

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

박광림* · 공창덕*[†] · 이하승* · 박현범**

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

Gwanglim Park*, Changduk Kong*[†], Haseung Lee*, Hyunbum Park**

ABSTRACT: In this work, a structural design on 500W class horizontal axis wind turbine blade using natural-fibre composite is performed. The structural design result of flax composite blade is compared with the result of glass composite blade. The structural design of the wind turbine blade is carried out using the simplified methods such as the netting rule and the rule of mixture. The structural safety of the designed blade structure is investigated through the various load cases, stress, deformation and buckling analyses using the commercial FEM. The structural test of the manufactured prototype blade was performed to confirm 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.

초 록: 본 연구에서 자연 섬유를 적용한 500W급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 구조 설계 연구를 수행하였다. 기존의 유리섬유 재질 적용 블레이드와 아마 섬유 재질 적용 블레이드의 구조 설계 결과를 비교하였다. 블레이드의 구조 설계는 단순 설계 및 혼합 설계 기법을 적용하여 설계를 수행하였다. 설계된 블레이드의 구조적 안전성은 상용 유한요소프로그램을 사용하여 다양한 하중에 따라 선형 정적해석, 변형 해석, 좌굴 해석을 수행하였다. 제작 공법으로는 RIM를 채택 하였으며, 시제품 제작을 통해 자연섬유에 완전 침투까지 요구된 시간을 Poly-worx 프로그램 해석 결과와 제작 결과를 비교하였다. 제작된 시제품 블레이드는 변형률, 고유 진동수, 변위 시험을 수행하여 구조해석 결과와 비교하였다. 비교 결과에 따라 해석 결과와 시험 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

Key Words: 친환경 섬유(Natural fiber), 아마(Flax), 복합재료(Composite materials), 수지 유동 해석(Resin flow analysis), 블레이드(Blade)

1. 서 론

세계적으로 복합재료는 기존에 사용된 금속을 대체하여 경량화가 요구되는 항공기 및 자동차 분야에 적용되고 있다. 일반적으로 이러한 복합재료 분야에 사용되는 제품은 운

용 이후에 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 비용으로 지속적으로 섬유

Received 3 April 2015, received in revised form 26 June 2015, accepted 29 June 2015

*Department of Aerospace Engineering, Chosun University

[†]Department of Aerospace Engineering, Chosun University, Corresponding author (E-mail: cdgong@chosun.ac.kr)

**Department of Defense & Science Technology-Aeronautics, Howon University

제공을 가능하게하며 재활용 할 수 있다. 본 연구에서는 아마(Flax) 자연섬유 복합재료를 이용해 500W급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 구조설계를 수행하였다[1,2]. 만들어진 섬유에 비해 상대적으로 낮은 비용과 지속적으로 섬유 제공을 가능토록하며 재활용 할 수 있다. 그 대상으로 아마(Flax) 자연섬유 복합재료를 이용해 500W급 수평축 풍력터빈 블레이드로 구조설계를 수행하였다[1,2].

구조 설계에 있어서 블레이드 적용 재료는 아마 비닐에스테르(Flax/vinyl ester) 복합재료 및 폼(Foam) 소재를 사용하고, 그 구조는 스킨-스파-폼 샌드위치 구조를 적용하였다. 아마 섬유 복합재 블레이드의 구조 설계 결과는 유리섬유 블레이드와 비교하였으며, 복합재 블레이드의 구조 설계 결과를 평가하기 위해서 구조 해석을 수행하였다. 이 해석 결과를 통해 제작된 블레이드는 RIM(Resin Infusion Molding) 공법을 적용하여 제작하였다. 최종 설계 및 해석된 블레이드의 시제품 제작을 통하여 구조시험을 수행하고, 구조 안전성을 확인하였다.

2. 블레이드 공력 설계

2.1 설계 및 해석 절차

블레이드 설계는 공력 설계와 구조 설계로 구분된다. 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 수행한다. 구조설계 결과는 변형을 및 응력 분포를 확인하기 위한 정하중 해석, 고유진동수 해석, 좌굴 해석, 피로 수명 해석을 수행하여 블레이드에 대한 안전성을 판단한다[2,3]. 다음으로 시제품을 제작한 후 구조 시험을 수행하여 구조 해석 결과와 비교를 통해 타당성을 검증하고 설계를 확정하게 된다.

