

자연섬유 복합재료 풍력 발전 시스템 블레이드 제작 및 구조 시험 연구

박현범^{1,†}¹호원대학교 국방과학기술학부 항공시스템공학 전공

A Study on Manufacturing and Structural Test of Wind Turbine System Blade using Natural Composite

Hyun Bum Park^{1,†}¹Dept. of Defense Science & Technology-Aeronautics, Howon University

Abstract

In this work, a manufacturing and structural test of 1kW class horizontal axis wind turbine blade using natural-fiber composite was performed. The aerodynamic design of blade was performed after investigation on design requirement. The structural design load was investigated after aerodynamic design of blade. And also, structural design of blade was carried out. The structural design of blade was carried out using the simplified methods such as the netting rule and the rule of mixture applied to composite. The structural safety of the designed blade structure is investigated through the various load cases, stress, deformation and buckling analyses using the FEM method. Finally, the blade manufacturing and structural test using natural composite was carried out.

초 록

본 연구에서는 자연섬유 복합재료를 적용하여 1kW급 수평축 소형 풍력 발전 시스템 블레이드의 제작과 구조 시험 연구를 수행하였다. 블레이드의 설계 요구 조건을 분석하여 공력 설계를 수행하였다. 공력 설계 이후 구조 설계 하중을 도출하고 블레이드의 구조 설계를 수행하였다. 블레이드의 구조 설계 기법은 복합재료를 적용한 단순 설계 기법과 혼합 설계 기법을 적용하였다. 설계된 블레이드의 구조 안전성은 다양한 하중조건, 변위, 좌굴 등의 해석을 위해 유한요소기법으로 분석하였다. 최종 자연 섬유를 적용한 블레이드 제작하였으며, 구조 시험을 수행하였다.

Key Words : Natural Composite(자연섬유 복합재료), Wind Turbine Blade(풍력 블레이드), Manufacturing(제작), Structural Test(구조 시험)

1. 서 론

유리섬유 및 탄소섬유는 대표적인 복합재료로서 경량화를 위하여 항공기, 자동차 등 대형 구조물의 제작 재료로 적용되고 있다. 최근 복합재료 분야에서도 친환경 소재 복합재료에 대한 관심이 증대되고 있으며

관련 분야의 연구가 다양하게 진행 중이다[1]. 국내에서도 자연 섬유를 분석하여 기존의 복합재료를 대체하는 연구가 다양하게 수행되고 있다[2].

본 연구에서 다양한 친환경 소재의 장단점을 분석한 후 자연 섬유를 적용하여 풍력 발전 시스템 블레이드를 설계하였다. 설계된 블레이드를 제작한 후 구조 시험 결과를 분석하였다. 또한 친환경 복합재료인 자연 섬유를 적용한 복합재 구조물의 거동을 고찰하기 위하여 기존의 유리 섬유가 적용된 블레이드를 자연 섬유를 적용하여 설계한 후 비교하였다.

Received: Aug. 16, 2017 Revised: Aug. 24, 2017 Accepted: Aug. 28, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-63-450-7727, E-mail: swordship@howon.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

2. 자연섬유 복합재료 분석

현재 적용되고 있는 자연섬유는 아마(Flax), 대마(Hemp), 황마(Jute), 케나프(Kenaf), 모시(Ramie), 아바카(Abaca), 대나무(Bamboo), 코이어(Coir) 등이 있다[3,4]. 이 중에서 아마, 황마, 대마 등은 인장강도가 높은 편으로 산업용으로 적용하기에 적합한 형태이다. 본 연구에서는 아마를 채택하여 풍력 발전용 블레이드에 적용하여 구조 설계를 수행하였다. Table 1에 참고 문헌에서 분석한 유리섬유/에폭시 복합재와 아마섬유/에폭시 복합재의 기계적 물성치를 비교하였다[5,6]. 복합재물성치는 직조형태로 제조된 시편을 시험한 결과이다. Figure 1은 아마섬유의 직조형상을 보여주고 있다.



