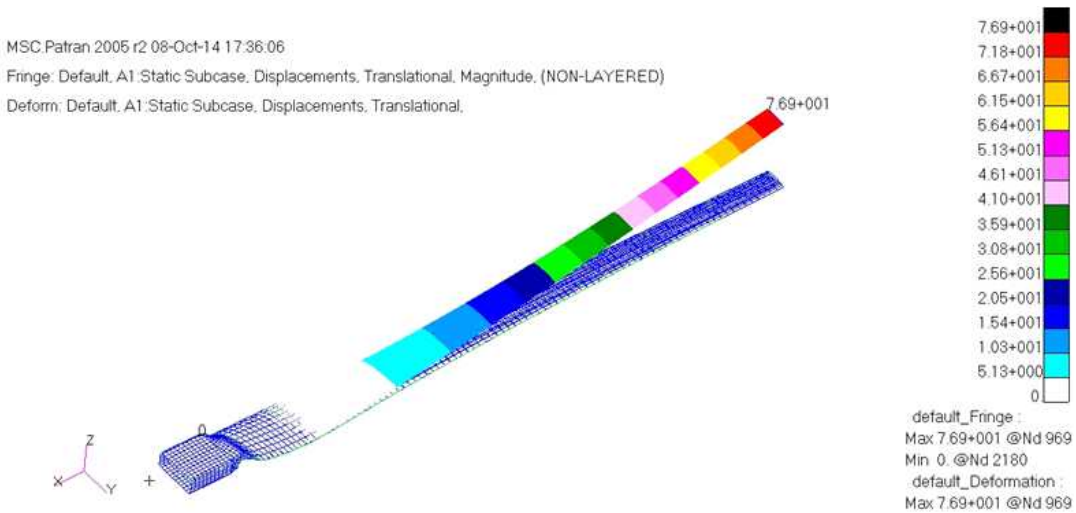

Fig. 17 Displacement analysis result of load case Ⅱ

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 10 Structural analysis results

		Case Ⅱ
Max. stress [MPa]	Ten.	19.3
	Com.	11.6
Max. disp. [mm]		76.9
Buckling load factor		3.09
Weight [kg]		1.5

3. 고유진동수 해석 및 공진 가능성 검토

Flax fabric/Vinyl ester를 이용한 블레이드의 고유 진동수 해석은 Fig. 18의 Campbell선도를 검토해보면 1차 12.885Hz 와 2차 38.105Hz 모두 최대회전수인 1069 rpm 근처에서는 공진이 발생하지 않음을 확인 할 수 있다. Fig. 19~ Fig. 22는 각각의 모드형상 및 진동수 해석결과를 도시한 것이다.