2.2 블레이드 공력설계

본 연구 대상 풍력 발전 시스템의 사양은 Table 1에 명시한 바와 같이 수평축 풍력 발전 시스템으로서 정격 출력이 500W이며, 정격 풍속은 8 m/s이고, 적용된 에어포일은 DU

Table 1. System specification

Type	Horizontal axis wind turbine system (HAWTS)
Rated power	500W
Working range	Rated wind speed: 8 m/s
	Cut-out wind speed: 20 m/s
	Maximum survival wind speed: 55 m/s
Number of blades	Three

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

Rated power	500 W
Rotor diameter	2.50 m
Blade root chord	149.208 mm
Blade tip chord	42.727 mm
Blade total twist	24.35 deg.
Airfoil	DU 93-W-210

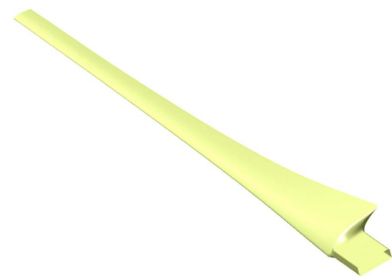


Fig. 1. Designed aerodynamic shape of 500W class wind turbine blade

93-W-210이다. 블레이드의 정격 출력의 근사식을 통해 2.5 m로 결정되었다. 설계 깃 끝 속도비는 출력을 높이면서도 소음을 감소시키기 위해 타당한 7을 선택하였다[4]. 세부적인 공력설계 결과는 Table 2에 명시하였으며, 블레이드 공력 형상은 Fig. 1과 같다.

3. 자연섬유 복합재료 분석

3.1 자연섬유와 수지의 종류

블레이드 구조 설계를 위해 본 연구에서 적용될 재료인 자연 섬유의 종류 및 특성에 관하여 분석하였다. 복합재료로 적용되는 자연 섬유는 크게 유기물과 무기물로 구분된다. 유기물은 식물의 섬유가 대표적인 복합재료이고 무기물은 광물 섬유 등으로 분류된다. 본 연구에서 다루어지



Fig. 2. Types of natural fibers

Table 3. Mechanical properties of thermosetting matrix materials

Property	Flax	Hemp	Jute	Sisal
Density [g/cm ³]	1.4	1.48	1.46	1.33
Tensile strength [N/mm ²]	800-1500	550-900	400-800	600-700
Stiffness [kN/mm ²]	60-80	70	10-30	38
Moist absorption [%]	7	8	12	11
Cellulose [wt%]	71	65	72	69



Fig. 3. Flax composite applications

는 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[5-7] Fig. 2는 대표적 자연 섬유를 보여주고 있다.

3.2 자연섬유와 수지 선정

친환경 자연섬유를 이용한 블레이드 설계를 위해 다양한 자연 섬유의 특성을 분석하였다. 먼저 섬유질의 함량을 비교했을 때 아마(flax)는 71%, 대마(Hemp)는 65%, 황마(Jute)는 72%, 사이잘(Sisal)은 69%로 분석되었으며 Table 3에서 확인할 수 있다[7]. 또한 기계적 강도 및 강성을 비교한 결과 아마 섬유가 우수한 것으로 검토되었다. 따라서 본 연구에서는 아마 섬유를 자연 섬유 구조물에 적용할 재료로 선정하였다.

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[5]. 최근에 아마 섬유는 항공기의 문, 자동차의 내장재, 건축 구조물, 원예공예, 휴대폰 케이스 등에 활용도가 증가하고 있는 것으로 분석되었다. 다음 Fig. 3에는 활용되고 있는 분야를 나타내었다.

