

복합재가 적용된 고효율 소형 수직축 풍력터빈 블레이드의 공력 설계 및 구조 설계에 관한 연구

공창덕*, 이하승*, 김인권**

Aerodynamic and Structural Design of A High Efficiency Small Scale Composite Vertical Axis Wind Turbine Blade

Chang-duk Gong*, Ha-Seung Lee* and In-Kweon Kim**

ABSTRACT

Recently, the wind energy has been widely used as a renewable energy resource due to lack and environmental issues of the mostly used fossil fuel. This work is to develop a 500W class blade design of vertical axis wind turbine system which will be applicable to relatively low speed region like Korea and for the domestic use. For this wind turbine a high efficiency and low noise turbine blade was designed with the proposing aerodynamic design procedure, and a light composite structure blade. Structural analyses were performed using the Finite Element Method and fatigue life of the designed blade is estimated. Finally, in order to check its performance, the manufactured blade was tested by using truck and the results of test was good with respect to its analysis result.

초 록

최근 화석 에너지의 고갈로 신재생 에너지 중에서 풍력 에너지가 각광받고 있다. 본 연구는 국내 기상과 같이 저 풍속 지역에 적합한 500W급 수직축 풍력 터빈에 관한 연구로서 공력 설계를 통해 저풍속에서도 고효율과 저소음을 가진 형상을 제시하였으며, 복합재료를 적용하여 블레이드의 구조 설계를 수행하였다. 구조 설계 후 유한 요소 모델링을 통하여 응력, 변형, 좌굴, 공진가능성에 관한 해석을 수행 하였다. 또한 피로 수명을 예측 하였으며, 최종 제작된 풍력 터빈은 구조 실험과 성능 시험을 통하여 구조 해석 결과 및 공력 해석 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

Key Words : Wind turbine blade(풍력 터빈 블레이드), Composite materials(복합재료), Fatigue life(피로 수명)

1. 서 론

최근 국내외에서 대체 에너지 효과에 대한 연구가 다양하게 수행 되고 있다. 특히 풍력 발전

기는 바람의 에너지를 유용하게 사용할 수 있도록 전기적 에너지로 바꾸어 주는 시스템으로 매우 친환경적이기 때문에 다양하게 연구되고 있다. 현재 세계의 풍력 발전 시스템은 출력 대형화 추세이나 대형 풍력 발전 시스템은 대규모 단지 조성 등 국가적 차원의 지원이 이루어져야 하는 단점을 가지고 있다. 반면 소형 풍력 발전 시스템은 소규모로 독립적 운용이 가능하므로 최근 관심 있게 연구되어 가고 있다. 또한 복합재료를

† 2011년 6월 13일 접수 ~ 2011년 8월 1일 심사완료
 * 정희원, 조선대학교 항공우주공학과
 교신저자, E-mail : imorger@nate.com
 광주광역시 서석동 조선대학교
 ** 정희원, 럭키금속(주)

사용하게 되면서 구조적 강도 및 피로 수명이 크게 향상 되었다. 그런데 기존의 풍력 발전기들이 대부분 선진국에서 개발되어온 형태로서 소형 풍력 발전기들의 정격 풍속은 대부분 국내의 기상 에 적합하지 않아 국내 기상 에 알맞은 풍력 발전 기 개발이 요구된다[1][2][3][4].

풍력터빈은 가장 많이 보급된 수평축 방식과 소형 중심의 수직축 방식으로 구분된다. 수직축 풍력 발전기는 바람의 방향과 회전하는 로터 축 이 평행한 반면, 수직축 풍력 발전기는 바람의 방향과 로터축의 방향이 수직인 형태를 갖는다. 수직축 풍력터빈은 양력을 이용한 다리우스 (Darrieus)[5]방식과 항력을 이용한 사보니우스 (Savonius) 방식으로 나눌 수 있다. 수평축 풍력 터빈의 성능 및 설계에 대한 연구는 국내외의 연구 논문이 많으나 수직축 터빈의 성능 및 설계에 대한 연구는 아직 부족한 실정이며, 수직축 풍력 터빈의 구조 설계 및 피로 해석에 관한 논문은 찾아보기 힘들다.

