Technical Paper

Journal of Aerospace System Engineering
Vol.12, No.3, pp.58-63 (2018)

ISSN 1976-6300
EISSN 2508-7150
https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.3.58

수직축 풍력 블레이드의 복합재 적용 설계, 제작 및 시험 평가 연구

박현범[1,†]

[1]호원대학교 국방과학기술학부 항공시스템공학 전공

Study on Design, Manufacturing and Test Evaluation using Composite Materials of Vertical Axis Wind Turbine Blade

Hyunbum Park[1,†]

[1]Dept. of Defense Science & Technology-Aeronautics, Howon University

Abstract

This work dealt with the design and manufacturing of composite blades of a vertical axis wind turbine system. In this work, aerodynamic and structural designs of sandwich composite blades for a vertical axis wind turbine system were performed. First, the aerodynamic and structural design requirements of the composite blades were investigated. After the structural design was complete, a structural analysis of the wind turbine blades was performed using the finite element analysis method. It was performed with the stress and displacement analysis at the applied load condition. A design modification for the structurally weak part was proposed as a result of the structural analysis. Through another structural analysis, it was confirmed that the final designed blade structure is safe.

초 록

본 연구는 수직축 풍력 발전 시스템의 복합재 블레이드에 대한 설계 및 제작 연구이다. 본 연구에서 수직축 풍력 발전용 복합재 블레이드의 공력 및 구조 설계를 수행하였다. 1차적으로 복합재 블레이드의 공력 및 구조 설계 요구 조건이 분석되었다. 구조 설계 이후 유한 요소 해석 기법을 활용하여 풍력 블레이드 구조의 구조 해석이 수행되었다. 적용 하중 조건에서 응력 및 변위 해석이 수행되었다. 단계적 구조 해석을 통해 취약 부위의 개선 설계 방안을 제시하였다. 구조 해석을 통해 최종 설계된 블레이드 구조는 안전한 것으로 확인되었다.

Key Words : Wind Turbine Blade(풍력 발전 블레이드), Aerodynamic Design(공력 설계), Structural Design (구조 설계), Structural Analysis(구조 해석)

1. 서 론

풍차와 같은 풍력 시스템은 적어도 3000년간 사용되어졌다. 대부분 곡식을 가공하거나 수차를 통해 물을 획득할 때 사용되었으며, 바람을 이용하여 항해하는 범선에도 다양하게 적용되었다. 13세기 초반에 수평축 풍차 시스템은 도심을 벗어난 지방에서 많이 사용되었으나, 비교적 저렴한 화석 연료에 의해 전기 발전으로는 사용되지 않았다. 풍차가 전력 생산에 적용되어 풍력 발전 시스템이 등장한 시기는 19세기 후반이다[1].

풍력 발전 시스템은 크게 수평축과 수직축으로 분류된다. 수평축 블레이드의 설계 연구는 국내외에서 다양하게 연구되고 있다. 국외에서는 유럽을 중심으로 많은 연구가 수행되었다. 국내에서는 공창덕 등이 대형급 고효율 풍력 발전 시스템 블레이드의 구조 설계 연구를 수행하였다[2]. 조형순 등은 풍력 블레이드의

Received: Jan. 16, 2018 Revised: Apr. 05, 2018 Accepted: May. 09, 2018
† Corresponding Author
Tel: +82-63-450-7727, E-mail: swordhip@daum.net
ⓒ The Society for Aerospace System Engineering

패브릭 스킨 재료 물성 시험 방법에 대한 고찰 연구를 수행하였다[3]. 안형주 등은 풍력 발전기 블레이드의 패브릭 스킨의 정적 유체-구조 연성 해석에 대한 연구를 수행하였다[4].

수직축 블레이드 연구는 저소음 효과 때문에 최근에 연구가 활성화 되고 있는 추세이다. 국외 연구 동향을 살펴보면, K. Pope 등은 수평축과 수직축 풍력 발전 시스템의 에너지 효율을 비교하였다[5]. R. Merue 등은 Savonius 형태의 수직축 블레이드의 설계 파라미터를 분석하여 수치적 연구를 수행한 바 있다[6]. 선행 연구 분석 결과 수직축 블레이드에 복합재료 적용 설계 연구는 다양하게 수행되고 있지 않은 추세이다.