3.3 아마/비닐 에스테르 기계적 물성치 연구 결과

본 연구에서 수지는 비닐 에스테르 수지를 채택하여 RIM 공법으로 제작한 복합재료 시편의 기계적 물성치를 검토하였다. 연구에 사용된 2-D Fabric인 경우 제작, 시험한 결과 아마 섬유 인장 강도가 76.7 MPa(섬유함유율 34%)로서

Table 4. 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

기준에 조사된 문헌 보다 높은 강도임을 확인하였다. Table 4는 강도 시험을 통해 분석된 아마 섬유 시편의 물성치이며, 이 결과를 바탕으로 2-D Fabric 소재를 구조 설계에 적용하였다.

4. 블레이드 구조 설계

4.1 구조 설계 결과

블레이드 구조 설계를 위해 작용하는 하중은 공력 하중, 원심 하중이 주 하중으로 작용한다. 원심하중은 유한 요소 해석 단계에서 구조 해석 모델에 회전수를 고려하여 적용할 수 있으므로 계산되어야할 하중은 IEC 1400-1 규격에 따라 Table 5와 같이 하중 조건을 정의하였다. 하중 해석 결과 load case 2의 경우가 블레이드에 가장 큰 모멘트를 발생시킴을 확인하였다. 여기서 공력 하중은 회전날개의 깃에서 발생하는 힘을 말하며, 이 힘은 깃의 굽힘이나 비틀림을 일으키고, 특히 풍력발전용 회전날개에서는 회전하는 힘을 발생 시킨다. 일반적으로 풍력발전기용 회전날개를 설계함에 있어 정상 작동 시 돌풍의 상황, 정지 시 폭풍의 상황이 고려 되어야한다. 돌풍은 수초 정도의 짧은 시간에 바람의 속도와 방향이 각각 10~20 m/s, 12~30° 정도로 변화하는 상황을 말하며, 바람의 방향이 바뀔 때 따라 즉각적으로 움직일 수 없기 때문에 돌풍의 방향과 블레이드의 회전축이 이루는 각도는 30~40°까지도 증가될 수 있다. 이는 회전날개 굽힘 응력을 증가시키는 요인이 되고 일반적으로 굽힘 응력 증가 요인은 바람의 속도 변화에 의한 것 보다 받음각 변화에 더 큰 것으로 알려져 있다.

4.2 구조단면 형상설계

구조 설계하중을 바탕으로 블레이드의 구조 형상은 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하여 설계하였다. 블

Table 5. Load cases for structural design

Load case	Case 1	Case 2	Case 3
Reference wind speed	8 m/s	20 m/s	55 m/s
Gust condition (±20 m/s, ±40°)	With gust	With gust	Storm condition
Rotational speed	433 rpm	1069 rpm	Stop

Table 6. Structural design results using flax fabric/vinyl ester composites

Station	Thickness (mm)			
	Upper surface		Lower surface	
1 (Root)	Skin 1t	Spar 5t	Skin 1t	Spar 5t
2	Skin 1t	Spar 3t	Skin 1t	Spar 3t
3	Skin 1t	Spar 3t	Skin 1t	Spar 3t
4	Skin 1t	Spar 4t	Skin 1t	Spar 4t
5	Skin 1t	Spar 4t	Skin 1t	Spar 4t
6	Skin 1t	Spar 4t	Skin 1t	Spar 4t
7	Skin 1t	Spar 4t	Skin 1t	Spar 4t
8	Skin 1t	Spar 2t	Skin 1t	Spar 2t
9	Skin 1t	Spar 1t	Skin 1t	Spar 1t
10 (Tip)	Skin 1t	Spar 1t	Skin 1t	Spar 1t

레이드 구조 설계 형상은 스킨과 스파가 블레이드 길이방향으로 적층되고 블레이드 내부에 폼이 적용된 구조 형태이며 각 구획별 하중을 계산하여 길이방향으로 유리섬유 복합재료를 적용하여 적층수를 결정하였다.

선행 연구를 통해 유리섬유 재질을 적용하여 설계된 블레이드 구조를 아마 자연섬유 복합재료를 적용하여 설계를 변경하고 구조해석을 통하여 구조 안전성을 평가하였다. 설계 방법은 유리섬유로 설계를 동일하게 적용하여 설계 하였으며, 재질만 변경하여 설계한 결과 아마 재질이 적용된 전체적인 구조 형상의 두께가 보다 두꺼워진 것으로 검토되었다. Table 6에 아마 섬유 복합재료를 적용하여 구조 설계된 결과를 명시하였다.

