

# 소형 풍력발전 시스템용 복합재 블레이드의 설계 및 시험에 관한 연구

공창덕\*·방조혁\*·박종하\*\*·오경원\*\*\*

## A Study on Design and Test for Composite Blade of Small Scale Wind Turbine System

Changduk Kong, Johyug Bang, Jongha Park and Kyungwon Oh

### Abstract

This study proposes a development for the 1-kW class small wind turbine system, which is applicable to relatively low wind speed region like Korea and has the variable pitch control mechanism. In the aerodynamic design of the wind turbine blade, parametric studies were carried out to determine an optimum aerodynamic configuration which is not only more efficient at low wind speed but whose diameter is not much larger than similar class other blades. A light composite structure, which can endure effectively various loads, was newly designed. In order to evaluate the structural design of the composite blade, the structural analysis was performed by the finite element method. Moreover both structural safety and aerodynamic performance were verified through the prototype test.

**Key Words:** Small Wind Turbine System, Aerodynamic Design, Structural Design

### 1. 서론

수 kW급 이하의 소형 풍력 발전기들은 저 비용으로 개인이 직접 설치하여 에너지 절약 효과를 느낄 수 있는 장점이 있기 때문에 대형 시스템과는 별도의 시장을 확보하고 있으며, 지속적으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 그러나 선진국에서 개발 판매되고 있는 소형 풍력발전기들의 정격 풍속은 대부분이 12m/s 이상이므로 년 평균 풍속이 4m/s 내외인 국내에서는 설계 출력을 생산할 수 있는 날이 많지 않고, 설계 풍속보다 저 풍속에서 운용되기 때문에 효율 또한 좋지 않다. 이는, 지속적인 전력 공급이라는 소형 풍력 발전기의 장점에 상반되는 것이다. 즉, 국내의 저 풍속 기상 조건에 맞는 풍력발전 시스템의 개발은

필수적으로 요구된다.

본 연구의 선행연구에서는 국내와 같이 저 풍속인 지역에 소형 풍력발전 시스템 개발의 일환으로 회전날개의 직경을 무리하게 키우지 않으면서도, 저 풍속에서 효율적인 블레이드의 설계를 위해 여러 가지 설계 변수들을 분석하여 적절한 설계 모델을 제시하였다.[1]

본 연구에서는 공력설계된 블레이드에 대한 구조설계를 수행하였으며 선형정적해석, 고유진동수 해석, 좌굴해석 등의 유한요소구조해석을 수행하여 구조적인 안전성을 검토하였고, 시제품을 제작하여 각종 시험을 수행한 결과 시험 결과는 해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

### 2. 공력설계 결과 요약

본 연구의 선행연구에서 국내기상조건에 적합하도록 여러 가지 설계변수 분석을 통해 공력설계된 블레이드의 제원은 Table 1과 같고, FFA-

\* 조선대학교 공과대학 항공조선공학부

\*\* 조선대학교 대학원 항공우주공학과

\*\*\* (주)한국화이바

W3-211 에어포일이 적용된 블레이드 형상은 Fig. 1과 같다.[1]

Table 1 Aerodynamic design result of 1kW class wind turbine blade

Rated power	1 kW
Cut in wind speed	3.0 m/s
Rated wind speed	8.0 m/s
Cut out wind speed	25 m/s
Design tip speed ratio	6.0
Rated RPM	268 rpm
Blade number	3
Rotor diameter	3.42 m
Aerodynamic profile	FFA-W3-211
Blade root chord	253mm
Blade tip chord	73mm
Blade total twist	20.23 deg.