본 연구에서는 수평축 풍력 발전 시스템 보다 소음이 저감되는 수직축 풍력 발전 시스템 블레이드의 설계 및 해석 연구를 수행하였다. 공력 설계 결과를 분석하여 구조 설계를 수행하였으며, 구조 재료는 유리섬유 복합재료를 채택하였다. 설계 결과는 공력 해석 및 구조 해석을 통해 안전성을 검토하였다.

2. 공력 설계 및 해석

풍력 발전 시스템 블레이드 설계를 위해 시스템 사양 정립이 선행되어야 한다. 본 연구 대상 풍력 발전기는 수직축 풍력 발전 시스템으로 정격 출력이 3kW이며, 정격 풍속은 12m/s이다. 블레이드 단면에 적용된 에어포일은 NACA0018 이다. 세부적인 설계 요구조건은 Table 1에 명시하였다.

공력 설계는 설계 요구 조건으로부터 블레이드의 높이와 반 지름비, 블레이드의 개수, 날개 단면의 익형, 깃 끝 속도비 등의 결정을 수행하는 것이다. 공력 설계가 완료되면 공력 해석 및 공력 시험 등을 통해서 설계 요구 성능 만족 여부를 확인한다. 이를 통해 설계를 개선하거나 설계를 확정한다. Fig. 1에 공력 설계 절차를 명시하였다.

수직축 블레이드의 공력 설계는 단순한 단일 유관이론으로 간편하게 설계가 가능하나 실제 실험 결과와 많은 오차를 갖고 있으므로, 본 연구에서는 이를 개선한 다중 유관이론으로 설계를 수행하였다. 다중 유관이론이란 로터의 회전에 의해 형성되는 회전 체적을 검사체적으로 보고 이를 높이 방향과 원주 방향으로 나누어서 생기는 바람 방향에 평행한 수많은 유관으로 이루어진 것으로 접근하는 것이다.

본 연구에서 블레이드의 원심 하중은 블레이드 최고 회전수 400rpm 영역을 분석 후 산출하여 적용하였으며, 블레이드 익형에 단일 유관 이론과 깃 요소 이론을 적용하여 공력 하중을 산출하였다.

본 연구 대상 풍력 발전기의 정격 출력은 3kW가 목표로서 발전기의 효율과 동력 장치 계통의 기계적 효율 등을 고려하여 공력 설계를 위한 요구 출력은 다소 높게 책정하였다. 단계적 과정을 거쳐 최종 설계된 블레이드의 형상은 Fig. 2에 명시하였다.

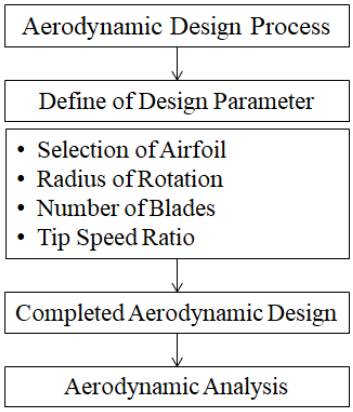

Fig. 1 Aerodynamic design process

Table 1 Design Requirement

Airfoil	NACA0018
Rated Power	3 kW
Height of Rotor	4 m
Diameter of Rotor	3 m
Blade Number	3
Blade Chord	200 mm

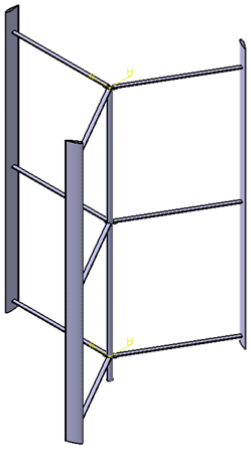

Fig. 2 Configuration of aerodynamic designed blade

3. 구조 설계 및 해석

구조 설계 측면에서 풍력 발전기 블레이드에 작용하는 하중으로는 원심하중, 공력하중, 열하중, 결빙에 의한 하중 등이 있다. 본 연구 대상 블레이드는 유리 섬유 복합재료가 적용될 예정이며, 상온에서 성형될 예정이다. 따라서 성형조건과 운용조건의 온도차에 의해 발생하는 열하중은 무시할 수 있다. 또한 블레이드의 표면적이 크지 않기 때문에 결빙에 의한 하중 증가도 무시할 수 있다. 따라서 구조설계 요구 하중은 공력하중과 회전에 의한 원심 하중이다. Table 3에 구조설계 하중 조건을 제시하였다.