4.3 구조 해석 결과

구조 설계 결과의 타당성을 입증하기 위해 본 연구에서는 구조 해석을 통해 응력, 변위, 좌굴에 대한 안전성을 검토하였다. 원심 하중은 회전수를 적용하여 모사하였으며, 경계 조건은 블레이드 뿌리 부위 고정 경계 조건을 적용하였고, 길이방향으로 분포 하중을 적용하였다.

유리섬유를 이용하여 구조 설계된 결과를 해석한 결과 블레이드 한 개의 무게는 약 1.3 kg으로서 크기에 비해 경량의 블레이드로 설계되었다. 고유 진동수 검토결과 공진이 발생하지 않았으며, 좌굴 해석의 경우 하중 배수가 1.2로서 운용 중 좌굴 안정성을 충분히 확보한 구조임을 확인하였다.

아마 섬유 블레이드 해석 결과 블레이드 한 개의 무게는 약 1.5 kg이며 각 하중 조건에 따른 유한 요소 선형 정적 해석의 결과 및 이에 대한 파괴 여부를 검토하였다. 파괴 기준은 그 값 1 이상이면 파괴됨을 의미하며, 구조물의 안전도를 판단하는 기준이 된다. 선형 정적 해석을 검토한 결과 최소 안전계수 4.33이 확보되는 4.49로 안전한 구조로 설계