수직축 풍력터빈은 수평축 풍력 터빈에 비해 효율이 낮으나, 풍향에 관계없이 작동이 가능하며 로터 회전 속도가 상대적으로 낮아 높은 정밀도를 요구하지 않으므로 소형 풍력 터빈에 많이 활용된다. 그리고 동력 전달장치, 발전기 등의 주요 부품들이 지면 부근 설치가 가능하며, 수평축 에 비해 소음이 낮은 장점이 있다. 이는 인구 밀 집형 지역에 적용이 유리함을 가진다. 본 연구에 서는 먼저 공력 형상 설계를 수행하고, 복합재료를 적용하여 스킨-스파-폼 샌드위치 (skin-spar-foam sandwich) 구조를 채택하여 500W급 직접 구동형 수직축 블레이드의 구조 설계를 수행하였다. 적용된 재료는 경제적이면서 성능이 우수한 glass/epoxy가 적용되었다.

II. 본 론

2.1 시스템 사양 및 공력설계 결과

풍력발전 시스템의 설계를 수행하기 위해서는 먼저 시스템 사양에 대한 정립이 필요하다. 시스템의 사양은 사용 목적 및 용도에 맞도록 정의되어지며, 이러한 시스템의 규격이 정해지면 세부 적인 설계 요구조건을 정립할 수 있게 된다. 블레이드 설계는 시스템 사양 정립 후 공력 설계를 수행한 후 구조 설계를 수행한다. 먼저 설계 요구 조건으로부터 블레이드의 크기 및 에어포일, 깃 끝 속도비 등을 결정하는 공력 설계를 수행하고, 공력 해석 및 공력 실험을 통하여 요구 성능

만족 여부를 검토한 후 설계를 개선하거나 확정 하게 된다.

공력 설계 완료 후 구조 설계 요구 조건을 분석하여 구조 설계 하중을 산출하고 이를 바탕으로 구조 설계를 수행한다. 구조 설계 결과는 변형률 및 응력분포를 확인하기 위한 정하중 해석, 고유 진동수 해석, 좌굴 해석, 피로수명 해석을 수행하여 블레이드에 대한 안전성을 판단한다. 구조 설계 후 시제품을 제작한 뒤 구조 시험 및 성능 시험을 통하여 해석 결과와 비교를 통해 해석 결과의 타당성을 검증하고 설계를 확정하게 된다.

본 연구에서는 500W급 수직축 블레이드에 대한 공력 설계 및 구조 설계를 수행하여 설계 요구 조건을 만족하는지 검토하였다. 최종 블레이드 설계 결과를 제시하고 제작 및 구조 시험을 수행하여 구조 해석 결과와 비교하였다. 본 연구 대상 풍력 발전 시스템의 사양은 Table 1과 같다.

공력 설계는 Strickland 그리고 Sharpe에 의해 개발된 다중유관이론(Multi-Stream tube Theory) [5][6]을 기반으로 아래에 제시한 식을 통해 전산 해석코드를 작성하였으며, 현재 상용화 된 수직축 풍력터빈의 성능 시험과 비교하여 신뢰성을 확보한 후 수행하였다. 전산 해석 코드의 결과는 동력계수대 깃끝속도비로 출력되도록 작성되었으며 최적화된 공력 설계를 위해 설계변수를 각각

Table 1. System requirement

Type	Vertical Axis Wind Turbine System
Rated power	500 W
Rated wind speed	8 m/s
Cut-out speed	20 m/s
Maximum survival wind speed	55 m/s
Planned lifetime	20 year
Number of blades	2~5(To be determine the optimal value)
Rated rotor speed	100~500 rpm
Direction of rotation	Anticlockwise
Blade airfoil	To be determine the optimal airfoil for Rated wind speed
Rotor diameter	To be determine the optimal rotor diameter for Rated wind speed
Blade material	Glass/epoxy composite
Manufacturing	Lay-up molding

블레이드 수, 솔리디티(Solidity), 에어포일, 높이/반경 비에 대해 parameter study를 통하여 최적화된 공력 형상을 결정 하였다. 설계 결과는 풍력 터빈의 출력계수는 다음과 같이 정의 된다.