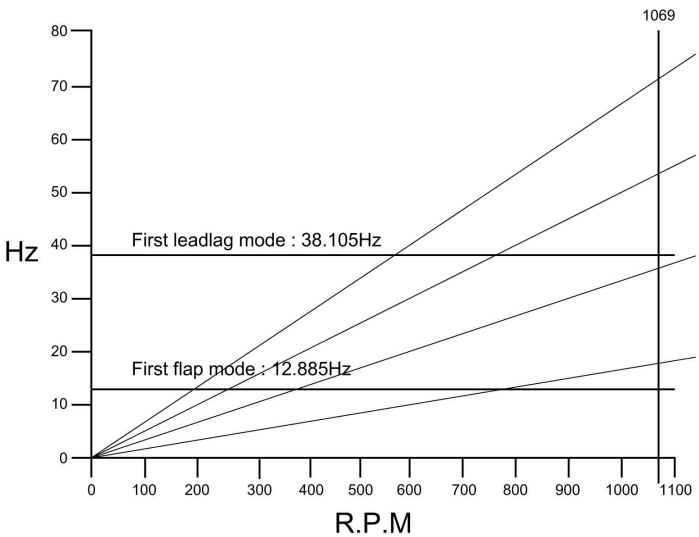

Fig. 18 Campbell diagram for resonance check

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

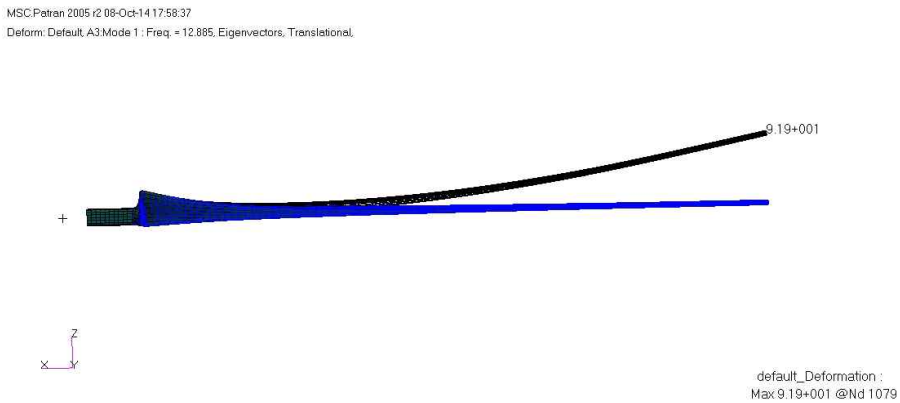

Fig. 19 First flap mode shape and frequency

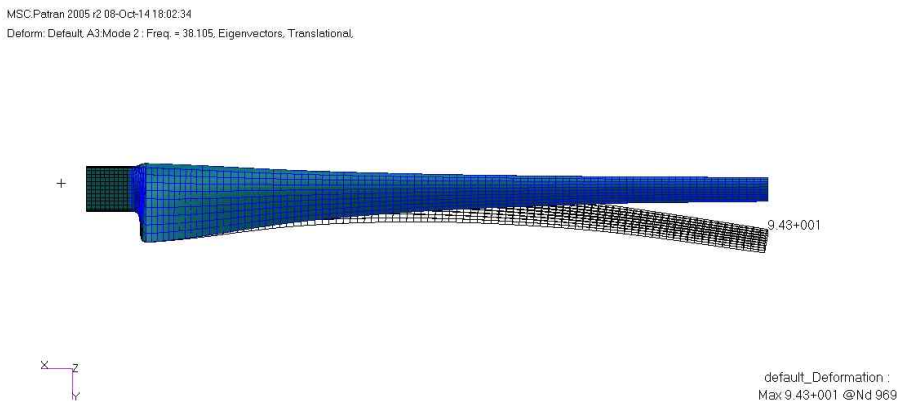

Fig. 20 First lead-lag mode shape and frequency

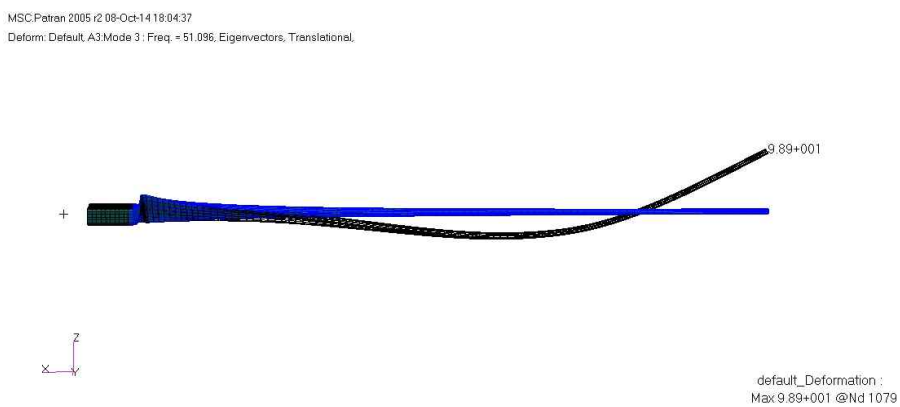

Fig. 21 Second flap mode shape and frequency

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

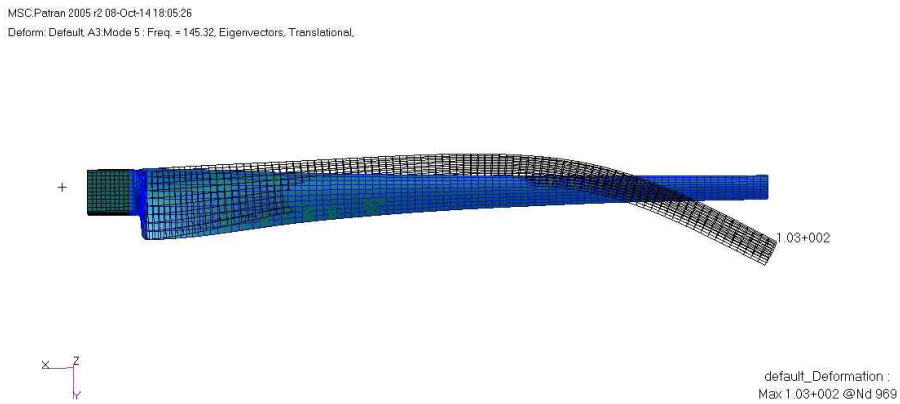

Fig. 22 Second lead-lag mode shape and frequency

4. 좌 굴 해 석

좌굴 해석결과 1차 좌굴 하중 배수가 3.094 로 좌굴에 대해 안전함을 확인하였다. Fig. 23 ~ Fig. 24는 하중조건 Ⅱ에 대한 좌굴해석의 결과를 도시화 하였으며 운용중에 좌굴 발생은 거의 희박함을 확인하였다.

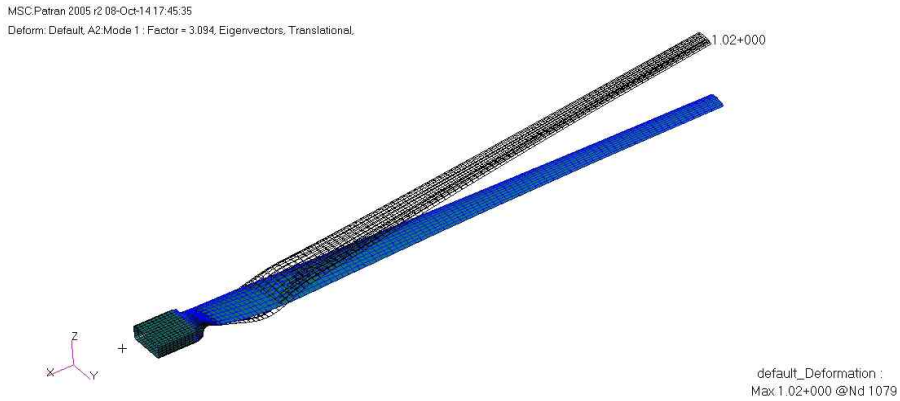

Fig. 23 First buckling mode shape and load factor at load case Ⅱ

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

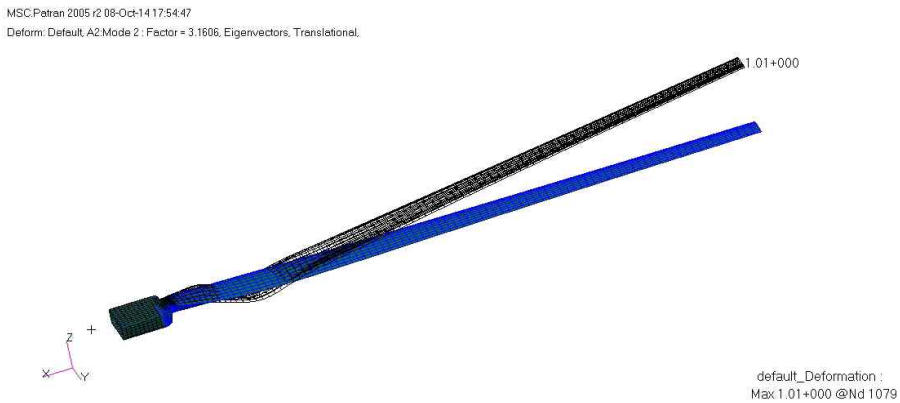

Fig. 24 Second buckling mode shape and load factor at load case Ⅱ

5. 구조 해석 결과 검토

각각의 섬유에 따른 블레이드 구조 해석 결과를 비교한 결과 아마섬유 재질의 한 층에 대한 두께가 유리섬유 복합재료보다 두꺼워 전체적인 구조 설계 결과의 무게는 다소 높게 확인되었다. 응력 해석 결과 유리섬유가 적용된 구조가 응력 분포는 낮게 검토되었다. 그러나 좌굴 검토 결과는 아마 재질이 보다 더 우수한 것으로 확인되었다. Table 11은 유리섬유 재질과 아마섬유 재질이 적용된 블레이드의 구조 해석 결과를 비교한 결과이다.

Table 11 Comparison between glass analysis results and flax analysis results

		Glass composite	Flax composite
Max. stress [MPa]	Ten.	68.7	19.3
	Com.	25.5	11.6
Max. disp. [mm]		166	76.9
Buckling load factor		1.2	3.09
Weight [kg]		1.3	1.5

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 제작공법 및 수지 침투 해석

제 1 절 RIM(Resin Infusion Molding) 제작공법

복합재료 제작을 위하여 기존에 잘 알려져 있는 오토클레이브 성형 법은 제품의 품질이 좋지만 제품을 생산하기 위한 장비 구축이 매우 고가로서 막대한 비용이 투입되어야 한다. 따라서 제품의 기본 생산 단가가 상승하게 된다. 또한 종래 널리 알려져 있는 수적층(Hand lay-up) 방식은 작업자 숙련 의존도가 높고 작업 환경이 열악한 반면 제작 단가는 매우 저렴하다.

이에 본 연구에서는 제작 공법으로 RTM(Resin Transfer Molding) 공법을 기반으로 한 RIM 성형 법을 채택하게 되었다. RIM 공법은 양쪽 면이 모두 견고한 금형으로 되어 있는 RTM과는 달리 한쪽 면은 견고한 금형을 사용하고 다른 면은 진공과 함께 유연한 금형을 사용하여 압력 차를 이용하여 금형 내부에 적층된 프리폼에 수지를 신속하게 함침시켜 성형하는 방법이다.[19,20]

본 공법은 진공의 흡입력과 진공 면에 가해지는 수직 압력을 이용하여 금형 내부의 기포를 줄여 섬유 체적율을 높이면서 수지 충전시간을 짧게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 RIM 공법은 RTM 보다는 섬유 체적율 이나 함침 시간 면 등 에서는 조금 떨어지지나 본 연구의 블레이드와 같이 대형구조가 아닐 경우 제작 장비나 작업 준비 면에서 시간, 공간, 금액의 효율성을 확보할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 Poly-worx 수지침투모사 전산프로그램

RIM 공법에서 수지 주입 시 고려되어야 할 사항은 수지의 점도(resin Viscosity), 수지 유동속도(resin flow velocity), 주입 압력(injection pressure)등이 있다. 특히 수지의 교반은 장시간 진행될 경우 초기 경화 현상이나 기포가 발생할 우려가 높으므로 최적의 조건을 맞추어야 한다.

RIM의 해석에서 가장 중요한 일은 유동 선단의 이동을 예측하는 것이다. 즉, 유동 선단의 위치가 성형공정에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 공정 변수로 작용하므로, 선단 위치를 정확하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 제품 형상이 대부분 불규칙하고 복잡하므로, RIM 공법을 이용한 복합재료 구조물 제작 시 금형 설계에 고려될 주입구(Injection port)/배출구(vent port) 선정 및 최적의 성형조건의 결정을 위하여 수지 유동 해석(resin flow analysis)은 필수적이다.