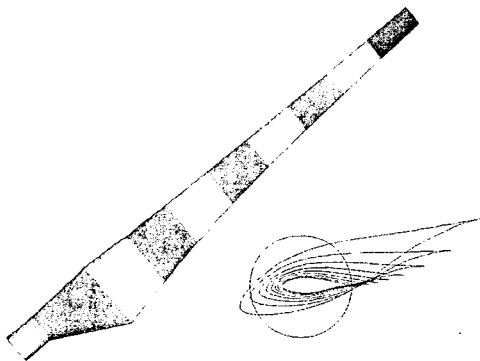


Fig. 1 Designed aerodynamic shape of 1kW class wind turbine blade

### 3. 설계하중 및 구조설계

풍력발전용 블레이드에 작용하는 하중으로는 공력하중, 원심하중, 열적하중, 결빙에 의한 하중 등이 있으나, 본 연구의 블레이드는 상온에서 성형될 예정이므로 성형조건과 운용조건에 의한 온도차에 의해 발생하는 열적하중은 무시할 수 있으며, 그 표면적이 크지 않으므로 결빙에 의한 무게중가 또한 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서 고려한 구조설계 하중요인은 공력하중과 회전에 의한 원심하중이다. 여기서, 원심하중은 유한요소 구조해석 모델에 허용 최고 회전수인 300rpm을

고려하였다. 따라서 계산되어야 할 하중은 공력하중이며, 이를 위해 Table 2와 같은 하중조건을 고려하였다. Fig. 2는 하중조건 II에 대한 하중해석 결과이며 이 경우의 하중이 블레이드에 가장 큰 모멘트를 유발하므로 모든 구조설계는 이 하중을 기준으로 수행되었다.

구조설계를 위한 기본 구조는 Fig. 3과 같은 샌드위치 구조로서 45° 방향으로 적층하여 주로 전단하중을 담당하는 표피와 블레이드의 길이방향으로 적층되어 주로 굽힘 하중을 담당하는 스파로 구성되었으며, 내부에는 좌굴 강도를 현저하게 개선시키고 높은 진동감쇠효과를 갖도록 폴리우레탄 폼이 적층된다. Table 3은 반복설계를 통해 최종으로 결정된 구조설계 결과이다.

Table 2 Load case for structural design

Load Case	Case I	Case II	Case III
Reference wind speed	8.0 m/s	25.0 m/s	55.0 m/s
Gust condition ( $\pm 20$ m/s, $\pm 40$ deg.)	Without gust	With gust	Storm condition
Rotational speed	268 rpm	300 rpm	Stop

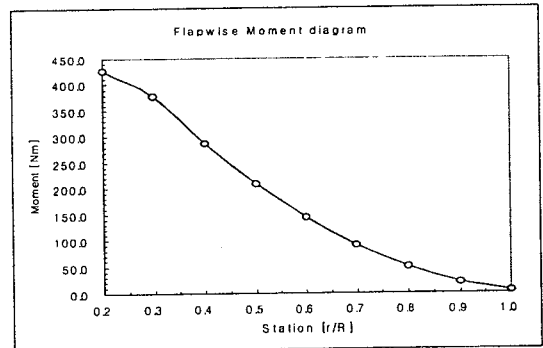


Fig. 2 Flapwise moment diagram for load case II

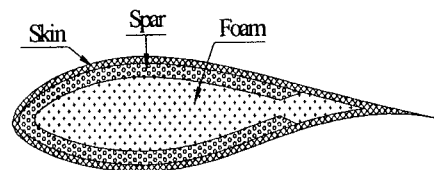


Fig. 3 Section view of the blade structure

Table 3 Structural design results

Station (r/R)	Thickness(mm)	
	Upper surface	Lower surface
Root~0.1	10t/Skin 1.25t /Spar 7.00t( AL2024)	
0.1~0.2	Skin 1.25t/Spar 4.75t	Skin 1.25t/Spar 3.00t
0.2~0.3	Skin 1.25t/Spar 3.75t	Skin 1.25t/Spar 2.25t
0.3~0.4	Skin 1.25t/Spar 3.50t	Skin 1.25t/Spar 2.00t
0.4~0.5	Skin 1.25t/Spar 3.25t	Skin 1.25t/Spar 1.75t
0.5~0.6	Skin 1.25t/Spar 3.00t	Skin 1.25t/Spar 1.50t
0.6~0.7	Skin 1.25t/Spar 2.50t	Skin 1.25t/Spar 1.25t
0.7~0.8	Skin 1.25t/Spar 2.00t	Skin 1.25t/Spar 1.00t
0.8~0.9	Skin 1.25t/Spar 1.50t	Skin 1.25t/Spar 0.75t
0.9~Tip	Skin 1.25t/Spar 0.75t	Skin 1.25t/Spar 0.50t

