

초소형 풍력터빈 복합재 블레이드 구조 설계에 관한 연구

공창덕*, 김주일*

A Study on Structural Design and Test of 500W Class Micro Scale Composite Wind Turbine Blade

C. Kong*, J. Kim*

ABSTRACT

The purpose of the present study is to design a 500W-class micro scale composite wind turbine blade. The blade airfoil of FFA-W3-211 was selected to meet Korean weather condition. The skin-spar-foam sandwich type structure was adopted for improving buckling and vibration damping characteristics. The design loads were determined at wind speed of 25m/s, and the structural analysis was performed to confirm safety and stability from strength, buckling and natural frequency using the finite element code, NISA II [6]. The prototype was manufactured using the hand-lay up method and it was experimentally tested using the sand bag loading method. In order to evaluate the design results, it was compared with experimental results. According to comparison results, the estimated results such as compressible stress, max tip deflection, natural frequency and buckling load factor were well agreed with the experimental results.

Key Words : 풍력터빈(wind turbine), 블레이드(blade), 복합재료(composite material), 폼 샌드위치(foam sandwich)

1. 서 론

본 연구에서는 한국과 같은 지형에 적용이 가능하도록 저 풍속 시동 특성을 가지며 공력성능이 우수한 익형을 가진 500W급 초소형 수평축 풍력터빈을 위한 복합재 블레이드의 공력 및 구조에 관한 설계 및 해석을 수행하고 구조시험을 통해 설계를 수행 하였다.

블레이드의 직경이 과도하게 커지지 않는 범위에서 가능한 낮은 풍속을 정격풍속으로 결정하여 저 풍속인 지역에 유리 하도록 하였고, 레이놀즈수, 최대 양력 계수, 실속 받음각, 최대 양향비, 최대 두께 등의 특성이 비교적 양호한 FAA-W3-211 에어포일을 사용하였으며, 운동량 이론과 깃 요소 이론을 함께 사용하는 스트립(strip)이론에 의하여 기본 형상을 설계하여 익

형의 시위 길이 및 날개의 비틀림 각 분포를 결정하였고, 제작상의 다소 불편함이 있더라도 보다 높은 효율을 얻을 수 있는 최적 받음각으로 설계하는 방법을 채택하였다.[1]

구조 설계에서는 skin-spar-foam의 샌드위치 기본 구조를 기준으로 하였으며 깃 끝부분으로 갈수록 두께가 얇아지도록 하여 경량화에 주력하였다.[2] 사용 재료는 국내 업체에서 제조하여 그 물성이 입증된 glass/epoxy를 사용하였다. 구조 해석은 유한요소법을 이용하여 응력 및 변형량을 해석하였으며, 굽힘 하중에 의한 국부 좌굴 문제를 고려하였다. 또한 고유진동수를 확인함으로써 운용중의 안전성을 고려하였다.

2. 공력 및 구조설계 결과

*조선대학교 항공우주공학과

본 연구에서 국내 기상조건에 적합하도록 공력 설계된 블레이드의 제원은 Table 1과 같고 3차원 형상은 결과는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Aerodynamic design results of 500W class wind turbine blade

Rated power	500W
Cut-in wind speed	3.0 m/s
Rated wind speed	10.0 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Design tip speed ratio	6.6
Rated rotational speed	400 rpm
Number of blade	3
Rotor diameter	2.52 m
Aerodynamic profile	FFA-W3-211
Blade root chord	158 mm
Blade tip chord	44mm
Blade total twist angle	7.2°

구조 설계의 관점에서 주로 고려되는 하중은 공력 하중이며, Table 2와 같은 하중조건을 고려하였다.

Table 2 Load case for structural design

Load Case	Case I	Case II	Case III
Reference wind speed	10.0 m/s	25.0 m/s	55.0 m/s
Gust condition (±20 m/s, ±40°)	Without gust	With gust	Storm condition
Rotational speed	400 rpm	450 rpm	Stop

하중해석결과 load case II의 경우가 블레이드에 가장 큰 하중을 유발시킴을 확인하여 이 하중을 기준으로 구조설계를 수행하였다.

3. 기본구조단면 형상설계

복합재 블레이드의 구조설계를 위한 기본 구조는 선행 연구 결과 및 문헌을 참고하여 Fig. 1과 같은 샌드위치 구조를 채택하였다.[3] 이 구조는 ±45° 방향으로 적층되어 주로 전단하중을 담당하는 표피와 블레이드 길이방향으로 적층되어 주로 굽힘 하중을 담당하는 스파, 플렌지 구조로 구성되었으며, 내부에는 좌굴 강도를 현저하게 개선시킴은 물론 높은 진동감쇠효과가 우수한 폴리우레탄 폼을 발포시킨 샌드위치구조 형상으로 설계하였다.