$$C_p = \frac{2P}{\rho S V_1^3} = \frac{bc}{2\pi S} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} C_t \frac{W_u^2}{V_1^3} \omega r dz d\theta \quad (1)$$

그리고 기계적 출력과 전기적 출력은 다음의 식을 통하여 계산 할 수 있다.

$$P = M\omega = \frac{bc}{2\pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} C_t q r \omega d\theta dz \quad (2)$$

$$P_e = \eta_g P \quad (3)$$

여기서 C_p : 출력계수, ρ : 공기 밀도, S : 풍력 터빈 정면 투영 면적, V_1 : 자유 흐름 속도, b : 블레이드 개수, c : 블레이드 시위길이, H : 블레이드의 높이/2, C_t : 접선력 계수, W_u : 블레이드 합속도, ω : 각속도, r : 풍력터빈의 반경, q : $\frac{1}{2}\rho W_u^2$, dz : 블레이드 미소 길이, η_g : 발전기 효율이다.

Table 2는 세부적인 공력 설계 결과를 명시하고 있고 Fig. 1은 깃 끝 속도비에 대한 동력 계수의 변화를 분석한 것으로 수직축 풍력 터빈의 최대 출력계수인 0.4에 근접함을 확인할 수 있다 [7][8].

공력해석은 상용코드인 ANSYS CFX를 이용하였으며, 블레이드는 회전 운동만 하기 때문에 블레이드 주위의 회전 영역과 그 외의 영역에서는 고정영역으로 구분하는 경계조건으로 적용하였다. 원통형 유동장의 반쪽 영역은 입구이며 그 반대는 출구 영역으로 설정하였으며, 설계한 값과 비교를 위해 정격 출력 조건인 입구에서는 풍속 8m/s를, 내부 회전영역은 167rpm으로 회전하도록 설정하였고, 출구와 유동장 윗부분에는 opening조건을 주었다. 사용된 격자수는 총

Table 2. Aerodynamic design result

Rated power	500W
Rated speed	8m/s
Rated RPM	168
Number of blades	5
Radius	0.9m
Blade length	2.56m
Blade chord length	0.27m
Airfoil	NACA0018

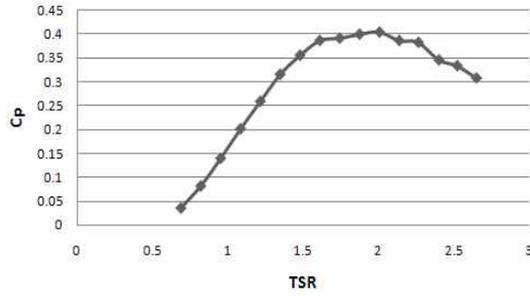


Fig. 1. Power Coefficient vs. Tip Speed Ratio

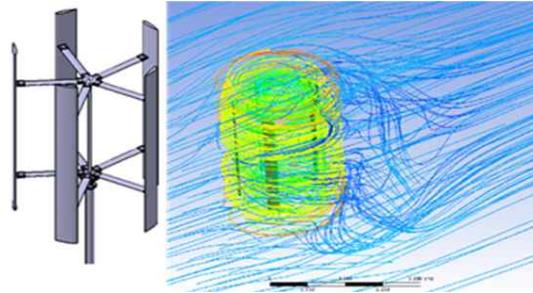


Fig. 2. Aerodynamic configuration of designed blade and Stream line distribution for fluid flow analysis

17309개이며 y+는 10이하로 하였으며, 해석 난류 모델은 층류로부터 난류로의 천이영역에 대한 높은 신뢰성의 $\kappa-\omega$ 모델 기반인 SST 모델을 적용하였다. 실제 성능 시험에 사용될 발전기의 효율 등을 고려하여 공력 설계 목표는 600W를 목표로 하였으며, 유동 해석 결과 출력은 663W로 공력 설계 목표와 유사함을 확인 하였다. 전체적인 공력 형상과 스트림 라인의 모습은 Fig. 2와 같다.