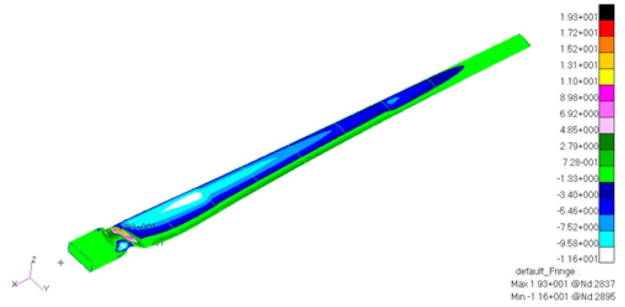


Fig. 4. Stress analysis result of load case II

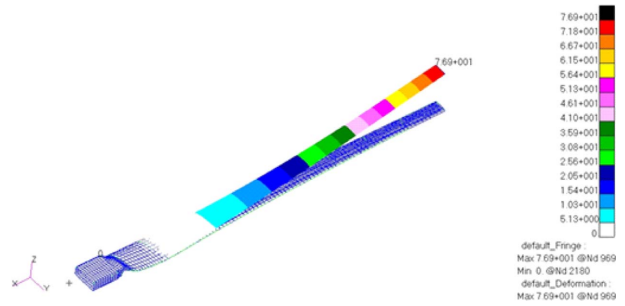


Fig. 5. Displacement analysis result of load case II

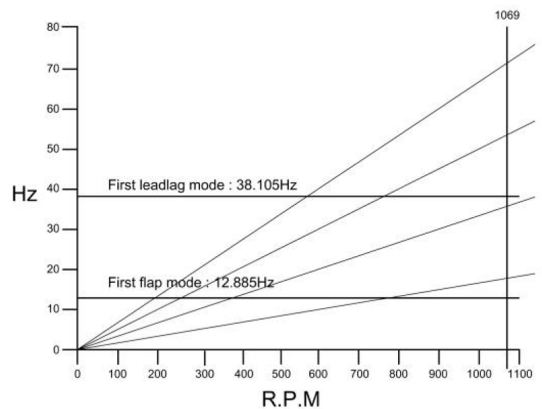


Fig. 6. Campbell diagram for resonance check

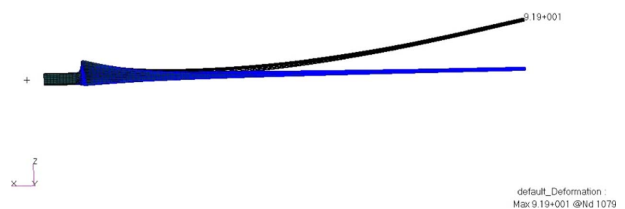


Fig. 7. First flap mode shape and frequency

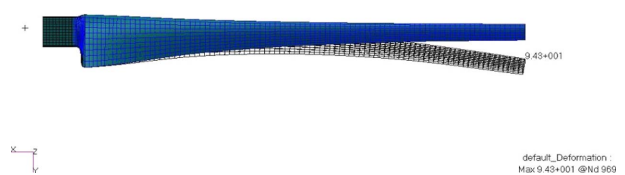


Fig. 8. First lead-lag mode shape and frequency

Table 7. Comparison between glass analysis results and flax analysis results

		Glass	Flax
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
S.F.		4.3	4.49

되었음을 확인하였다. Fig. 4는 최대 하중인 설계하중(load case II)에 대한 응력분포로서 최대 압축응력은 11.6 MPa 최대 인장응력은 19.3 MPa이며, Fig. 5는 이때의 변위 분포로서 최대 깃 끝 변위가 76.9 mm로 검토되었다.

아마 섬유 블레이드의 고유 진동수 해석은 Fig. 6의 Campbell 선도를 검토해보면 1차 12.885 Hz와 2차 38.105 Hz 모두 최대회전수인 1069 rpm 근처에서는 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 7, 8은 각각의 모드형상 및 진동수 해석결과를 도시한 것이다.

4.4 유리섬유와 아마섬유 재질에 따른 구조 해석 결과 비교

블레이드의 섬유 차이에 따른 구조 해석 결과를 비교한 결과 아마섬유 재질의 한 층 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 7은 유리섬유 재질과 아마섬유 재질이 적용된 블레이드의 구조 해석 결과를 비교한 결과이다.

5. 제작 공법 및 수지 침투 해석

5.1 RIM(Resin Infusion Molding) 제작공법

복합재료 제작을 위하여 기존에 잘 알려져 있는 오토클레이브 성형법은 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 수직층(Hand lay-up) 방식은 작업자 숙련 의존도가 높고 작업 환경이 열악한 반면 제작 단가는 매우 저렴하다[8,9]. 이에 본 연구에서는 제작 공법으로 RIM 성형법을 채택하게 되었다. RIM 공법은 비교적 제작 비용이 저렴하며 고품질 제품을 성형할 수 있다.

5.2 Poly-worx 수지 침투 해석

수지 유동을 해석하는 데는 수치해석적인 방법이 일반적으로 사용되고 있는데, 본 연구에서는 RIM 제품 성형 공

Table 8. Condition of injection port of glass

Infusion Pressure	1 bar	Fiber Permeability	1.6e-10m ²
Thickness	6 mm	Resin	Epoxy
Channel Area	5 mm ²	Resin viscosity	100 cP
Volume Fraction	34%	Resin gel time	300 sec

Table 9. Condition of injection port of flax

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

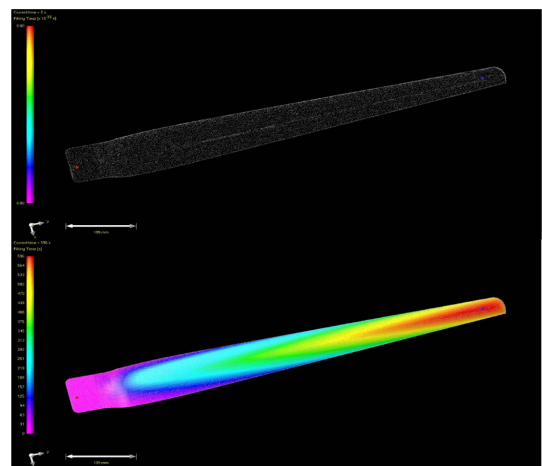
정에서 수지 유동을 예측할 수 있는 상용프로그램 Poly-Worx를 통해 블레이드의 상면과 하면 구조물의 성형공정을 모사하였다.

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[8]. 자연 섬유의 함침성 계수는 선행연구에서 획득한 결과인 4.6e-11m²이며 RIM 수지 유동 해석은 동일한 조건으로 수행하였다[10].

본 연구에서 RIM 해석을 위해 적용한 조건은 유리섬유일 때 Table 8이며 아마섬유일 때 Table 9와 같다. 그 외에 주입 압력은 1 bar를 기준으로 적용하였어 유동 해석을 수행하였다.