수지 유동을 해석하는 데는 수치해석적인 방법이 일반적으로 사용 되고 있는데, 본 연구에서는 RIM 제품 성형 공정에서의 수지 유동을 예측할 수 있는 상용프로그램 Poly-Worx를 통해 blade의 upper part와 lower part 구조물의 RTM 성형공정을 모사하였다.

본 연구에서는 유리섬유를 통해 실제 제작한 제품의 성형결과를 Poly-worx를 통한 시뮬레이션 결과를 비교하여 해석의 신뢰성을 확인하고 이후 Flax를 적용한 제품의 해석을 수행하였다.

수지 유동 해석을 통하여 유동 선단의 위치 및 수지 주입에 의한 금형 내부의 압력 분포, 수지충전시간을 예측하고 이를 바탕으로 수지주입 압력과 수지주입구(Injection port)와 배출구(vent port)의 위치 및 개수를 결정하였다. Fig. 25는 Poly Worx 전산프로그램를 활용한 수지 유동 해석 과정을 보여주고 있다.[19]

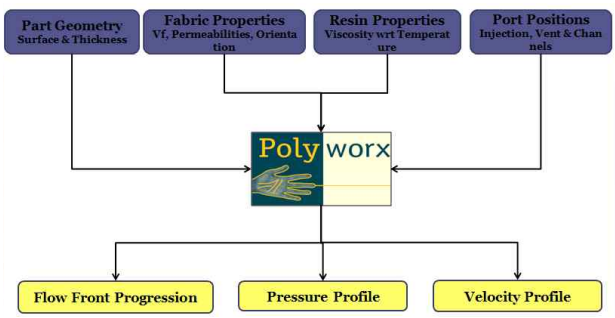

Fig. 25 Resin flow analysis process using Poly-worx

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 수지 침투 해석조건

제품 형상이 대부분 불규칙하고 복잡하므로, RIM 공법을 이용한 복합재료 구조물 제작시 주입구/배출구 선정 및 최적의 성형조건의 결정을 위해 수지유동해석을 하고 블레이드 구조물이 자연 섬유인 아마로 제품 성형에 적용 가능한지 판단하였다.

선행 연구를 통해 RTM 공법의 신뢰성을 확보 하였고 블레이드의 섬유 체적비는 RTM으로 제작된 시편을 통해 34% 로 측정되었다. 이때 자연 섬유의 함침성 계수는 선행연구에서 획득한 결과인 4.6e-11m^2 이며 RIM 수지유동해석은 동일한 조건으로 수행 하였다.[18]

이에 따라 프로그램을 통해 아마섬유 해석제품 성형 시간 예측 과 Dry-patch 유무 확인 할 수 있다. RIM 해석을 위해 적용한 조건은 유리섬유 일 때 Table 12 이며 아마섬유 일 때 Table13과 같다. 그 외에 주입 압력의 경우 경험적으로 1bar를 기준으로 적용하였으며, 제품의 두께의 경우 제품의 구조 설계 결과에 따라 적용 하였다.

블레이드 부분의 몰드 형상과 모델링은 Fig. 26에 각각 나타내었으며, 제작한 몰드의 수지주입구와 배출구의 위치 및 개수는 빨간 십자가가 수지 주입구이며, 파란 십자가가 배출구이다.

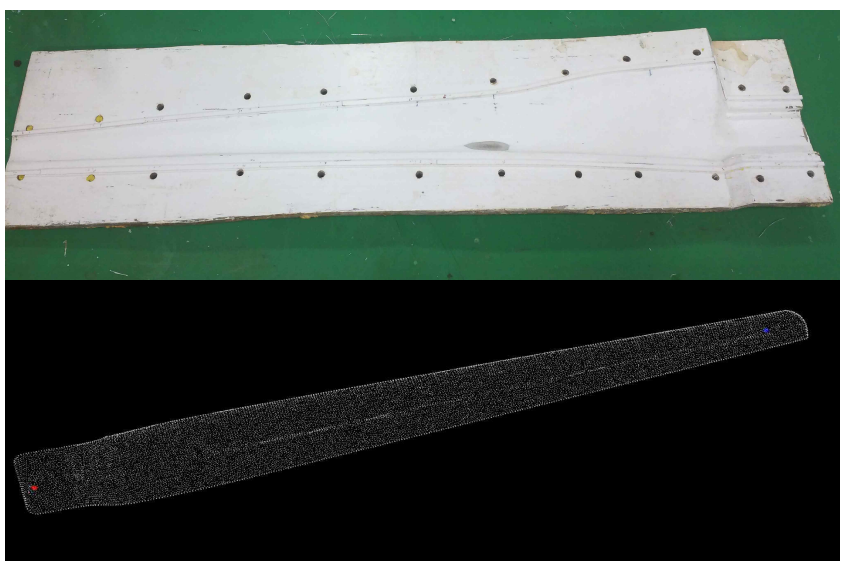

Fig. 26 Modeling result of the blade

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 12 Condition of injection port of glass

Infusion Pressure	1 bar	Fiber Permeability	1.6e-10m^2
Thickness	6mm	Resin	Epoxy
Channel Area	5mm^2	Resin viscosity	100cP
Volume Fraction	34%	Resin gel time	3000초

Table 13 Condition of injection port of flax

Injection Pressure	1 bar	Fiber Permeability	4.6e-11m^2
Thickness	6mm	Resin	vinyl ester
Channel Area	5mm^2	Resin viscosity	100cP
Volume Fraction	34 %	Resin gel time	3000초

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 해석결과 및 검토

본 연구에서는 유리섬유를 통해 실제 제작한 제품의 성형결과와 Poly-worx를 통한 시뮬레이션 결과를 비교하여 Poly-worx 해석의 신뢰성을 확인하고 이후 Flax를 적용한 제품의 해석을 수행하였다.

수지 유동 해석을 통하여 유동 선단의 위치 및 수지 주입에 의한 금형 내부의 압력분포, 수지충전시간을 예측하고 이를 바탕으로 수지주입 압력과 수지주입구(Injection port)와 배출구(vent port)의 위치 및 개수를 결정하였다. 수지유동 해석 결과 dry patch도 발견되지 않았으며 수지가 완전 주입 되는데 걸린 시간은 1620 초로 확인하였다. Resin gel time 때의 3000초보다 빠르게 주입되었기 때문에 수지 경화가 일어나기 전 주입이 완료됨을 확인 할 수 있었으며, 이렇게 해석된 유리섬유와 자연섬유 아마의 결과는 Fig. 27 - Fig. 28에 나타내었다. 왼쪽의 윤곽선은 Filling Time[s]을 나타내고 있다.