2.2 구조 설계 및 해석

블레이드의 공력 형상 설계 이후에 구조 설계 하중을 정의하고 구조 설계를 수행하였다. 구조 설계를 위한 하중은 공력 하중과 회전에 의한 원

Table 3. Load cases for structural design

Load case	Case 1	Case 2	Case 3
Reference wind speed	8m/s	20m/s	55.0m/s
Gust condition ($\pm 20\text{m/s}$, $\pm 40^\circ$)	without gust	with gust	storm
Rotational speed	167rpm	353rpm	stop

심하중을 고려하여 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. 본 연구에는 Table 3과 같이 이러한 조건을 고려하여 정의된 하중을 명시하였다. 블레이드의 원심력과 돌풍등을 고려하여 구조 설계 하중을 정의한 후 각각의 하중 조건을 해석하였다. 하중 해석 결과 하중 조건 2에서 가장 큰 모멘트가 발생하여 구조 설계 기준은 하중 조건 2로 정하여 구조 설계를 수행하였다. 구조 설계 형상은 스킨-스파-폼 샌드위치 기본 구조를 기준으로 블레이드의 스킨과 스파의 두께를 결정하는 방법을 적용하였다. 기본 구조 형상은 Fig. 3에 명시하였다. 사용된 재료는 구조적 강도 및 피로 수명이 뛰어나고 비교적 저렴한 Glass/epoxy Fabric을 적용하였다. 블레이드의 스킨은 주로 전단하중을 담당하므로 ±45로 적층하고, 스파는 주로 굽힘 하중을 담당하므로 (0/90)로 적층하였다. 블레이드 내부는 좌굴 강도를 개선시키고 높은 진동감쇠효과를 갖도록 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam)이 적용되었다. 블레이드와 타워를 연결하는 연결 지지대의 위치는 블레이드의 굽힘 모멘트가 최소화 되는 위치로 정하였다. 선행 연구를 통해 신뢰성이 확보된 단순 설계 방안(netting rule)와 혼합 설계 방안(rule of mixture)를 통하여 블레이드의 초기 구조 설계를 하였으며 설계 결과를 Table 4에 나타내었다[1][2].

복합재료는 압축하중이 약하기 때문에 압축 응력이 작용하는 부위 안전성을 면밀히 검토해야 한다. 구조 해석을 위해 본 연구에서는 유한요소 상용 코드인 NASTRAN을 이용하여 구조 해석을 수행하였다. 해석 결과 스킨의 응력은 압축 응력이 86.9MPa, 인장 응력이 97.4MPa로 확인되었으며, 스파의 응력은 32.9MPa, 인장 응력은 11.1MPa로 확인되었다. 응력 해석 이후 블레이드의 중요 검토 요소인 좌굴 해석 결과 좌굴 하중 배수는 1차 모드에서 1.02로 확인되었다. 안전성 검토를 위한 파괴 기준으로는 Tasi- Wu 파괴 이론을 적용 하였다. 본 연구 블레이드는 설계 단계에서 안전을 3이 고려되어 다양한 운용 환경

Table 4. Structural analysis result

Spar	$[(0/90)_4/\pm 45/(0/90)_2]_s$
	3.5t
Skin	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45/(0/90)/\pm 45/\pm 45/\pm 45]$
	1.75t

조건에서 구조안전성을 충분히 확보한 것으로 확인되었다. 해석 결과는 Table 5에 나타 내었다. 또한 본 연구 대상 블레이드는 회전하는 구조물이므로 공진 여부를 반드시 검토해야 한다. 고유 진동수 해석은 구조물의 공진 여부를 검토하기 위해 MSC. Nastran을 통하여 수행되었으며, Fig. 5의 Campbell 선도를 검토해보면 운용회전수인 167rpm 근처에서는 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