Fig. 1 Weaving configuration of flax composite fabric

Table 1 Mechanical properties of glass/epoxy laminate and flax/epoxy laminate

Material Property	Glass/epoxy Fabric	Flax/epoxy Fabric
Elastic modulus [MPa]	10,500	9,200
Shear modulus [MPa]	1,450	2,070
ν	0.27	0.4
Tensile strength [MPa]	283	120
Compressive strength [MPa]	184	90
Shear strength [MPa]	15	38
Density [g/cm ³]	1.87	1.43
Ply Thickness [mm]	0.25	0.70

3. 블레이드 설계

3.1 유리섬유 복합재료 블레이드 설계

본 연구 대상 풍력 발전 시스템의 사양은 정격 출력이 1kW이며, 정격 풍속은 12.8m/s이고, 적용된 에어포일은 NACA 632-615이다. 블레이드의 직경은 3m이고, 비틀림 각은 23°이다. 적용될 발전기는 낮은 풍속에서 고효율 에너지 변환 장치로 적용될 수 있는 직접 구동형 AFPM(Axial flux permanent magnet) 발전기이다. 세부적인 공력 설계 결과는 Table 2에 명시하였다. Figure 2는 블레이드 공력 형상을 보여주고 있다.



Fig. 2 Designed aerodynamic configuration of wind turbine blade

Table 2 Aerodynamic design results of small wind turbine blade

Rated power	1 kW
Rotor diameter	3 m
Blade root chord	144 mm
Blade tip chord	65 mm
Blade total twist	23 deg
Airfoil	NACA 632-615

구조 설계를 위한 블레이드에 작용하는 하중은 공력 하중, 원심하중이 주 하중으로 작용한다. 원심하중은 유한 요소 해석 단계에서 구조 해석 모델에 회전수를 고려하여 적용할 수 있으므로 계산되어야 할 하중은 공력하중으로 Table 3과 같은 하중 조건을 정의하였다.

굽힘 하중은 깃 단면의 시위에 수직하게 작용하는 힘으로 정의되며 그 크기는 바람의 세기나 깃의 받음각에 따라 달라지므로 각각의 상황에 따라 다르게 계산되어야 한다. 하중 해석 결과 load case 2의 경우가 블레이드에 가장 큰 모멘트를 발생시킴을 확인하였다. 구조 설계하중을 바탕으로 블레이드의 구조 형상은 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하여 설계하였다. 블레이드 구조 설계 형상은 스킨과 스파가 블레이드 길이방향으로 적용되고 블레이드 내부에 폼이 적용된 구조 형태이며 각 구획별 하중을 계산하여 길이방향으로 유리섬유/에폭시 복합재료를 적용하여 적층수를 결정하였다. 복합재료 설계 방법을 적용하여 초기 구조 설계 결과를 확인한 이후 구조 해석을 통해 설계를 개선하는 방법을 적용하였다. 초기 설계 결과에 대한 구조 안전성 평가 결과 공진 여부가 확인되어 개선 설계를 통해 최종 설계 결과를 확정하였다. Table 4는 이와 같은 방법으로 최종 확정된 구조 설계 결과이다.

Table 3 Load cases for structural design

Load case	Case 1	Case 2	Case 3
Reference wind speed	12.8m/s	30.0m/s	55.0m/s
Gust condition ($\pm 20\text{m/s}, \pm 40$)	without gust	with gust	storm
Rotational speed	500rpm	800rpm	stop

Table 4 Structural design results (glass/epoxy composite)

Statio n	Thickness(mm)			
	Upper surface		Lower surface	
1 (Root)	Skin 1.25t	Spar 7.00t	Skin 1.25t	Spar 7.00t
2	Skin 1.00t	Spar 4.75t	Skin 1.00t	Spar 3.00t
3	Skin 1.00t	Spar 3.50t	Skin 1.00t	Spar 2.00t
4	Skin 1.00t	Spar 3.25t	Skin 1.00t	Spar 1.75t
5	Skin 1.00t	Spar 3.00t	Skin 1.00t	Spar 1.25t
6	Skin 1.00t	Spar 2.75t	Skin 1.00t	Spar 1.25t
7	Skin 1.00t	Spar 2.25t	Skin 1.00t	Spar 1.00t
8	Skin 1.00t	Spar 2.00t	Skin 1.00t	Spar 1.00t
9	Skin 1.00t	Spar 1.50t	Skin 1.00t	Spar 0.75t
10 (Tip)	Skin 1.00t	Spar 0.75t	Skin 1.00t	Spar 0.50t

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.