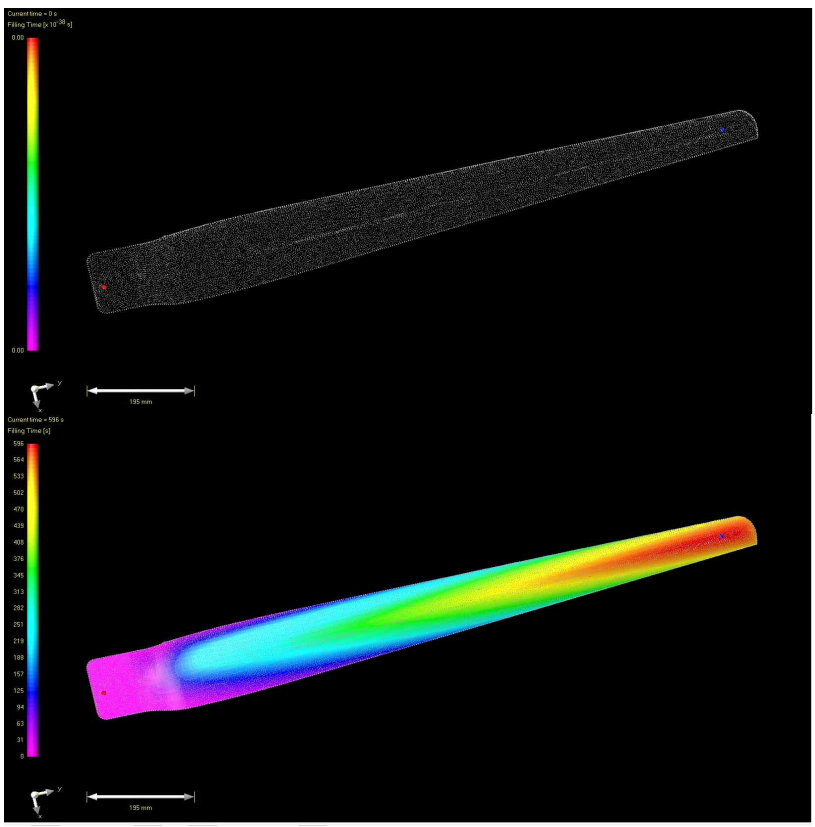

Fig. 27 Flow analysis result of glass blade

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

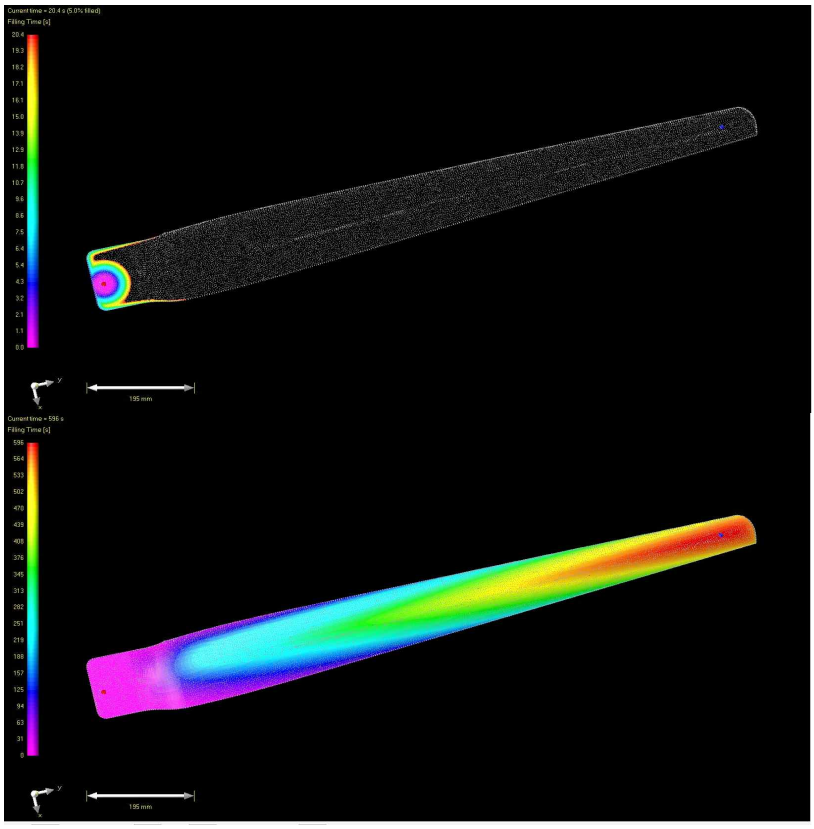

Fig. 28 Flow analysis result of flax blade

해석 완료 후 해석과 동일한 조건으로 실제 제품을 제작 하였으며, 해석상 수지 완전 주입 시간과 제작 시 수지 완전 주입 시간을 비교한 결과가 Table 14 에 나타내었다. 결과 값 비교를 통해 약간의 시간 오차가 있으나 이것은 제작시 해석 조건과 다른 실온 변화, 제작오차, 침투성 계수의 차이 등으로 추정된다. 그러나 오차시간이 다소 크지 않음에 따라 블레이드 제작에는 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

Table 14 Injection time of analysis and manufacture

	Injection Pressure (bar)	Dry patch	Analysis Injection time(sec)	Manufacture Injection time(sec)
Glass	1	x	596	768
Flax	1	x	1620	1850

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 7 장 시제품 제작 및 시험

제 1 절 시제품 제작

시제품 제작은 기존 블레이드를 이용하였으며 몰드의 재질은 glass/epoxy이며, 경화 중에 압력을 받더라도 변형되지 않는 충분한 두께를 갖는다. 이후 RIM 공법을 사용하기 위해 블레이드 외형을 따라 지지대를 설치하고 블레이드 뿌리(root) 부분과 끝(tip) 부분을 막는다.

이때 접착은 epoxy를 사용 하였으며 지지대 접착부위에 있어 수지와 공기가 세는 부분을 막기 위해 접착부위와 몰드사이에 또 한 번 칠하였다. 제작된 최종 몰드에는 Resin 주입 후 탈 형 시 용이하기 위해 섬유가 적층될 부위에만 이형제를 바른다. Fig. 29는 사용하였던 이형제 770-NC이며 이에 대한 제원은 Table 15에 나타내었다. Fig. 30은 이형제를 도포한 몰드이다.

여기서 이형제는 여러 재질의 성형에 있어서 효과가 탁월지만 주의할 사항으로는 이형제 도포시에 실란트 테이프(sealant tape)를 부착하는 부위는 피해서 해야 한다. 그렇지 않으면 실란트가 제 기능을 하지 못하고 떨어지는 현상을 보이기 때문이다.

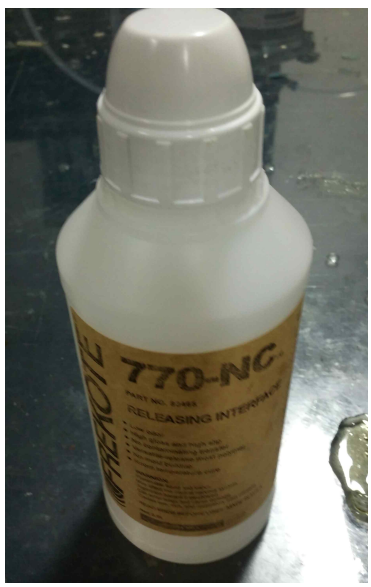

Fig. 29 Frekote mold release agent(770-NC)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 15 Properties of release agent(770-NC)

도포 가능 면적	1 U.S. Gallon(3.78L)
색상	투명한 액상
냄새	HYDROCARBON
희석제	ALIPHATIC HYDROCARBON
비중	0.76+/- 0.010
인화점	7℃
주의점	습기에 민감

Fig. 30 Applying mold releasing agents

겔코트(Gel-coat)를 도포 한 후 블레이드 크기에 맞게 제단 된 유리섬유를 적층하였다. Bagging film 안에서 공기의 흐름을 원활을 위해 필플라이와 천공필름을 적층하였고 적층 순서는 Fig. 31과 같으며 Fig. 32 - Fig. 33는 제단 후 적층까지의 모습을 나타내고 있다.