5.3 해석결과 및 검토

본 연구에서는 유리섬유를 통해 실제 제작한 제품의 성형결과와 Poly-worx를 통한 시뮬레이션 결과를 비교하여 Poly-worx 해석의 신뢰성을 확인하고 이후 아마 섬유를 적

**Fig. 9.** Flow analysis result of glass blade

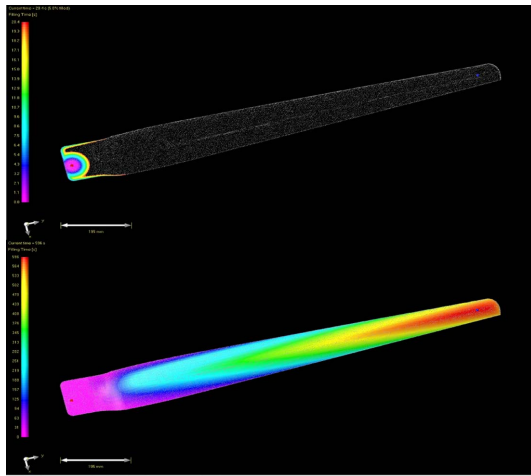


Fig. 10. Flow analysis result of flax blade

Table 10. 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

용한 제품의 해석을 수행하였다.

수지 유동 해석을 통하여 유동 선단의 위치 및 수지 주입에 의한 금형 내부의 압력분포, 수지충전시간을 예측하고 이를 바탕으로 수지주입 압력과 수지주입구와 배출구의 위치 및 개수를 결정하였다. 수지유동 해석 결과 dry patch도 발견되지 않았으며 수지가 완전 주입 되는데 걸린 시간은 1620초로 확인하였다. Resin gel time 때의 3000초보다 빠르게 주입되었기 때문에 수지 경화가 일어나기 전 주입이 완료됨을 확인하였다. 해석된 결과는 Fig. 9, 10에 나타내었다. 왼쪽의 윤곽선은 Filling Time[s]을 나타내고 있다.

해석 완료 후 해석과 동일한 조건으로 시제품을 제작하였으며, 해석상 수지 완전 주입 시간과 제작 시 수지 완전 주입 시간을 비교한 결과를 Table 10에 나타내었다. 비교 결과 일부 오차는 있으나 유사한 결과임을 확인하였다.

6. 시제품 제작 및 시험

6.1 시제품 제작

시제품 제작은 몰드 제작 이후 RIM 공법을 사용하기 위해 블레이드 외형을 따라 지지대를 설치하고 블레이드 뿌리(root) 부분과 끝(tip) 부분에 RIM 장비를 적용하여 제작하였다. 상면 블레이드 및 하면 블레이드를 각각 제작한 후 상면과 하면을 접합하여 최종 시제품을 완성하였다. Fig. 11는 제작된 블레이드 시제품이다.

6.2 구조 시험

구조시험은 설계된 블레이드가 이론적인 해석결과와 잘 일치하는지를 확인하여 이론해석에서 제시한 안전계수 등의 제반 사항을 입증하기 위해 수행되었다. 구조시험은 정