#### 4. 시편시험 및 구조해석

##### 4.1 시편 시험

일반적으로 Open Mold에서 성형된 복합재료의 강도는 오토클레이브 내에서 성형된 복합재료의 강도보다 저하된다. 한편, 대부분의 복합재료 강도에 관한 문헌자료는 오토클레이브에서 성형된 시편시험을 기준으로 한 결과들이기 때문에 본 연구와 같이 오토클레이브에서 성형하지 않을 경우 이러한 강도를 직접 적용하는 것은 타당하지 못하다. 따라서 선택된 재질(glass/epoxy)에 대한 시편 시험이 필요하게 되어 이를 수행하였다. Fig. 4는 압축 및 인장 시험된 시편의 사진이며, Table 4는 시편시험 결과이다.

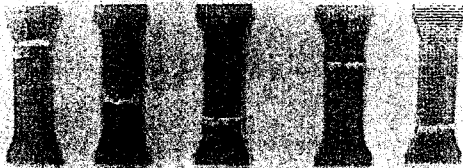


Fig. 4(a) Compression test specimen [ASTM D695]

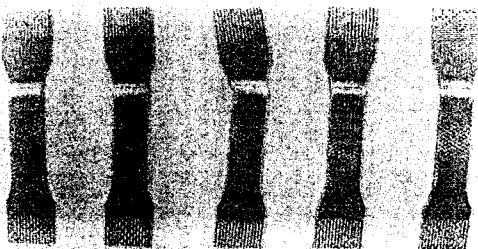


Fig. 4(b) Tensile test specimen [ASTM D638]

Table 4 Mechanical properties of materials used in the present blades design

Material	Glass/Epoxy	Polyurethane
	Fabric	Foam
E1 (N/mm <sup>2</sup> )	10500	60.86
E2 (N/mm <sup>2</sup> )	10500	59.86
G12 (N/mm <sup>2</sup> )	1450	19.18
$\nu$	0.27	0.2
Xt (N/mm <sup>2</sup> )	283.9	2.63
Xc (N/mm <sup>2</sup> )	184.6	1.41
Yt (N/mm <sup>2</sup> )	283.9	2.49
Yc (N/mm <sup>2</sup> )	184.6	1.41
S (N/mm <sup>2</sup> )	15.0	0.71
S (N/mm <sup>2</sup> )	1.705	0.1197
Ply thickness (mm)	0.25	12.5

##### 4.2 구조해석 개요

구조해석에는 일반적으로 강도해석이 고려되며, 공진 등의 동적인 문제와 좌굴 등이 검토된다. 특히, 복합재료는 일반적으로 압축하중에 약하기 때문에 압축응력이 작용하는 부위의 안전성을 면밀히 검토하여야 한다. 본 연구에서는 정적강도 해석과 고유진동수 해석 및 좌굴해석을 위해 유한요소 상용코드인 NISA II[2]를 사용하였으며, 안전성 검토를 위한 파괴기준으로는 최대응력과 파괴론[3]과 Tasi-Wu 파괴론[4]이 적용되었다.

##### 4.3 선형 정적 해석결과

Table 5는 각 Load case별 구조해석 결과를 비교한 것으로서, 설계된 블레이드는 최대 하중상태인 Load case II에서 최소 안전계수 2.6이 확보되는 안전한 구조임을 확인하였으며, 최대 Tip 변위가 151mm 이므로 타워와의 충돌을 방지하려면 최소한 225mm(안전계수 1.5적용) 이상의 간격을 갖도록 나셀이 설계되어야 함을 확인하였다.