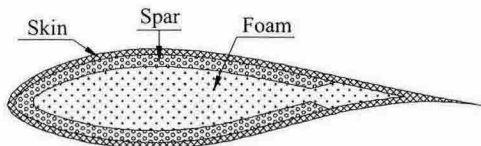


Fig. 1 Skin-spar-foam sandwich type structure blade

Table 3은 블레이드의 구조설계 결과를 나타낸다.

Table 3 Structural design results of blade

Station (r/R)	Thickness (mm)	
	Upper surface	Lower surface
R ~ 0.1	10t / Skin 1.25t / Spar 7.00t	
0.1 ~ 0.2	Skin 1.5t/Spar 6.25t	Skin 1.5t/Spar 6.25t
0.2 ~ 0.3	Skin 1.5t/Spar 6.25t	Skin 1.5t/Spar 6.25t
0.3 ~ 0.4	Skin 1.5t/Spar 6.25t	Skin 1.5t/Spar 6.25t
0.4 ~ 0.5	Skin 1.5t/Spar 5.00t	Skin 1.5t/Spar 5.00t
0.5 ~ 0.6	Skin 1.5t/Spar 5.00t	Skin 1.5t/Spar 5.00t
0.6 ~ 0.7	Skin 1.5t/Spar 5.00t	Skin 1.5t/Spar 5.00t
0.7 ~ 0.8	Skin 1.5t/Spar 2.75t	Skin 1.5t/Spar 2.75t
0.8 ~ 0.9	Skin 1.5t/Spar 2.75t	Skin 1.5t/Spar 2.75t
0.9 ~ Tip	Skin 1.5t/Spar 2.75t	Skin 1.5t/Spar 2.75t

4. 구조 해석

본 연구에서는 유한요소해석을 위해 상용유한요소 프로그램인 NISA II를 사용하였다.[4] 유한요소 해석을 위한 격자(mesh) 생성 결과 총 2860개의 요소와 3460개의 절점으로 구성되었다. Table 4는 하중 조건 II에 따른 유한 요소 선형 정적 해석의 결과 및 이에 대한 구조 안전성을 확인한 것으로 구조적으로 충분히 안전함이 확인되었다. Fig. 2는 최대 하중인 설계하중(load case II)에 대한 응력분포이다.

Table 4 Structural analysis results

Case of analysis		Case II
Analysis result	Max. stress	10.07
	Ten.	
[Mpa]	Com.	10.06
	Max. disp. [mm]	88.82
Max. stress failure criterion	Sxx/allow	0.054
	Syy/allow	0.013
Sxy/allow	Sxy/allow	0.047



Fig. 2 Stress analysis result of load case II

고유 진동수 해석은 3개의 회전날개를 가진 경우 1, 3, 6 P.R.O 공진가능성 때문에 중요하다.[5] Fig. 3의 Campbell 선도를 검토해보면 첫 번째 플랩모드 고유진동수가 운용회전수인 400rpm에서 공진을 일으키지 않음을 확인 할 수 있다. Fig. 4는 Flap 모드와 형상을 도시화 한 것이다.

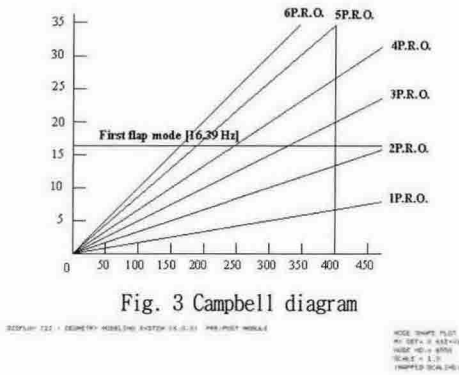
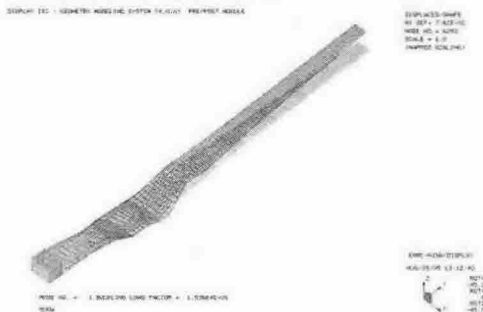


Fig. 5는 하중조건 II에 대한 좌굴해석의 결과를 나타낸 것으로 최소 하중 계수(load factor)는 15.36로서 일어나지 않음이 확인되었다.



5. 시제품 제작 및 시험

5.1 시제품 제작

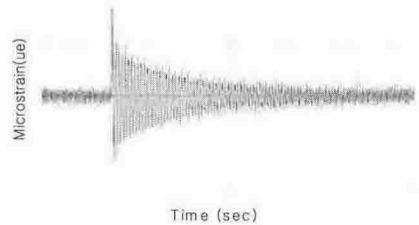
시제품 제작을 위해 외부 형상에 대한 Template를 제작하였으며, 이를 이용 상면과 하면으로 분할하여 몰드를 유리섬유를 이용하여 제작하였다. 이렇게 제작된 몰드에 이형재를 바르고 겔코트를 도포한 후 hand lay-up 방법으로 유리섬유 에폭시를 적층하였다. 이때 적층된 섬유를 몰드에 밀착하도록 하기위하여 우레탄 폼을 미리 발포하여 열선으로 자른 후 삽입하였다. Fig. 6은 제작된 블레이드 시제품이다.