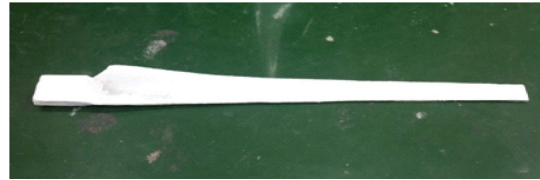


Fig. 11. First blade prototype

Table 11. 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

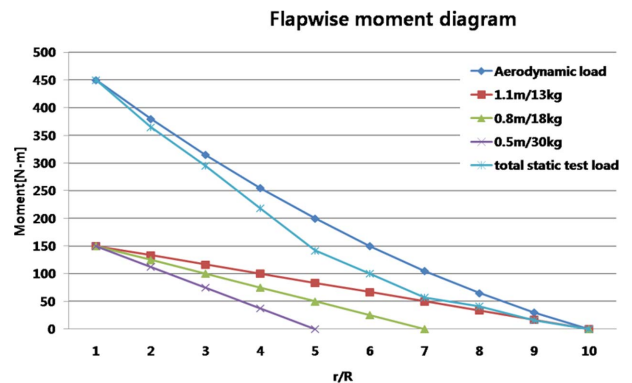


Fig. 12. Static strength test loads simulated by three-point loading method

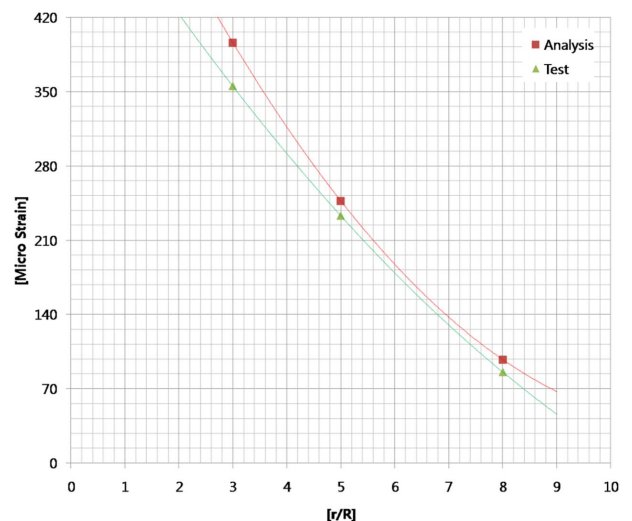


Fig. 13. Strain data during upper structural test

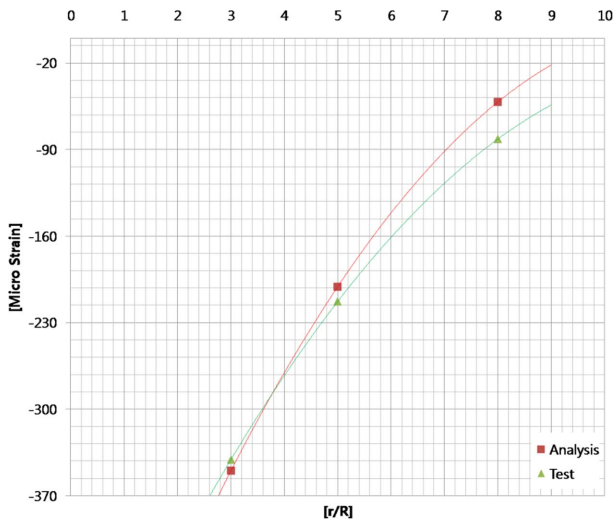


Fig. 14. Strain data during lower structural test

Table 12. Comparison between static analysis and test results

		Analysis results	Test results
Displacement		76 mm	72 mm
Strain (0.3R from root)	upper	396 μ S	355 μ S
	lower	350 μ S	341 μ S
Strain (0.5R from root)	upper	247 μ S	233 μ S
	lower	201 μ S	213 μ S
Strain (0.8R from root)	upper	97.5 μ S	85.7 μ S
	lower	51.6 μ S	81.6 μ S

하중 시험과 고유진동수 측정을 수행하였다. 정하중 시험에서는 설계 하중을 3점 하중으로 작용시켜 응력 및 변위를 측정하여 해석 결과와 비교하였다.

먼저 고유 진동수 측정을 위해 스트레인 게이지를 부착한 후 충격망치를 이용하여 충격을 주었다. 그리고 이때에 변화되는 스트레인 값을 데이터 획득 장치(EDS400A, KYUWA)를 통해 수집하였다. 이때 획득한 데이터를 FFT 분석하여 Table 11에 유한요소 해석한 결과와 시험결과를 비교하였다. 비교 결과 서로 잘 일치함을 확인하였다.

정적구조 시험을 위해 설계하중은 Fig. 12와 같이 3점 집중하중으로 모사 되었다. 집중 하중을 위한 무게와 하중 위치는 0.5, 0.8, 1.1 m에 각각 5, 11.5, 14, 16 kg을 사용하였다. 구조시험을 통해 획득된 결과와 앞서 해석에 대한 비교 그래프는 Fig. 13, 14에 나타내었고, Table 12는 세부 비교 결과이다.