Table 5 Structural analysis result

Case of Analysis		Case I	Case II	Case III
Analysis Result	Ten.	13.9	38.5	33.3
	Com.	10.8	31.1	29.4
Max. Disp. [mm]		52.84	151.0	123.2
Max. stress failure criterion	$S_{xx}/allow$	0.053	0.165	0.162
	$S_{yy}/allow$	0.027	0.089	0.095
	$S_{xy}/allow$	0.125	0.384	0.364
Tsai-Wu failure criterion		0.035	0.217	0.205

#### 4.4 고유진동수 해석결과

고유진동수 해석은 회전날개의 운용중 공진 여부를 검토하기 위해 수행되었으며, 3개의 회전날개를 가진 경우 1, 3, 6 E.O.가 중요하다. Fig. 5는 설계된 블레이드의 운용중 공진가능성을 검토하기 위해 고유진동수 해석 결과를 이용하여 Campbell 선도 작성한 것으로서 운용회전수에서의 공진이 발생하지 않음을 확인하였다.

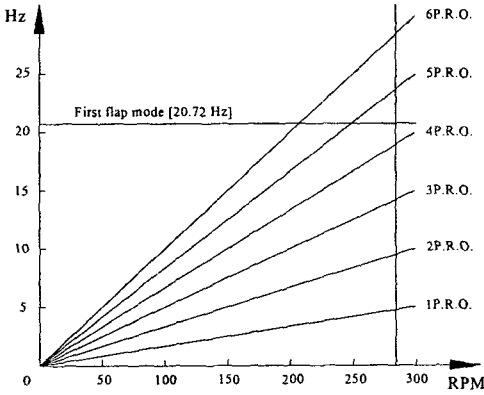


Fig. 5 Campbell diagram

#### 4.5 좌굴 해석결과

Fig. 6은 하중조건 II에 대한 1차 모드의 좌굴해석 결과를 도시한 것으로 이때의 하중 배수는 2.18로서 운용중 좌굴 발생의 가능성은 희박함을 확인하였다. 여기서, 하중배수란 적용된 하중이 이 값을 곱하면 해당 모드의 좌굴이 발생함을 의미하는 일종의 안전계수이며, 일반적으로 좌굴 모드의 차수가 증가함에 따라 좌굴하중배수도 증가한다.

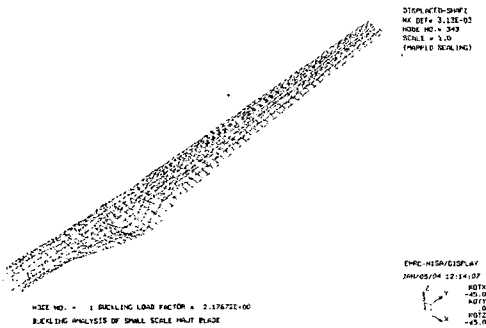


Fig. 6 First buckling mode shape and load factor

### 5. 시제품 제작 및 시험

#### 5.1 시제품 제작

시제품 제작을 위해 공력설계 결과를 이용하여 Muck-up을 제작하였으며, 이를 상면과 하면으로 분할하여 몰드를 제작하였다. 제작된 몰드의 재질은 glass/epoxy이며, 경화중에 압력을 받더라도 변형되지 않도록 충분한 강도를 갖도록 하였다. 또한, 상면 몰드와 하면 몰드를 닫은 후 볼트로 조이게 되는데 이때에 몰드의 손상을 방지하기 위해 두 몰드의 바깥쪽에는 철판을 접착하였다. 한편, 철판은 평면인데 반해 복합재 몰드는 곡면을 이루고 있기 때문에 이들을 접착하기 위해 사이에 우레탄 폼을 적층하였다.

이렇게 제작된 몰드에 이형재를 바르고 겔코트를 도포한 후 Hand lay-up 방법으로 유리섬유 및 에폭시를 적층하였다. 상하면 몰드의 적층이 끝나게 되면 이들을 서로 결합한 후 내부에 우레탄 폼을 발포하는데, 이때 원래 부피의 약 3배 정도로 팽창하는 폼의 발포압력을 이용하여 적층된 섬유를 몰드에 밀착하도록 하였고, 에폭시가 몰드의 접착면을 따라 흘러나오도록 유도하여 섬유 채적비가 향상되도록 하였다. Fig. 7은 적층 완료된 몰드의 사진이다.