각 하중 조건에 따른 선형 정적 해석결과 load case 2에서 압축 응력이 22.4MPa, 인장 응력이 30.3MPa로서 충분한 안전율을 확보한 구조로 설계되었음을 확인하였다. 최대 변위는 46.1mm로 검토되었다. Figure 3과 4에 설계 기준이 된 load case 2의 응력 분포 및 변위 해석 결과를 명시하였다. 좌굴 안정성 평가 결과 또한 하중 배수 5.4로서 운용 중 좌굴 안정성을 충분히 확보한 구조임을 확인하였다. 좌굴 해석 결과는 Fig. 5에 명시하였다.

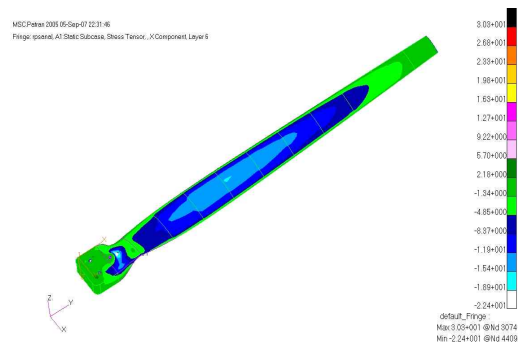


Fig. 3 Stress analysis result of glass/epoxy composite blade at load case 2

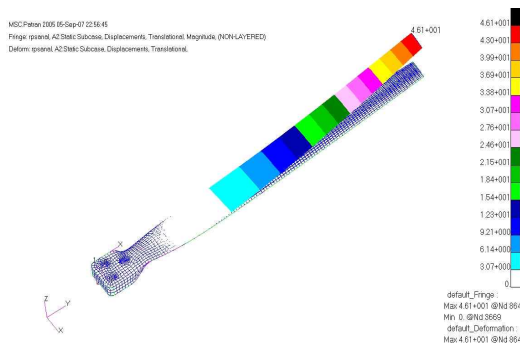


Fig. 4 Deformation of glass/epoxy composite blade at load case 2

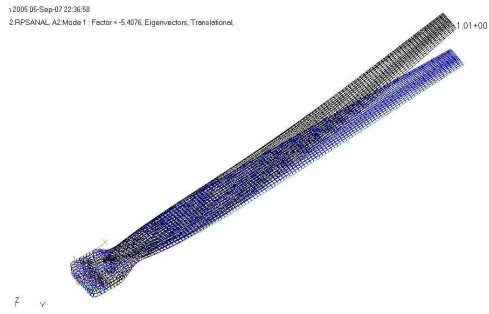


Fig. 5 First buckling mode shape and load factor at load case 2

3.2 자연섬유(아마) 복합재료 블레이드 설계

유리섬유/에폭시 재질을 적용하여 설계된 블레이드 구조를 아마/에폭시 자연섬유복합재를 적용하여 설계를 변경하고 구조해석을 통하여 구조 안전성을 평가하였다. 설계 방법은 동일한 설계 방법을 적용하였으며 재질만 변경하여 설계한 결과 아마 재질이 적용된 전체적인 구조 형상의 두께가 보다 두꺼워진 것으로 검토되었다. Table 5에 아마/에폭시 복합재료를 적용하여 구조 설계된 결과를 명시하였다.

아마/에폭시 자연섬유를 적용한 블레이드 구조의 안전성 평가 및 유리섬유 적용 블레이드와의 구조 거동을 비교하기 위해 구조 해석을 수행하였다. 구조해석 결과 load case 2에서 압축 응력이 23.3MPa, 인장 응력이 41.1MPa로서 충분한 안전율을 확보한 구조로 설계되었음을 확인하였다. 최대 변위는 44.3mm로 검토되었다. Figure 6과 7에 설계 기준이 된 load case 2의 응력 분포 및 변위 해석 결과를 명시하였다. 좌굴 안정성 평가 결과 하중 배수 6.1로서 운용 중 좌굴 안정성을 충분히 확보한 구조임을 확인하였다. 좌굴 해석 결과는 Fig. 8에 명시하였다.