섬유 적층시 몰드는 채널(Channel) 과 러너(runner) 설정이 중요하기 때문에 지지대와 섬유 사이가 채널이 될 수 있도록 적적한 공간을 만들어 주는 게 주요하다. RIM 제작시 채널과 러너 가 정확하게 설정되지 못할 경우 그만큼 수지 주입시간이 길어지게 되어 불량이 제품이 나올 확률이 커지게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

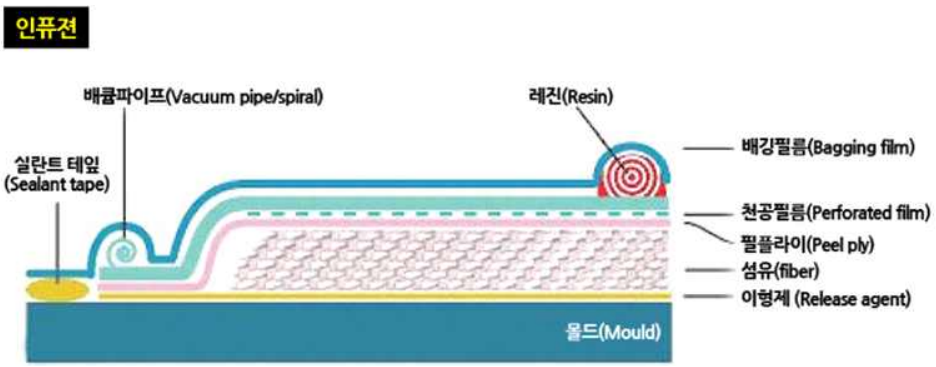

Fig. 31 built-up sequence

Fig. 32 Laminating flax

Fig. 33 Laminating peel ply

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이후 4면을 모두 실란트 테이프를 붙인 뒤에 진공 필름을 붙여 주입구와 배출구를 만들어 튜브를 수지저장통(Resin reservoir tank)과 연결한다. 연결 후 진공상태까지 확인하는 장면을 Fig. 34 - Fig.36에서 확인 할 수 있다.

Fig. 34 Applying sealant tape & bagging film

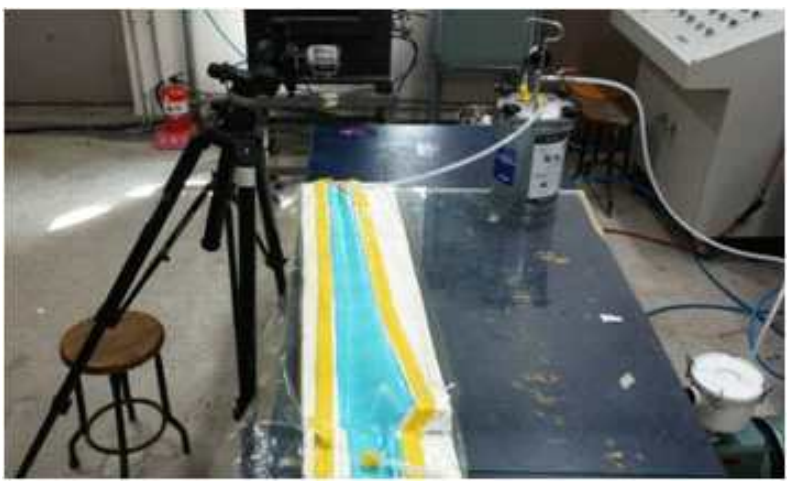

Fig. 35 Resin reservoir tank installation

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

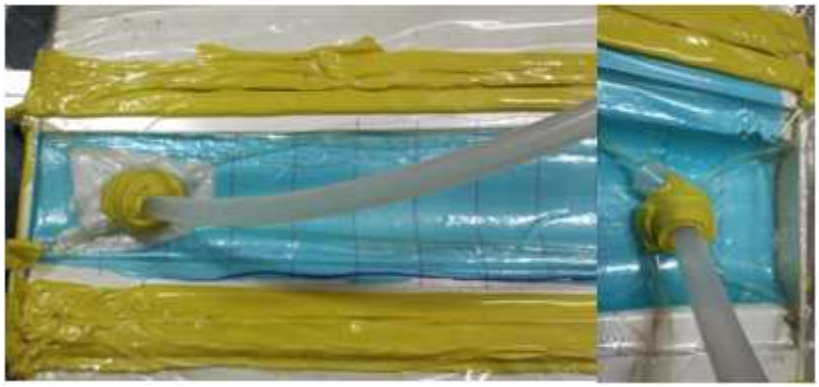

Fig. 36 Vacuum condition check

진공상태를 확인 후 주입 될 수지를 준비한다. 수지는 비닐에스테르(KRF-1031)로 경화제와 촉진제(KVE)를 100 : 1 : 1 의 비율로 혼합하여 사용하며 제원과 수지 사진은 은 Table 16, Fig. 37과 같다

선택한 수지는 상온경화용으로 점도 가 낮아 침투성이 좋으며, 또한 Gel time이 길기 때문에 RIM 공법 사용에 용이하여 사용하게 되었다.

Table 16 Resin spec

	비닐 에스테르(KRF-1031)
Color	0-80 APHA
Viscosity	0.8-1.2P
Gel Time	50-60 min
Acid Value	0-8 mg KOH/g
Non Volatile Monomer	54-58%
Curing Temperature	15-100℃
Mix ratio	100

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 37 Adhesive of Hysol EA9360

Root에서부터 Fig. 38과 같이 수지가 주입되고 완전 주입이 된 경우는 Fig. 39와 같다.

Fig. 38 Resin injection

Fig. 39 Resin injection

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수지가 완전 주입이 끝나고 하루정도 경화를 시킨 후에 몰드에서 탈형을 한다. Fig. 40 은 탈형 전 완전 경화가 이루어진 블레이드 모습이다.

Fig. 40 Form removal

탈 형 후에는 제작 시 붙어있는 불필요한 부분을 제거하기 위해 연마 하는 모습을 Fig. 41에 나타내었다. 연마 후 upper 와 lower 블레이드 모습은 Fig. 42에서 확인 할 수 있다.

Fig. 41 Grinding of blade

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 42 Upper and lower blades

연마 되어진 upper 와 lower 블레이드를 결합하기 위해 Fig.에 보이는 Hysol EA9360 이라는 Fig. 43 과 같은 항공용 접착제를 사용 하였으며 이것에 대한 제원은 Table 17에서 확인 할 수 있다. Fig. 44는 접착제를 붙이는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 43 Adhesive of Hysol EA9360

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 17 Uncured Adhesive Properties of Hysol EA9360

	Part A	Part B	Mixed
Color	Off White	Blue	
Viscosity @ 77°F	5700 Poise	1500 Poise	1200 Poise
Brookfield, HBT	Spdl 7@20 rpm	Spdl 6@20 rpm	Spdl 5@20 rpm
Viscosity @ 25°C	570 Pa·S	150 Pa·S	120 Pa·S
Brookfield, HBT	2.1 rad/sec	6.1 rad/sec	2.09 rad/sec
Density (g/ml)	1.18	1.0	
Shelf Life			
@ <40°F/4°C	1 year	1 year	
@ <77°F/25°C	6 months	6 months	
@ <90°F/32°C	6 months	6 months	
Mix ratio	100	43	

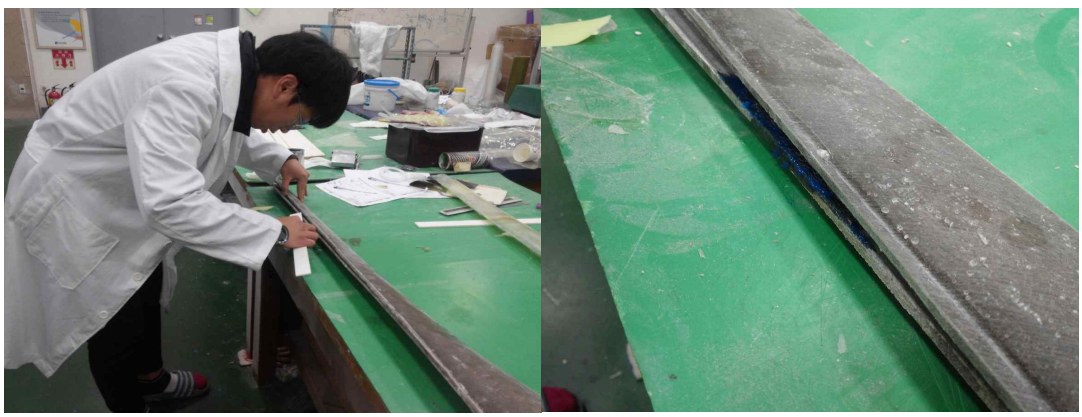

Fig. 44 Blade adhesive of upper&lower

마지막으로 하나로 결합 후 블레이드 내부에 우레탄 폼을 발포하는데, 이때 원래 부피의 약 3배정도로 팽창하는 폼의 발포 압력을 이용하여 적층된 섬유를 몰드에 밀착하도록 하였고, 에폭시가 몰드의 접착 면을 따라 흘러나오도록 유도하여 섬유 체적비가 향상되도록 하였다. Fig. 45 – Fig.46 에는 폼 발포 이후 우레탄 페인트로 칠해져 완성된 결과를 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 45 Polyurethane Foam