구조 설계 형상은 샌드위치(Sandwich) 복합재 구조를 채택하였다. 구조 설계는 회전 날개의 스킨(skin)은 주로 전단하중을 담당하므로 ±45°로 적층하고, 스파(spar)는 주로 굽힘 하중을 담당하므로 (0/90°)로 적층하였다. 회전 날개 내부는 좌굴 강도를 개선시키고 높은 진동감쇠효과를 갖도록 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam)이 적용되었다. 설계된 구조 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 적용된 재료의 물성치는 Table 2와 같다.

본 연구에서 구조 설계 결과에 대한 구조 안전성 평가를 위해 유한 요소 기법을 활용하여 구조 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석 프로그램은 Nastran이 활용되었다. Fig. 4는 블레이드의 유한 요소 모델링 결과이다. 연결부위 끝단을 고정 경계 조건으로 적용하고 블레이드에 원심 하중과 공력 하중을 적용하였다.

Table 2 Mechanical properties of material

Property	Glass/Epoxy Fabric
E_1 [N/mm^2]	10,500
E_2 [N/mm^2]	10,500
G_{12} [N/mm^2]	1450
ν	0.27
X_t [N/mm^2]	283.9
X_c [N/mm^2]	184.6
Y_t [N/mm^2]	283.9
Y_c [N/mm^2]	184.6

Table 3 Design Requirement

Load Case	Case I	Case II	Case III
Wind Speed	12 m/s	25 m/s	55 m/s
Rotational speed	300 rpm	400 rpm	stop

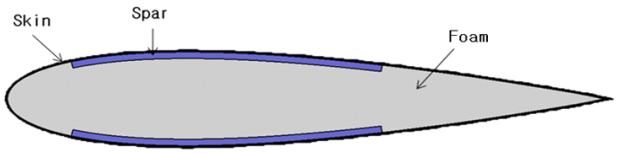

Fig. 3 Structural design configuration

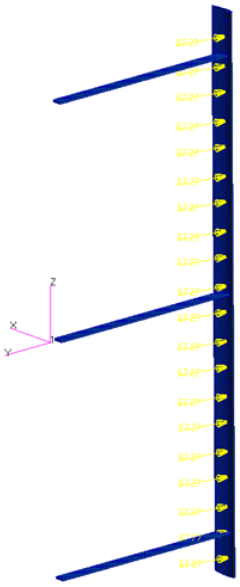

Fig. 4 Finite element modeling result

풍력 발전기 블레이드의 구조 해석에는 일반적으로 강도 해석, 변위 해석이 고려되며, 공진 등의 동적인 문제와 좌굴 등이 검토된다.

1차 구조 해석을 통한 극한 하중 하에서 응력 해석 결과를 검토하였다. 연결 부위 응력은 블레이드 자체는 43.7MPa 이지만, 연결 부위는 671MPa 로서 다소 취약한 것으로 검토되었다. 변위 해석 결과 원심력에 의한 회전 방향으로 최대 변위 222mm로 다소 높은 것으로 확인되었다. 좌굴 해석 결과 0.012로서 연결 부위에서 좌굴 하중에도 취약한 것으로 검토되었다. 좌굴 안정성은 1이상이면 안정한 해석 결과이다. Fig. 5-7에 응력, 변위, 좌굴 해석 결과를 명시하였다.

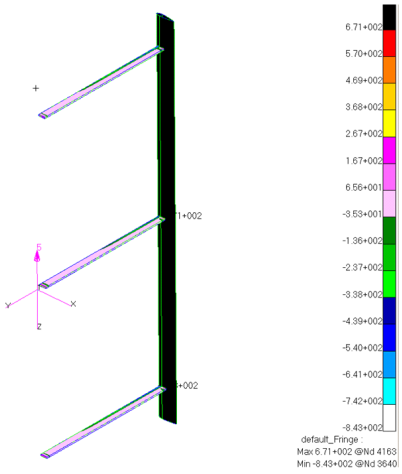

Fig. 5 Stress analysis result [MPa]