7. 결 론

본 연구를 통해서 자연섬유인 아마 섬유가 적용된 500W 급 수평축 풍력발전용 블레이드의 설계 및 제작을 수행하

였다. 단계별 수행 결과는 다음과 같다.

1) 기존의 유리 섬유로 설계된 블레이드와 아마 섬유로 설계된 블레이드를 비교하였으며, 설계된 정격 풍속은 8 m/s, 에어포일은 DU 93-W-210 직경 2.5 m, 회전속도 433 rpm, 깃 끝 속도비가 7인 블레이드이다.

2) 선형정적해석으로 구조설계가 확정된 블레이드는 최대하중 조건에서도 안전계수 4.13이 확보되는 안전한 구조이며, 이때의 자연섬유 아마 블레이드의 경우 최대 변위는 76 mm임을 확인하였다.

3) 고유진동수의 경우 해석결과로부터 Campbell선도 작성 후 공진 가능성을 검토한 결과 1차 12.885 Hz와 2차 38.105 Hz 모두 운용 중 공진 발생의 가능성은 없는 것으로 확인하였다.

4) 좌굴 해석결과 1차 좌굴모드에 대한 하중계수가 3.094로서 좌굴에 대해 안전한 구조물임을 확인하였다.

5) Poly-worx 프로그램을 이용하여 수치 유동 해석을 수행하고, 해석 결과와 시제품 제작 결과를 비교하였다. 제작 공법은 RIM을 사용하였다.

6) 시제품 제작을 통해 구조 시험이 수행되었으며 시험 결과는 해석 결과와 잘 일치하여 충분한 강도를 갖는 블레이드가 설계되었음을 확인하였다.

7) 향후 제작된 자연섬유 복합재 구조는 친환경적으로 일부 재활용이 가능하며 작업환경을 개선하여 사용시 인체에 영향을 주지 않고 자연으로부터 저가로 지속적으로 공급할 수 있는 장점이 있어 큰 하중을 받지 않는 블레이드와 같은 분야에 기존 금속 구조물을 대체하여 친환경 구조물로 충분히 활용할 수 있을 것으로 분석되었다.

후 기

이 논문은 2015학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

1. Verpoest, I., "A General Introduction to Composites, Highlighting the Advantages of Flax and Hemp Composites", *Jec Composites*, pp. 15-37, 2012.
2. Gomina, M., "Flax and Hemp Composites Applications", *Jec Composites*, pp. 141-162, 2012.
3. Kong, C., Sugiyama, Y., and Soutis, C., "Structural Design and Experimental Investigation of Medium Scale Composite Wind Turbine Blade Considering Fatigue Life", *Proceeding of C&E 2002 and WESC*, 2002.
4. Kong, C., "Full Scale Structural Experimental Investigation of an E-Glass/Epoxy Composite Blade", *14th International Conference on Composite Materials*, 2003.
5. Choi, S.-H., *A Study on Design of Low Noise and Light Composite Blade for A Small Wind Turbine System*, Choi, S.-H., The-

- sis, Chosun University, KOR, 2008
6. Tran, L.Q.N., Fuentes, C., Dupont-Gillain, C., Van Vuure, A., and Verpoest, I., "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.
 7. Jorg Mussig and Mark Hughes, "Flax and Hemp Fibers: A Natural Solution for the Composite Industry", *JEC Composites*, 2012, pp. 40-41.
 8. Mirza, F.A., Afsar, A.M., 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.
 9. Lee, H., Park, H., Kong, C., and Park, G., "Study on VARTM Resin Flow Analysis Using Natural Fiber to Structural", The Society for Aerospace System Engineering spring conference 2014, pp. 1-4.
 10. Park, H., Kong, C., Lee, J., Kim, I., and Lee, H., "Investigation on Mechanical Properties of Flax/Vinyl Ester Natural", *Fiber Composite, Composites Research*, Vol. 27, No. 1, 2014, pp. 19-24.
 11. Chang, F.K., Richard, A.S., and George, S.S., "Strength of Mechanically Fastened Composite Joint", *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, No. 6, 1982, pp. 470-494.