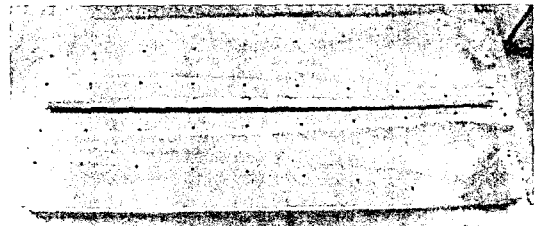


Fig. 7 Lay-up result of the mold

#### 5.2 구조 시험

구조시험은 고유진동수 측정과 정 하중 시험을 수행하였다. 고유진동수 측정을 위해 뿌리 부분이 고정된 블레이드에 스트레인 게이지를 부착한 후 충격망치를 이용하여 충격을 주었다. 그리고 이때에 변화되는 스트레인 값을 데이터 획득장치(AI 1600, SASCO)를 통해 수집하였다. 이때의 샘플링 속도는 500Hz 이었으며, 수집된 데이터는 MATLAB 프로그램을 이용하여 FFT 분석되었다.

Fig. 8은 수집된 자료와 이를 FFT 분석한 결과이며, Table 6은 유한요소 해석한 결과와 시험결과를 비교한 것으로 잘 일치함을 확인하였다.

정 하중 시험을 위해 설계하중은 Fig. 9와 같이 3점 집중하중으로 모사 되었으며, 각각의 샌드백 무게와 하중위치는 Table 7과 같다. Table 8은 구조시험과 같은 조건으로 해석된 유한요소 구조 해석결과를 비교한 것으로서 서로 잘 일치함을 확인하였다.

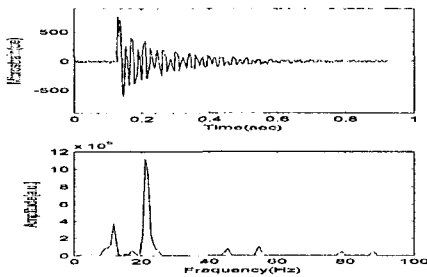


Fig. 8 Eigenvalue test result

Table 6 Comparison between measured and predicted natural frequency

Mode shape	Analysis results	Test results
First Flap Mode	12.81Hz	11.72Hz
First Leadlag Mode	23.25Hz	21.09Hz
Second Flap Mode	42.77Hz	41.31Hz

Table 7 Simulated design load for static test

Distance from R.C.	Weight of the sand bag
0.9m	12kg <sub>r</sub>
1.2m	12kg <sub>r</sub>
1.6m	22kg <sub>r</sub>

Table 8 Comparison between the linear static analysis results and the static test results

Item	Analysis results	Test results
Tip displacement	131 mm	150 mm
Upper and lower surface stresses at 0.2 r/R station	+29.7 Mpa -21.8 Mpa	+27.0 Mpa -16.9 Mpa

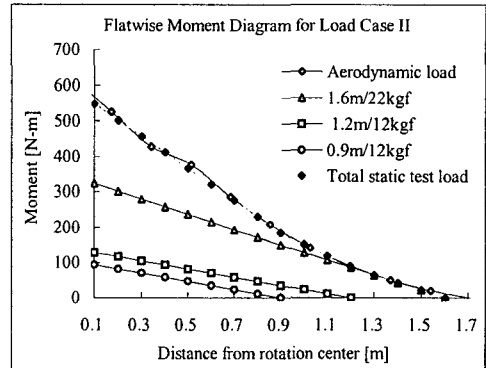


Fig. 9 Static strength test loads simulated by three-point loading method

### 5.3 공력 시험

공력시험은 설계된 블레이드의 공력성능을 입증하기 위해 수행되었다. 공력시험을 위해 특별한 시험장치 및 타워가 제작되었으며, 지면의 영향을 거의 받지 않고 비교적 일정한 바람을 지속적으로 받을 수 있는 17층 건물의 옥상(약 40m)에 설치되었다. 또한, 제작된 공력시험 장치는 Fig. 10과 같이 블레이드 피치각을 바꿔가며 실험할 수 있도록 설계되었는데 이는 헬리콥터의 콜렉티브 피치제어 시스템을 응용한 것이다. Fig. 11은 시험중인 블레이드의 사진이며, Fig. 12는 피치각 0° 일때의 해석 결과와 실험결과를 비교한 것으로서 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 여기서, 정확한 출력비교를 위해 해석 결과는 공기역학적인 출력을 사용하였다.