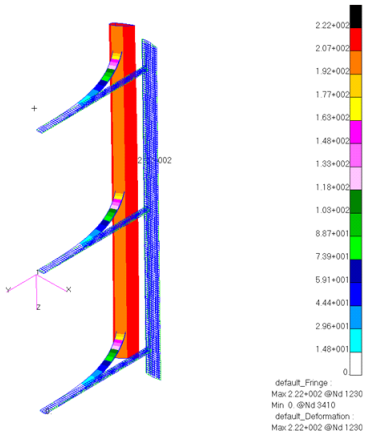

Fig. 6 Displacement analysis result [mm]

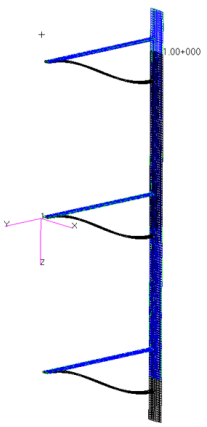

Fig. 7 Buckling analysis result

1차 구조 해석 결과를 분석하여 취약한 연결 부위를 보강하여 구조 설계를 변경하였다. 2차 구조 해석을 통한 극한 하중 하에서 응력 해석 결과를 검토하였다. 구조 해석 결과 블레이드의 응력은 43.8MPa로 확인되었다. 블레이드의 연결 부위 응력은 74.9MPa로 충분히 안전한 것으로 검토되었다. 극한 하중 하에서 최대 변위는 13mm로 타당한 것으로 검토되었다. 좌굴 하중 배수 검토 결과 1.1로서 좌굴에도 안정한 것으로 확인되었다. Fig. 8-10에 응력, 변위, 좌굴 해석 결과를 명시하였다. 고유 진동수 해석은 구조물의 공진 여부를 검토하기 위해 수행되었다. 특히 블레이드는 회전하는 구조이므로 공진 여부 검토가 필요하다. 1차 고유진동수는 3.6Hz, 2차 고유진동수는 8.5Hz, 3차 고유진동수는 11.7Hz로서 운용 회전수에서 공진 문제에 대해 안전한 것으로 분석되었다. Table 4에 설계 변경 전후의 해석 결과를 분석하여 제시하였다.

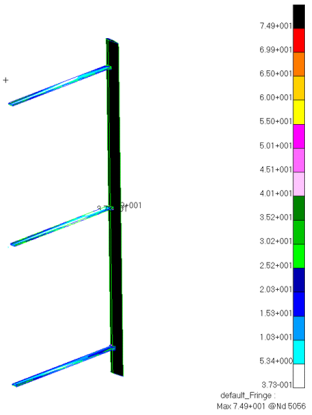

Fig. 8 Stress analysis result of modified structure [MPa]

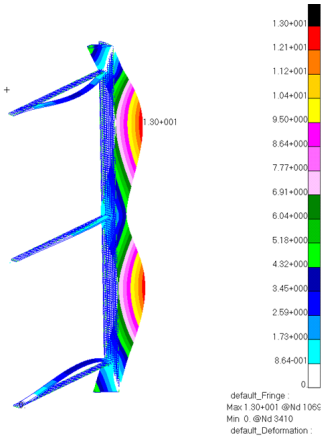

Fig. 9 Displacement analysis result of modified structure [mm]

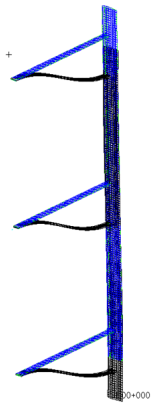

Fig. 10 Buckling analysis result of modified structure

Table 4 Comparison between preliminary design and modified design analysis results

Analysis results	Preliminary design	Modified design
Maximum stress of blade	43.7MPa	43.8MPa
Maximum stress of strut	671MPa	74.9MPa
Maximum displacement	222mm	13mm
Safety factor of buckling	0.012	1.1

4. 시제품 제작 및 시험

시제품 제작을 위해 목업을 제작하고, 상면과 하면으로 분할하여 몰드를 제작하였다. 제작된 몰드의 재질은 블레이드와 동일한 재질인 유리섬유/에폭시 재질로 제작되었다. 제작된 몰드에 이형재를 바르고 그 위에 겔코트를 도포하였다. 최종 유리섬유를 적층한 후 에폭시 수지를 이용하여 성형하였다. 상하면 몰드 내부에 원래 부피의 약 3배정도 팽창하는 폼을 적용하여 샌드위치 구조 형태로 제작하였다. Fig. 11은 블레이드 상하면 몰드를 결합하여 성형중인 블레이드의 형상이며, Fig. 12는 구조 시험 장면이다.