Fig. 46 First blade prototype

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 구 조 시 험

구조시험은 설계된 블레이드가 이론적인 해석결과와 잘 일치하는지를 확인하여 이론해석에서 제시한 안전계수 등의 제반 사항을 입증하기 위해 수행되었다. 본 논문에서는 구조시험으로 정하중 시험과 고유진동수 측정을 수행하였으며, 정하중 시험에서는 설계 하중을 작용시켜 이때의 응력 및 변위를 측정하여 해석 결과와 비교하는 방법을 취하였다.

1. 고유 진동수 측정 시험

고유 진동수 측정은 뿌리 부분이 고정된 블레이드에 중심으로부터 0.3R 지점에 부착된 가속도 센서 와 충격망치를 활용하여 측정하였으며 장비에 대한 제원은 Table 18 에 나타내었다. 시험 결과는 최종 구조 해석 결과와 비교하여 구조 안정성 확보 여부를 검토한다. 고유 진동수 측정은 가속도계 고정이 매우 중요하기 때문에 가속도계를 측정부위에 견고하게 부착할수록 좋은 결과를 획득할 수 있다. 본 시험에서는 가속도계를 부착하고 충격 망치를 활용하여 고유 진동수를 확인하였다. 측정된 데이터는 LabView 프로그램을 이용하여 데이터를 획득하였다. Fig. 47은 충격 망치를 활용하여 고유 진동수를 측정하는 과정을 보여주고 있다. Fig. 48은 이때 획득한 데이터를 FFT 분석한 결과로 Table 19에 유한요소 해석한 결과와 시험결과를 비교하였다. 시험결과 해석결과와 비교적 서로 잘 일치함을 확인하였다.

Table 18 Natural frequency data acquisition system

Company	National Instruments
Type	DAQ-9178, Compact DAQ Academic Bundle with LabVIEW Academic Premium Suite
Software	LabVIEW
Accelerometer	10mV/g
Impact Hammer	10mV/lb

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 47 Natural frequency test

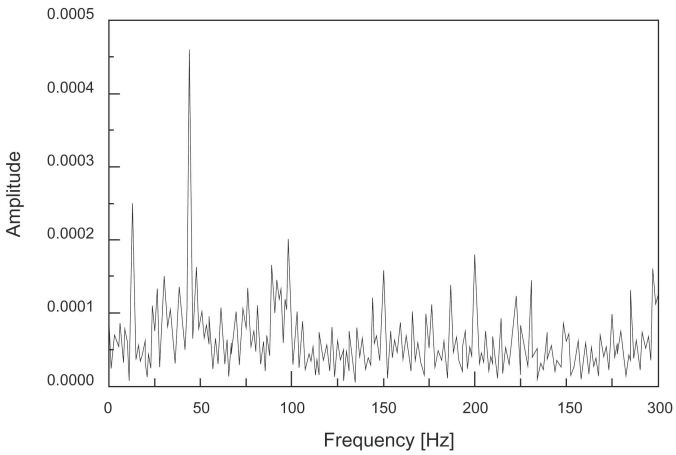

Fig. 48 Natural frequency results

Table 19 Comparison of natural frequencies between analysis results and test results

Mode shape	Analysis results	Test results
First flap mode[HZ]	12.885	13.034
First leadlag mode[HZ]	38.105	44.818

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 정 하중 구조시험

정 하중 시험을 위해 설계하중은 Fig. 49의 그래프와 같이 3점 집중하중으로 모래주머니(Sand bag)을 이용하여 모사 되었으며, 각각의 하중과 그 위치는 Table 20과 같다.

구조 시험에 앞서 결과 비교를 위해 MSC. NASTRAN을 이용한 Strain 해석은 Upper 와 Lower로 나누어 Fig. 50 - Fig.51에 나타내었다. 이후 해석 결과와 시험결과를 비교하여 타당성을 검토 하였다.

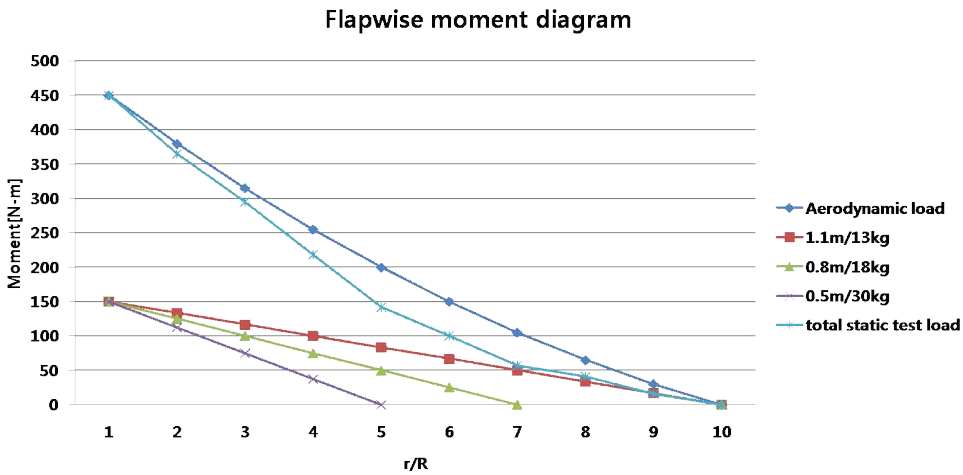

Fig. 49 Static strength test loads simulated by three-point loading method

Table 20 Simulated design load for static test

Distance from rotation center	Weight of the sand bag
0.5m	300N
0.8m	188N
1.1m	136N