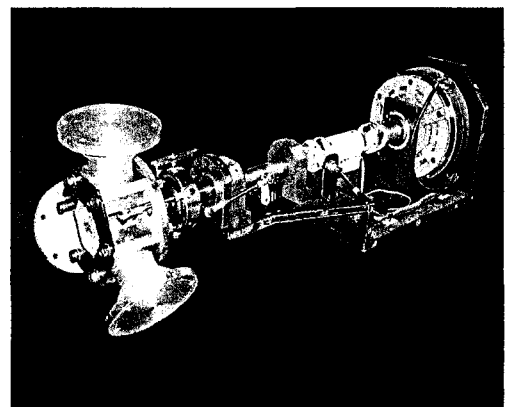


Fig. 10 Nacelle part of the test equipment

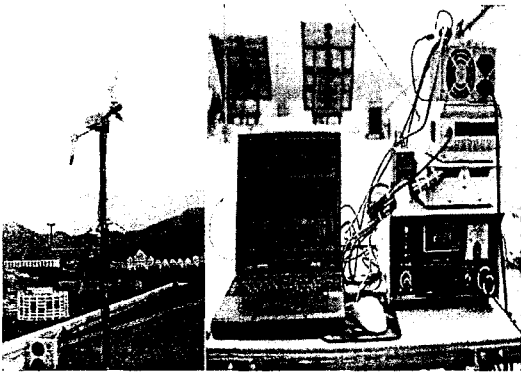


Fig. 11 Aerodynamic test equipment

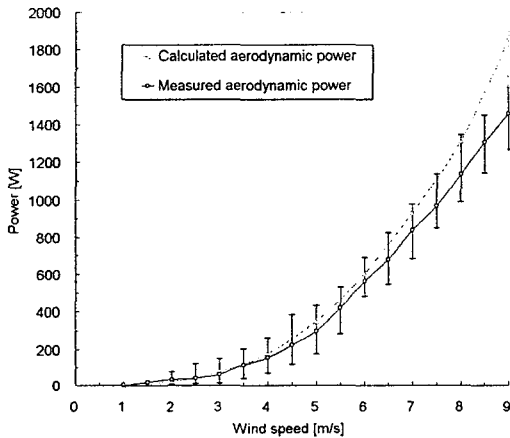


Fig. 12 Comparison between aerodynamic analysis result and test result

## 6. 결 론

본 연구를 통해 한국과 같은 저 풍속 지형에 적용 가능한 1kW급 소형 풍력발전 시스템이 설계 및 해석 되었고, 시제품을 이용한 공력 및 구조시험을 통해 그 성능이 입증되었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정확한 구조설계를 위해 시편시험이 수행되었으며, 선형정적해석결과 최종 구조설계 확정된 블레이드는 최대하중 조건에서도 안전계수 2.6이 확보되는 안전한 구조이며, 이때의 블레이드 최대 변위는 약 151mm 정도임을 확인하였다.
- 2) 고유진동수 해석결과로부터 Campbell 선도를 작성하여 공진 가능성을 검토한 결과 운용중 공진 발생의 가능성은 거의 없음을 확인하였다.
- 3) 좌굴 해석결과 1차 좌굴모드에 대한 하중계수가 2.18로서 좌굴 발생의 가능성이 거의 없음을 확인하였다.
- 4) 시제품 제작을 통해 공력 및 구조시험이 수행되었으며 시험결과는 해석 결과와 잘 일치하였다.

## 후 기

본 논문은 2004년 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) 공창덕, 방조혁, '1kW급 소형 풍력발전용 블레이드의 공력설계 변수에 관한 연구', 한국항공우주학회 2003년 춘계 학술대회, 2003.
- (2) EMRC, NISAIL-Users Manual, version5.2, 1992.
- (3) Gibson, R. F., 'Principles of Composite Material Mechanics', McGraw-Hill, Inc., PP. 103-106, 1994.
- (4) Feng, W. 'A failure criterion for composite materials', Journal of composite materials, vol. 25, No. 1, pp. 88-100, 1991.