최종 제작된 시제품은 설계하중을 모사하여 구조 시험을 수행하였다. 블레이드에 설계 하중을 작용시켜 구조물의 응력 및 변위를 측정한 후 해석 결과와 비교하였다. 구조 시험 방법은 구조 설계 하중을 3점 집중하중으로 변환시켜 공력에 의한 하중을 세 개의 영역으로 재계산하였다. 이는 구조 시험 장비의 정하중 시험을 위해 용이한 방법을 채택하기 위한 접근 방법이다. 설계 하중은 하중 부가 시험을 위한 하중으로 변환하여 재해석을 수행하였다. 해석 결과 변위는 54mm이며, 시험 결과는 51mm로 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 하중 부가 장치의 각각 사이에 스트레인 게이지를 부착하여 3가지 영역을 비교한 결과 대부분 유사한 결과로 검토 되었으나, 5% 이내의 오차율이 있는 것으로 확인되었다. 이는 복합재료의 특성상 제작 과정에서 수지의 침투 능력이 일부 차이가 있으므로 모든 영역이 균일하게 설계 결과와 일치하지 않아 발생한 것으로 분석되었다.

Fig. 11 Curing of blade

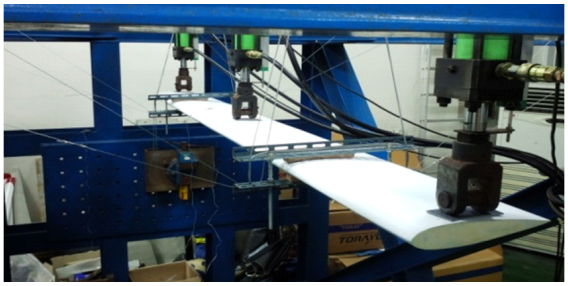

Fig. 12 Structural test of blade

5. 결 론

본 연구에서 수직축 풍력 발전 시스템에 적용된 복합재 블레이드 구조의 공력 및 구조 설계 연구를 수행하였다. 기존의 블레이드는 대부분 수평축 블레이드 개발 연구이나 본 연구에서는 수직축 블레이드에 대한 구조 설계 기법을 제시하였다. 블레이드는 바람의 영

향으로 회전력이 적용되므로 원심 하중을 고려하여 공력 설계를 수행하였다. 공력 설계 결과를 기반으로 안전율을 적용하고 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 구조 해석은 유한 요소 해석 기법을 적용하여 응력, 변위, 좌굴 해석을 수행하였다. 초기 설계 결과의 구조 해석을 통해 취약 부위의 개선 설계 방안을 제시하였다. 최종 구조 해석 결과 전체 하중이 적용하는 경우와 연결 부위에 국부적으로 하중이 집중되는 경우 모두 응력 및 변형 해석 결과 안전한 구조인 것으로 검토되었다. 또한 두께가 얇은 기둥 형태의 블레이드 구조는 좌굴에 취약하므로 좌굴 해석 결과를 면밀히 검토한 결과 좌굴에도 충분히 안정한 구조인 것으로 검토되었다.

후 기

본 연구는 2018 호원대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, “Wind energy handbook,” *WILEY*, pp. 1-2, 2001.

[2] C. Kong, M. Kim, H. Park, “A study on structural design and analysis of large scale and high efficiency blades for wind turbine system,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 7-11, December. 2012.

[3] H. Cho, J. Bae, S. Lee, “Review of test methods for fabric skin properties of fabric-covered wind turbine blade,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 31-38, September. 2015.

[4] H. Ahn, J. Bae, J. Hwang, “Static fluid structure interaction analysis of wind turbine blade skin fabric,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 1-10, December. 2016.

[5] K. Pope, I. Dincer, G. F. Naterer, “Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines,” *Renewable Energy,* vol. 35, pp. 2102-2113, September. 2010.

[6] R. Mereu, D. Federici, G. Ferrari, P. Schito, F. Inzoli, “Parametric numerical study of Savonius wind turbine interaction in a linear array,” *Renewable Energy,* vol. 113, pp. 1320-1332, December. 2017.