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

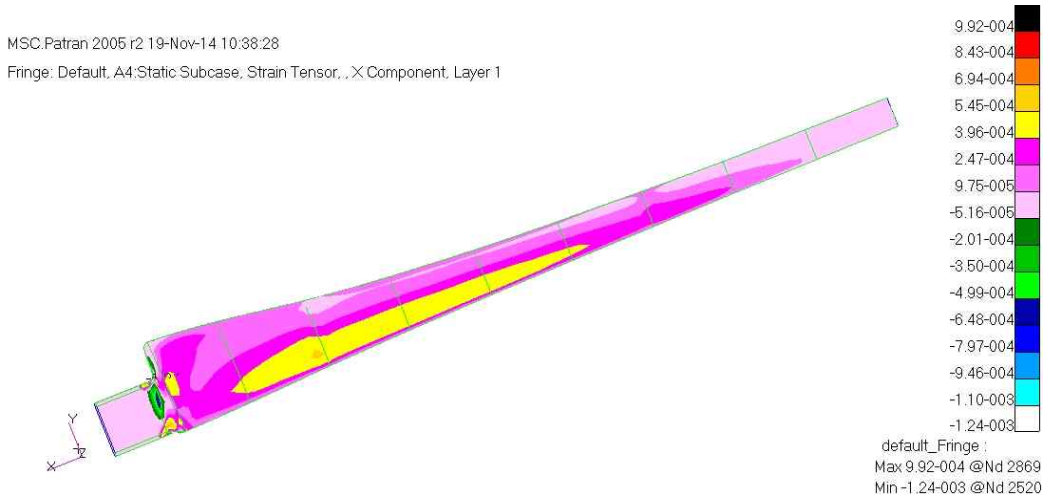

Fig. 50 Strain analysis results on upper surface

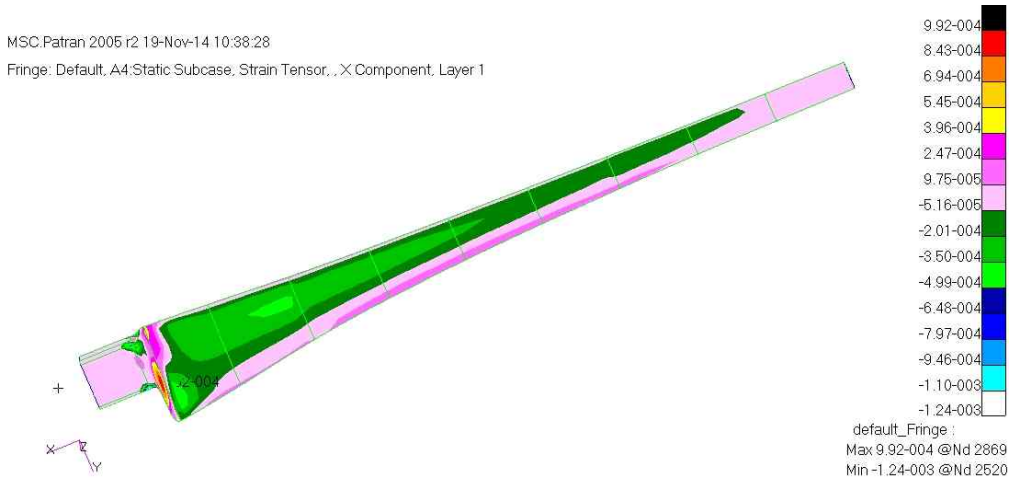

Fig. 51 Strain analysis results on lower surface

다음 Fig. 52 와같이 구조시험을 실시하기 위해 우선 시제품 표면에 에 스트레인 게이지를 부착하는 작업을 선행 하였다. 본 시험을 위해 블레이드 3개 지점에 스트레인 게이지를 부착 하였고 Fig. 53과 같이 Root로 부터 0.3R, 0.5R, 0.8R의 위치에 스트레인 게이지를 부착하였다. 하중은 앞서 명시한 0.5m, 0.8m 1.1m 위치에 주고 측정 하였다. 여기서 스트레인은 Fig. 54의 KYOWA 4 channel strain data acquisition system을 통하여 측정하였고, Fig. 55는 스트레인 데이터 획득 모습 이다. Table 21 과 Table 22 에는 스트레인과 획득 장치의 제원을 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 52 Static test of the blade

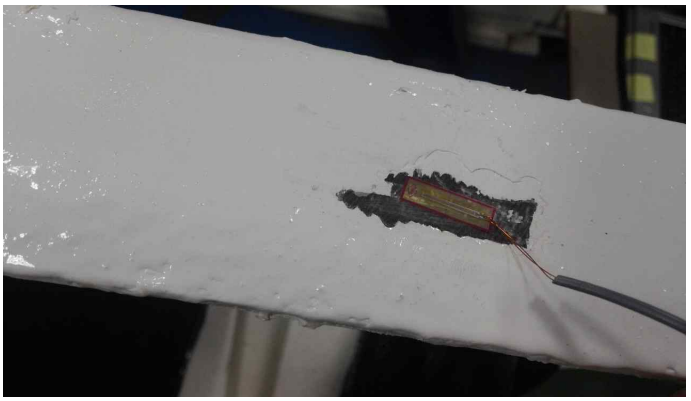

Fig. 53 Strain gage specification

Fig. 54 KYOWA 4 channel strain data acquisition system

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

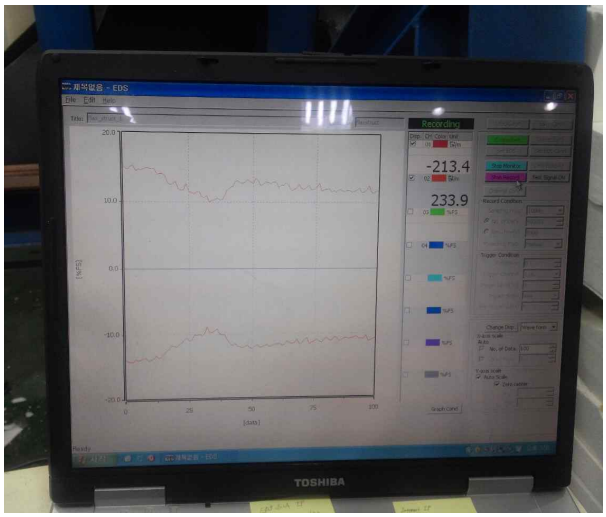

Fig. 55 Strain data acquisition of blade

Table 21 Strain gage Specification

Company	Tokyo Sokki Kenkyuio Co., Ltd.
Type	BFLA-5-8-1L
Gage length	5mm
Gage factor	2.09±1%
Gage resistance	119.8±0.5Ω

Table 22 Data acquisition system of strain gage

Company	KYOWA
Type	4channel strain data acquisition system
Software	EDS 400A

구조시험을 통해 얻은 결과와 앞서 해석에 대한 비교 그래프는 Fig. 56 - Fig. 57에 나타내었고, Table 23은 그 결과 비교한 값을 나타내었다. 본 시험을 통해 해석결과와 시험결과에서 오차가 발생하였으나, 값이 매우 작기 때문에 비교적 타당함을 확인 할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