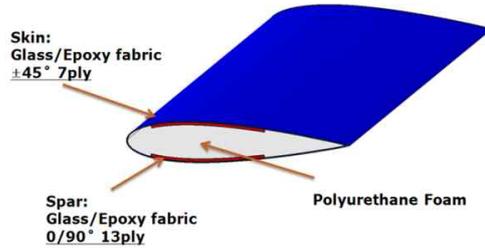


Fig. 3. Blade structural design concept with skin-spar-foam sandwich

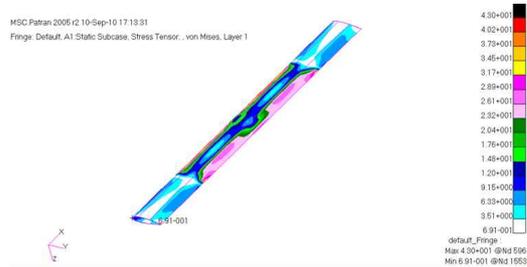


Fig. 4. Stress contour on blade illustrated by FEM analysis

Table 5. Stress analysis results of small VAWT blade

Blade components	Analysis result	Spar	Skin	Connection support
		Max. stress [MPa]	Ten. 12.4 Comp. 21.1	94.4 92.8
Max. stress failure criterion	Ten.	0.04	0.3	0.91
	Comp.	0.11	0.5	
Tsai-Wu failure criteria		0.23	0.78	

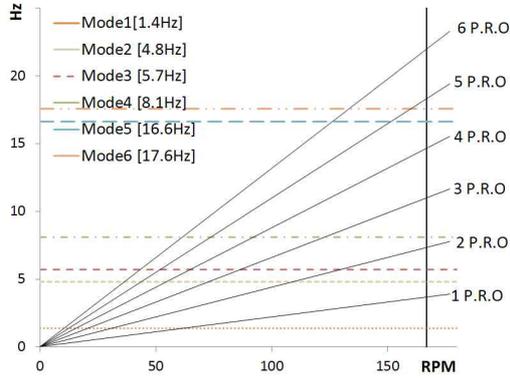


Fig. 5. Cambell diagram of small VAWT blade

2.3 피로 수명 해석

풍력발전용 회전날개는 요구 피로 수명 동안에 예상되는 반복 하중에 견딜 수 있어야 한다. 본 연구에서는 국내에서 평균 풍속이 8m/s인 지역의 풍속을 분석하여 공력 설계 프로그램을 이용해 하중 스펙트럼(spectrum)을 분석하였다. 그리고 마이너 법칙(miner's rule)을 통해 풍력 터빈 시스템의 수명 요구조건인 20년에 대한 구조의 건전성을 판단하였다[9][10].

국내 평균 풍속이 8m/s인 전라도 여수 간여암의 2010년 1년 동안의 풍속 자료를 총 13개의 영역으로 나누었다. 풍속 2m/s이하는 풍력 터빈 시스템의 시동 풍속 이하이므로 회전 날개의 하중이 작용하지 않는다고 가정하였으며 풍속 20m/s~40m/s 영역에서는 회전 날개가 운용되지 않고 정지 되어 있는 영역으로써 이때의 하중은 최대 풍속인 40m/s의 하중으로 계산하였다.

Table 6. Fatigue load spectrum

Wind Speed (m/s)	Operating time years(h)	Load/Max. Load		Cycle (20years)	Cycle/Min. cycle
		Max.	Min.		
2~3	1151	0.006	-0.004	8.E+07	12
~4.5	935	0.13	-0.01	1.E+08	14
~6	1022	0.023	-0.018	1.E+08	21
~7.5	926	0.036	-0.028	2.E+08	30
~9	881	0.052	-0.04	2.E+08	23
~10.5	770	0.071	-0.054	2.E+08	24
~12	626	0.092	-0.071	2.E+08	26
~13.5	524	0.117	-0.09	2.E+08	25
~15	400	0.144	-0.111	1.E+08	21
~16.5	213	0.175	-0.134	8.E+07	12
~18	127	0.208	-0.167	6.E+07	8
~20	100	0.244	-0.187	4.E+07	7
20~40	97	0.009	0	6.E+06	1
합계	7772			1.E+09	