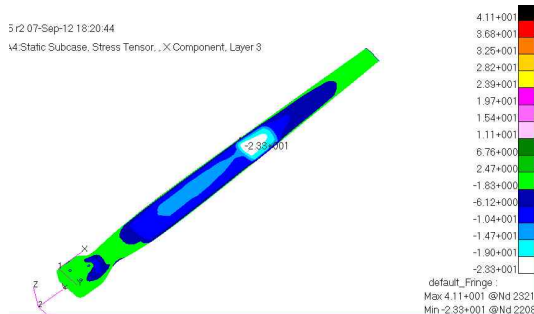


Fig. 6 Stress analysis result of flax/epoxy composite blade at load case 2

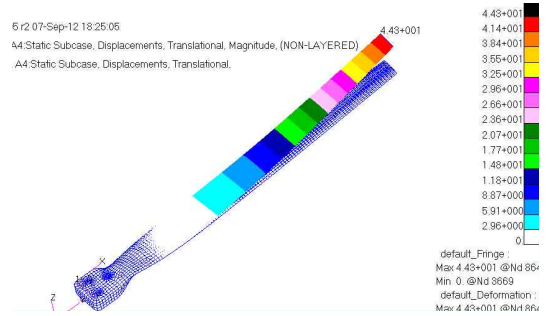


Fig. 7 Deformation of flax/epoxy composite at load case 2

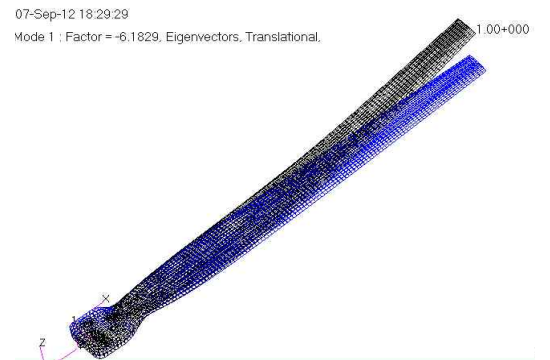


Fig. 8 First buckling mode shape and load factor at load case 2

Table 5 Structural design results (flax/epoxy composite)

Station	Thickness(mm)			
	Upper surface		Lower surface	
1 (Root)	Skin 2.80t	Spar 9.80t	Skin 2.80t	Spar 9.80t
2	Skin 1.40t	Spar 6.30t	Skin 1.40t	Spar 4.20t
3	Skin 1.40t	Spar 4.90t	Skin 1.40t	Spar 2.80t
4	Skin 1.40t	Spar 4.20t	Skin 1.40t	Spar 2.80t
5	Skin 1.40t	Spar 4.20t	Skin 1.40t	Spar 2.80t
6	Skin 1.40t	Spar 3.50t	Skin 1.40t	Spar 2.80t
7	Skin 1.40t	Spar 3.50t	Skin 1.40t	Spar 1.40t
8	Skin 1.40t	Spar 2.80t	Skin 1.40t	Spar 1.40t
9	Skin 1.40t	Spar 2.10t	Skin 1.40t	Spar 1.40t
10 (Tip)	Skin 1.40t	Spar 1.40t	Skin 1.40t	Spar 1.40t

블레이드 각각의 재질 차이에 따른 구조 해석 결과를 비교한 결과 아마/에폭시 재질의 한 층 두께가 유리/에폭시 복합재료보다 두꺼워서 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.

4. 제작 및 시험

블레이드 설계 후 시제품 제작을 수행하고 제작된 시제품의 구조 시험을 통해 강도 및 변위를 검토하여 설계 결과의 타당성을 분석하였다. 시제품 제작은 제작 과정의 열변형 등을 최소화하기 위하여 동일한 재질로 몰드를 제작하였다.