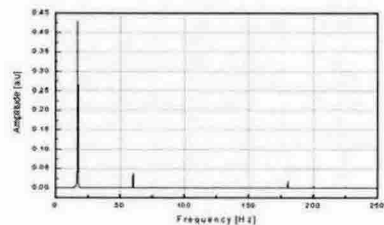
Fig. 6 First blade prototype

5.2 구조 시험

설계결과를 평가하기위해 구조시험을 하였다. 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. Fig. 7은 수집된 자료와 이를 FFT 분석한 결과이며 해석결과 16.39Hz, 실험결과 17.21Hz로 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) measured strain by impact hammer and strain gage



(b) FFT analysis results
 Fig. 7 Eigenvalue test result

정적구조 시험을 위해 설계하중은 Fig. 8과 같이 4점 집중하중으로 모사 되었으며, 각각의 샌드백 무게와 하중위치는 0.2, 0.5, 0.7, 0.9m에 각각 5, 11.5, 14, 16kg을 사용하였다. Fig. 9는 구조시험 중인 블레이드를 나타내며 Table 5는 이를 구조시험 결과와 유한요소 해석 결과를 비교한 것으로서 서로 잘 일치함을 확인하였다.

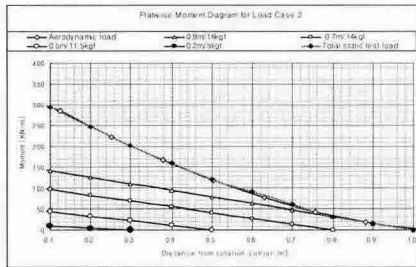


Fig. 8 Simulated bending moment



Fig. 9 Static test of the prototype blade

Table 5 Comparison between the static analysis results and the test results

Item	Analysis results	Test results
Tip deflection	89 mm	98 mm
Upper and lower surface stresses at 0.2 r/R station	+10.07 Mpa -10.06 Mpa	+10.0 Mpa -10.4 Mpa

6. 결 론

본 연구를 통해 한국과 같은 저 풍속 지형에 적용 가능한 500W급 초소형 풍력발전 시스템용 복합재 블레이드의 구조 설계 및 해석이 수행되었고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 선형정적해석결과 최종 구조설계 확정된 블레이드는 최대하중 조건에서도 안전계수 21.2가 확보되는 안전한 구조이며, 이때의 블레이드 최대 변위는 약 88.2 mm 정도임을 확인하였다.
- 2) 고유진동수 해석결과로부터 Campbell 선도를 작성하여 공진 가능성을 검토한 결과 운용 중 공진 발생의 가능성은 거의 없음을 확인하였다.
- 3) 좌굴 해석결과 1차 좌굴모드에 대한 하중계수가 15.36으로서 좌굴 발생의 가능성이 거의 없음을 확인하였다.
- 4) 블레이드구조는 경량화와 좌굴 및 진동감쇄특성이 우수한 스킨-스파 폼 샌드위치 구조 형식을 채택하고 각각의 재질은 스킨-스파는, Glass/Epoxy, 폼은 Urethane Foam을 선정하였다.
- 5) 구조제작은 제작의 용이성을 고려 폼을 별도로 제작하여 접착하는 방법도 채택 하였다.

참고문헌

- [1] Kong, C. D., "Structural Design of Medium Scale Composite Wind Turbine Blade", ICCM-13 Conference, pp.561-576, 2001.
- [2] 공장덕 외, "IEC1400-1설계표준을 고려한 중형 수평축 풍력발전용 복합재 회전날개의 설계개선 연구", 항공우주학회 춘계 학술대회 논문집, pp.410-414, 2000.
- [3] Kong, C. D., "A Study on Small Scale Wind Turbine Blade with Glass/Epoxy and Urethane Foam Sandwich Composite Structure", DFC-8 & ETDCM-7, vol.8 no.8, 2005.
- [4] 공장덕 외, "중형 수평축 풍력발전용 복합재 회전날개의 설계 방법 개선 연구", 한국 추진공학회 추계학술 강연회 초록집, pp.26-26, 2000
- [5] 공장덕 외, "750kW급 수평축 풍력발전용 복합재 회전날개의 구조시험을 통한 설계개선에 관한 연구", 한국추진공학회지, vol.4 no.4, pp.22-29, 2000
- [6] EMRC, NISA-users Manual. Version 5.2, 1922