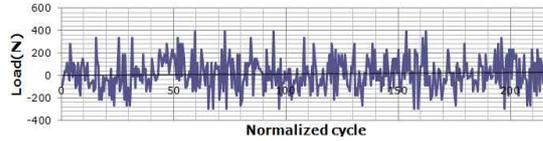


Fig. 6. Result of load spectrum

각 풍속에 대한 풍력 터빈의 RPM 및 회전 날개에 작용하는 하중은 앞서 제안했던 공력 설계 프로그램을 통해 획득하였다. 또한 공력 설계 프로그램을 통해 얻은 각 풍속영역에 대한 20년 동안의 사이클(cycle)을 구하였다. 하중 스펙트럼(spectrum)에 의한 가변하중이력을 받는 상황에서 수명을 예측하기 위한 단순화된 하중 이력으로 줄이기 위하여 20년 동안 가장 사이클(cycle)이 낮은 20m/s~40m/s 영역대의 사이클(cycle)로 나누어 사이클(cycle)비를 계산한 후 하나의 군으로 나타내었다. 상기 과정을 통해 생성된 하중스펙트럼(spectrum)은 무차원화된 값이다. Fig. 6은 한 군의 하중 스펙트럼(spectrum)을 나타낸 그래프이며, Table 6은 각 풍속 영역별로 분석된 하중 스펙트럼(spectrum)이다.

사용된 복합소재에 대한 S-N 곡선[7]과 하중 스펙트럼을 이용하여 누적손상을 계산하였으며 피로수명을 평가하기 위해 마이너 법칙을 통하여 피로수명 요구조건 20년에 대한 구조의 건전성을 판단하였다. 그러나 마이너 법칙에서 손상은 피로 한도 이상의 응력에 대해서만 고려되기 때문에 풍속 2~3m/s와 같이 피로 한도 이하의 응력에 대해서는 수정된 마이너 법칙을 적용하였으며, 최종 계산한 결과는 0.7로서 피로 요구 수명 20년을 만족함을 확인 하였다.

2.4 시제품 제작 및 구조 실험

시제품 제작을 위해 스티로폼을 이용한 mock-up을 제작하였으며, 이를 상면과 하면으로 분할하여 제작하였다. 제작된 몰드의 재질은 glass/epoxy이며, 경화 중에 압력을 받더라도 변형되지 않도록 충분한 강도를 갖도록 하였다. 이렇게 제작된 몰드에 이형재를 바르고 겔코트를 도포한 후 hand lay-up 방법으로 유리섬유 및 에폭시를 적층하였으며, 상하면 몰드의 적층이 끝나게 되면 이들을 서로 결합한 후 내부에 우레탄 폼을 발포하는데, 이때 원래 부피의 약 3배정도로 팽창하는 폼의 발포압력을 이용하여 적층된 섬유를 몰드에 밀착하도록 하여 섬유 체적비가 향상하도록 하였다. Fig. 7은 이러한 제작 과정을 나타낸다.

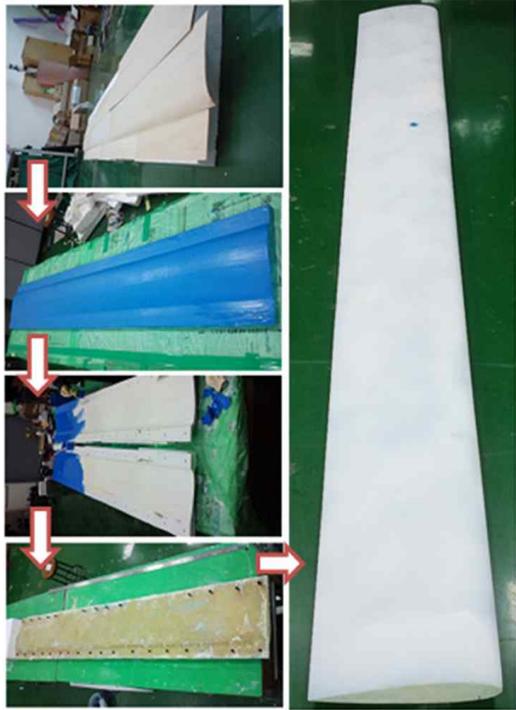


Fig. 7. Manufacturing Process and first blade prototype

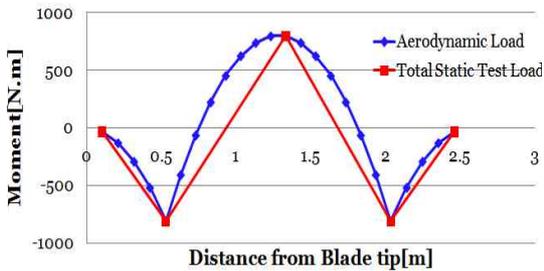


Fig. 8. Static strength test loads simulated by three-point loading method



Fig. 9. Static test of the prototype blade

Table 7. Comparison between the static analysis results and the test results

Item	Analysis results	Test results
Max. displacement at blade center	54 mm	51 mm
Upper and lower surface strain at 50mm from blade center($\mu\epsilon$)	1060(upper), -870(lower)	1010(upper), -762(lower)