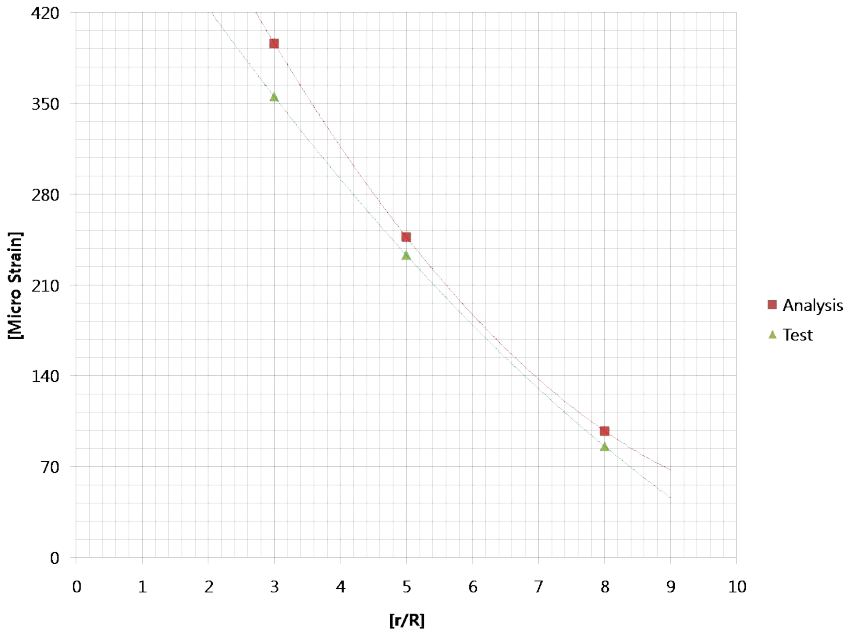

Fig. 56 Strain data during upper structural test

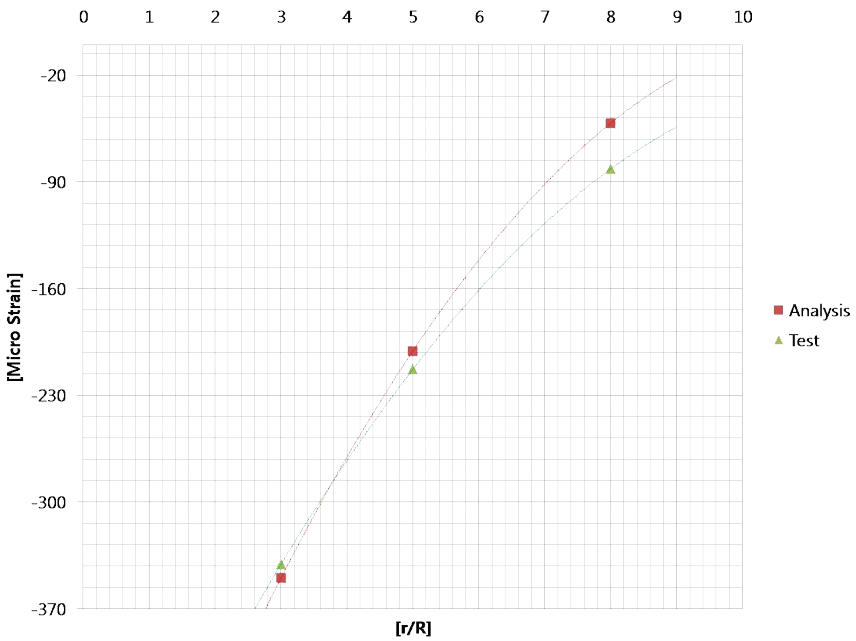

Fig. 57 Strain data during lower structural test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 23 Comparison between static analysis and test results

		해석 결과	시험 결과
변 위		76.9 mm	72 mm
Strain (0.3R from root)	upper	396μS	355μS
	lower	350μS	341μS
Strain (0.5R from root)	upper	247μS	233μS
	lower	201μS	213μS
Strain (0.8R from root)	upper	97.5μS	85.7μS
	lower	51.6μS	81.6μS

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 결 론

본 연구를 통해서 자연섬유인 아마를 이용한 Flax fabric/Vinyl ester 복합재료가 500W급 수평축 풍력발전용 블레이드로 적합한가에 대해 알아보고자 설계 및 해석, 제작, 실험을 통해 결과 값을 비교하고 확인 하였으며, 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1) 기존의 유리섬유로 제작된 날개 형상을 가져와 Flax를 사용하여 재설계 하였으며, 설계된 정격 풍속은 8m/s 에어포일은 DU 93-W-210 직경 2.5m, 회전속도 433rpm, 깃 끝 속도비가 7인 블레이드 이다.
2) 선형정적해석으로 구조설계가 확정된 블레이드는 최대하중 조건에서도 안전계수 4.13이 확보되는 안전한 구조이며, 이때의 자연섬유 Flax 블레이드의 경우 최대 약 76mm 임을 확인하였다.
3) 고유진동수의 경우 해석결과로부터 Campbell선도 작성 후 공진 가능성을 검토한 결과 1차 12.885Hz 와 2차 38.105Hz 모두 운용 중 공진 발생의 가능성은 거의 없음을 확인하였다.
4) 좌굴 해석결과 1차 좌굴모드에 대한 하중계수가 3.094로서 좌굴에 대해 안전한 구조물임을 확인하였다.
5) Poly-worx 프로그램을 이용하여 수지 유동 해석하고 해석 결과와 실제 제품 제작 결과를 비교 하였다
6) 제작 공법은 RIM을 사용 하였고, RTM과 오토클레이브 공법에 비해 성형비용이 적게 들면서 Hand lay-up 보다 작업환경 우수하며 매우 좋은 품질의 제품 성형이 가능한 기술 이다.
7) Rim 공법을 적용한 시제품 제작은 유리섬유 제작 통해 공법을 확립한 후 자연섬유인 Flax를 사용하여 제작하였다. Flax에 완전침투까지 요구된 사간은 해석한 결과 1620초로 제작결과인 1850초 와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.
8) 시제품 제작을 통해 공력 및 구조시험이 수행되었으며 시험결과는 해석 결과와 잘 일치하여 충분한 강도를 갖는 블레이드가 설계되었음을 확인하였다.
9) 향후 선정된 제작 공법을 이용해 제작된 자연섬유 복합재를 큰 하중을 받지 않는 블레이드 와 같은 분야에 기존 금속 구조물을 대체하여 친환경 구조물로 충분히 활용할 수 있을 것으로 분석 되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1. Ignaas Verpoest. “A general introduction to composites, highlighting the advantages of flax and hemp composites,” Jec composites, pp.15-37, 2012.
2. Moussa Gomina. “Flax and hemp composites applications,” Jec composites, pp.141-162, 2012.
3. P. J Herrera-Franco, A. Valadez-González, “Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer,” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 35, pp. 339-345, 2004.
4. M. Zampaloni, F. Pourboghrat, S.A. Yankovich, B.N. Rodgers, J. Moore, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, M. Misra. “Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions,” Composites: Part A, vol. 38, pp.1569-1580, 2007.
5. Vincent Placet. “Characterization of the thermo-mechanical behavior of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites,” Composites: Part A, vol. 40, pp. 1111-1118, 2009.
6. Dieter, G.E. et al. “Asssement of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology”, National Academy Press, pp.5-65, 1991
7.공창덕 외, “Structural Design and Experimental Investigation of Medium Scale Composite Wind Turbine Blade Considering Fatigue Life”, Proceeding of C&E 2002 and WESC 2002, 2002.
8. 공창덕 외, “Full Scale Structural Experimental investigation of an E-Glass/Epoxy Composite blade”, 14th International Conferenceon Composite Materials, 2003.
9. 방 조혁, “소형 풍력발전 시스템의 고효율 경량화 설계 및 해석에 관한 연구”, 조선대학교 박사학위논문, 2004
10. L. Q. N. Tran, C. Fuentes, C. Dupont-Gillain, A. Van Vuure, I. Verpoest , “Coir Fibre Composite: From Fibre Properties to Interfacial Adhesion and Mechanical Properties of Composites”, Proceeding of European Conference on Composite Materials, 2012, pp. 1~6.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

11. Jorg Mussig, Mark Hughes, 2012, “Flax and Hemp Fibers: A Natural Solution for the Composite Industry", JEC Composites, 2012, pp.40~41.
12. Foisal Ahmed Mirza, Ali Md. Afsar, Kim, B.S., and Song, J.I., “Recent Developments in Natural Fiber Reinforced Composites,” Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol.22, No. 4, 2009, pp. 41-49
13. Aranguren, M.I., and Reboredo, M.M., Plant-Based Reinforcements for Thermosets: Matrices, Handbook of Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends and Composites - Processing, and Properties, in Fakirov, S., Bhattacharyya, D., eds, Hanser, 2007.
14. Nah, C., Go, J.H., Byun, J.-H., and Hwang, B.S., “Curing of Epoxy Resin with Natural Cashew Nut Shell Liquids,” Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 21, No. 1, 2008, pp. 16-21.
15. 최수현 “소형 풍력발전 시스템용 저소음 경량화 복합재 블레이드의 설계에 관한 연구”, 조선대학교 석사학위논문, 2008
16. IEC 1400-1, ‘Wind Turbine Generator System Part Ⅰ’, Safety Requirement, First Edition, 1994.
17. Gibson, R. F., ‘Principles of Composite Material Mechanics’, McGraw-Hill, Inc.,PP. 103-106, 1994.
18. Chang, F. K. et al., ‘Strength of Mechanically Fastened Composite Joint’, J. of Composite Materials, 1982.
19. 이하승 외, “자연섬유를 적용한 구조물의 VARTM 수지 흐름 해석연구”, 항공우주시스템공학회, 2014
20. 박현범 외, “아마/비닐 에스테르 자연 섬유 복합재료의 기계적 특성 분석 연구”, Composites Research, Vol. 27, No. 1, 19-24, 2014

Collection @ chosun