시제품 제작 공법은 수지 주입 방법(RTM)을 적용하기 위하여 블레이드 형상에 따라 블레이드 뿌리 부분과 끝 부분에 장비를 적용하여 수지를 주입하였다. 상면 블레이드와 하면 블레이드를 제작한 후 상하면을 결합하여 최종 블레이드를 제작하였다. Figure 9에 제작 과정을 명시하였다.

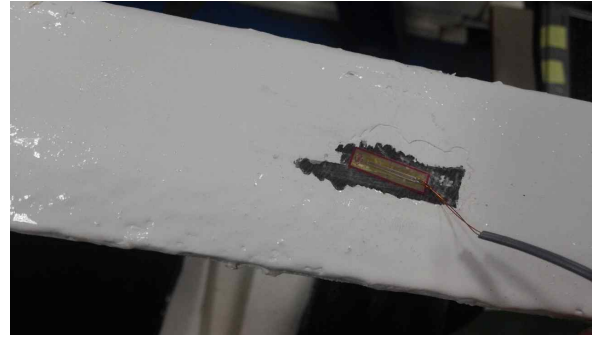


(a) Laminating natural flax fiber



(b) Resin injection process

Fig. 9 Manufacturing process of prototype blade



(a) Strain gage bonded to the blade



(b) Static test of the blade

Fig. 10 Structural test of prototype blade

구조 시험은 블레이드에 스트레인 게이지를 부착하고 해당 영역의 스트레인 시험 결과와 해석 결과를 비교하였으며 전체 블레이드의 굽힘에 의한 변형을 비교 분석하였다. 구조 시험을 통해 획득된 시험 결과 스트레인은 해당 영역에서 $390\mu\text{S}$ 으로 확인되었다. 해석 결과는 $385\mu\text{S}$ 으로 확인되어 이론적 해석 결과와 시험 결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 자연 섬유를 적용하여 복합재 구조의 거동을 분석하기 위해 대상 구조물을 소형 풍력 발전 시스템 블레이드로 선정하여 유리섬유/에폭시 재료와 아마섬유/에폭시 재료 각각을 적용하여 구조 설계를 수행하였다. 구조 설계 결과는 아마섬유 적용 구조가 다소 무거운 것으로 확인되었다. 구조 거동을 분석하기 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램으로 구조 설계 결과의 안전성을 평가하였다. 각각의 재질이 적용

된 블레이드의 구조 해석 결과 응력은 아마섬유 적용 구조가 다소 높게 나왔으나 좌굴에는 더 안정한 것으로 검토되어 자연섬유가 기존의 유리섬유를 대체 가능한 것으로 분석되었다.

887-896, 2012.

후 기

본 연구는 호원대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] H. Park, K. Park, C. Kong, "A study on small horizontal axis wind turbine blade using flax natural fiber composite," *Proc. of Spring Conference of the Society for Aerospace System Engineering*, 2013.
- [2] Hyunbum Park, "Investigation on mechanical peoperties of natural-fiber composite manufacturing using VARTM method," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 59-62, Sep. 2016.
- [3] D. Puglia, A. Iannoni, J. M. Kenny, C. Santulli, F. Sarasini, T. Valente, "Thermal and Mechanical Behaviour of Phormium Tenax Reinforced Polypropylene Composite," *Proc. of European Conference on Composite Materials*, pp. 1-7, 2012.
- [4] K. F. Adekunle, S. W. Cho, C. Patzelt, T. Blomfeldt, M. Skrifvars, "Impact and Flexural Properties of Flax Fabrics and Lyocell Fibre Reinforced Bio-based Thermoset for Automotive and Structural Applications," *Proc. of European Conference on Composite Materials*, pp. 1-6, 2012.
- [5] Libo Yan, Nawawi Chouw and Xiaowen Yuan, "Improving the Mechanical Properties of Natural Fibre Fabric Reinforced Epoxy Composites by Alkali Treatment," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 31, no. 6, pp. 425-437, 2012.
- [6] Libo Yan, "Effect of Alkali Treatment on Vibration Characteristics and Mechanical Properties of Natural Fabric Reinforced Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 31, no. 13, pp.