제작된 시제품 블레이드를 정 하중 시험을 위해 설계하중을 3점 집중하중으로 모사하여 각각의 하중은 유압식 구조시험 장비를 활용하여 정 하중 시험을 수행 하였다. Fig. 8은 실제 하중을 3점 집중하중으로 모사한 모습이며, Fig.9는 구조 시험 중인 블레이드의 사진이다. Table 7은 이를 구조시험 결과와 비교한 것으로서 서로 잘 일치함을 확인하였다.

2.5 성능 실험

설계된 블레이드의 공력 성능을 입증하기 위해 공력 시험이 수행되었으며 이를 위해 특별한 시험장치 및 타워(tower)가 제작되었다. 실험실 주변에는 바람이 일정치 못하고, 충분한 풍속이 나오지 않는 지역이므로 적재함이 있는 차량에 타워(tower)를 고정하여 실험하였다. 이 방법은 다른 논문을 통해 성능 시험에 적합함이 확인되어 있다. 차량에 고정된 풍력터빈 시스템은 3 ~ 11m/s 사이의 다양한 풍속에서 출력이 측정되었으며 보다 더 정확한 실험을 수행하기 위하여 한 가지 풍속에 대해서 3km의 거리를 주행하며 출력이 측정되었다. 공력시험을 위해 서영테크의 SYG-A208-600 발전기[11]를 사용하였으며, 3상을

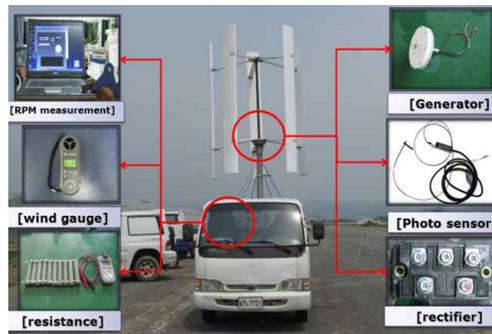


Fig. 10. Equipment for the aerodynamic test

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

	Target	Program result	CFX analysis result	Test result
Power (at 8m/s)	500W	601W	663W	459W
The error considering generator efficiency	-	1%	9%	-

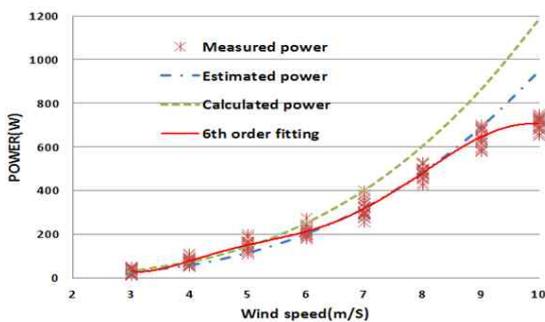


Fig 11. Static test of the prototype blade

단상으로 바꾸기 위해 정류기가 사용되었으며, 저항을 바꿔가며 전압측정기를 이용하여 최대 출력을 측정하였다. RPM 측정을 위해서 NI사의 포토센서(photo sensor)와 랩뷰(Labview)로 만들어진 프로그램을 통해 데이터 분석을 수행하였다. Fig. 10은 공력시험 장치의 전체적인 구상도로서 발전기부분으로부터 전달되어오는 전기적 신호를 수집하여 출력계산을 위한 전압, 전류 측정 장치, 풍속 및 회전수 등을 실시간으로 확인 할 수 있는 장치들로 구성되어있다. Table 8과 Fig. 11은 설계 프로그램을 통해 해석한 결과와 실험 결과를 비교한 것으로서 측정된 출력은 기계적 효율이 포함된 공기역학적 출력이며 계산된 출력은 순수한 공기역학적인 출력과 여기에 설계 단계에서 고려하였던 발전기 제작 회사에서 제공한 기계적 효율 83%를 적용하여 계산된 전기적인 출력이다. 본 풍력 터빈의 발전기는 정격 풍속에서 실험 결과 이론적인 계산 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 그러나 풍속이 높아질수록 이론적인 계산 값과 비교적 높은 오차를 보였으며, 이는 발전기의 출력 범위와 블레이드의 실속 등에 의한 오차로 판단된다.

III. 결 론

본 연구에서는 한국과 같은 지형에 적용이 가능하도록 양호한 저 풍속 시동 특성을 가지며 효율이 높은 500W급 소형 수직축 풍력터빈 시스템을 새롭게 제안하고 공력 및 구조에 관한 최적 설계를 수행하였다. 또한 설계된 풍력터빈에 대한 이론적인 성능해석을 수행하였으며, 시제품 제작 및 실험을 통하여 설계결과를 확인 하였다. 공력 설계에서는 여러 가지 다양한 설계 변수 분석을 통해 각각의 설계변수에 따른 블레이드 설계결과를 충분히 검토하여 사용 목적에 맞도록 최적화하였다. 또한 상용 프로그램 ANSYS CFX를 이용하여 공력 해석을 수행하였다.

구조 설계에서는 스킨-스파-폼(skin-spar-foam)의 샌드위치 기본 구조를 기준으로 구조 설계 및 해석을 하였으며, 사용 재질은 국내 업체에서 제조하여 그 물성이 입증된 유리섬유/에폭시(glass/epoxy)를 사용하였다. 또한 블레이드의 제조 방법으로는 비용 절감을 위해 수직층(hand lay-up)에 의한 matched die molding을 고려하였다. 구조 해석은 유한요소법을 이용하여 응력 및 변형량을 해석하였으며, 굽힘 하중에 의한 국부 좌굴 문제를 고려하였고, 또한 피로 요구 수명 20년을 만족하는지 확인하기 위하여 하중 스펙트럼 생성 및 마이너 법칙을 통하여 확인 하였다. 그리고 이와 같은 방법으로 설계 및 해석된 블레이드의 시제품 제작을 통한 구조시험 및 성능 시험을 수행하여 구조해석 및 공력 해석의 결과를 입증하였다.

참고문헌

- 1) 공창덕, 최수현, 박현범, "고효율 복합재 블레이드를 사용한 500W급 풍력터빈에 관한 연구" 한국항공우주학회, 한국항공우주학회지, 제37권 제2호 2009. 2, pp. 201-208.
- 2) 방 조혁, "소형 풍력발전 시스템의 고효율 경량화 설계 및 해석에 관한 연구", 조선대학교 박사학위논문, 2004.
- 3) 최재승, 김규홍, 이경태, "한국형 풍력터빈의 요구조건 검토" 한국항공우주학회, 한국항공우주학회지, 제30권 제1호 2002.2, pp. 165-172.
- 4) 고경남, 허중철, 풍력공학입문, 문운당, 2006
- 5) David M. Eggleston., "Wind Turbine Engineering Design", Springer, 1987.
- 6) Desir Le Gourieres, "Wind Power Plants

Theory and Design", Pergamon, 1982.

7) Wilson, R. E. and Lissaman, P. B. S., 1974, Applied Aerodynamics of Wind Power Machines, Research Applied to National Needs, Oregon State University, GI-41840.

8) 박준용, 이명재, 이승신, 이승배, 이승진, "고효율 소형 수직형 풍력터빈의 공력성능에 관한 실험적 연구", 대한기계학회, 대한 기계학회논문

문집 B권, 제33권 제8호 2009, pp. 580-509.

9) IEC 1400-1, "Wind Turbine Generator System Part I, Safety Requirement, First Edition", IEC, 1994.

10) IEC 61400-02, "Part 2: Design requirements for small wind turbine", IEC, 2006

11) Seoyoung Tech. http://www.evsmotor.co.kr/kor/afpm/afpm_list1.php.