

소형 풍력발전기 블레이드의 구조설계 및 충격손상 안전성 연구

공창덕* · 최수현* · 박현범*

Investigation on Structural Design and Impact Damage for a Small Wind Turbine Blade

Changduk Kong* · Suhyun Choi* · Hyunbum Park*

ABSTRACT

Recently the wind energy has been alternatively used as a renewable energy resource instead of the mostly used fossil fuel due to its lack and environmental issues. This work is to propose a structural design and analysis procedure for development of the low noise 100W class small wind turbine system which will be applicable to relatively low speed region like Korea and for the domestic use. Structural analysis including load cases, stress, deformation, buckling, vibration and fatigue life was performed using the Finite Element Method, the load spectrum analysis and the Miner rule. In order to evaluate the designed structure, the structural test was carried out and its test results were compared with the estimated results. In addition, the blade should be safe from the impact damage due to FOD(Foreign Object Damage) including the bird strike. In order to analyze the bird strike phenomena on the blade, MSC.Dytran was used, and the applied method Arbitrary Lagrangian-Eulerian was evaluated by comparison with the previous study results.

Key Words: Wind Turbine Blade, Arbitrary Lagrangian-Eulerian, Impact Analysis

1. 서 론

최근 화석 연료가 고갈됨에 따라 대체 에너지 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 풍력 발전기는 바람의 에너지를 유용하게 사용할 수 있도록 전기적 에너지로 바꾸어 주는 시스템으로 매우 친환경적이기 때문에 다양하게 연구되

고 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[1,2]. 또한 복합재료를 사용하게 되면서 구조적 강도 및 피로 수명이 크게 향상 되었다. 그런데 기존의 풍력 발전기들이 대부분 선진국에서 개발되

* 조선대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: sisito@hanmail.net

어은 형태로서 소형 풍력 발전기들의 정격 풍속은 대부분 국내의 기상에 적합하지 않아 국내 기상에 알맞은 풍력 발전기 개발이 요구된다 [1,2].

본 연구에서는 국내 기상과 같이 저 풍속인 지역에서 우수한 성능을 발휘할 수 있고 가정에서 운용이 가능하도록 소음이 적은 100W급 저소음 직접 구동형 수평축 블레이드의 공력 및 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 적용 재료는 경제적이면서 성능이 우수한 glass/epoxy가 적용되었다[3]. 또한 설계된 블레이드의 실제 거동이 이론적 해석결과와 일치하는지 확인을 위하여 구조 시험이 수행되어야 한다.

2. 시스템 사양 및 공력 설계 결과

본 연구 대상 풍력 발전 시스템은 수평축 풍력 발전 시스템으로서 정격 출력이 100W이며, 정격 풍속은 12.8m/s이고, 적용된 에어포일은 공력 성능, 저소음 특성 및 구조성능이 양호한 NACA 632-615이다. 블레이드의 직경은 2.54m이고, 비틀림 각은 22.6°이다. 특히 소음을 감소시키기 위해 블레이드 팁의 형상을 곡선으로 처리하였다. 적용될 발전기는 낮은 풍속에서 고효율 에너지 변환 장치로 적용될 수 있는 직접 구동형 AFP(Axial Flux Permanent Magnet) 발전기이다. 세부적인 공력 설계 결과는 Table 1에 명시하였다.

Table 1. Aerodynamic design results of small wind turbine blade

Rated power	100W
Rotor radius	425mm
Blade root chord	80mm
Blade tip chord	25mm
Blade total twist	11.925deg
Airfoil	NACA 63-415

3. 블레이드 구조 설계

구조 설계를 위한 블레이드에 작용하는 하중은 공력하중, 원심하중이 주하중으로 작용한다. 원심하중은 유한 요소 해석 단계에서 구조 해석 모델에 회전수를 고려하여 적용할 수 있으므로 계산되어야 할 하중은 공력하중으로 Table 2과 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 하중 Case 2의 경우가 블레이드에 가장 큰 모멘트를 발생시키는 하중 Case 2의 하중 해석 결과를 보여주고 있다.

구조 설계하중을 바탕으로 블레이드의 구조 형상은 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하여 설계하였다[4]. 블레이드 구조 설계 형상은 스킨과 스파가 블레이드 길이방향으로 적층되고 블레이드 내부에 폼이 적용된 구조 형태이며 각 구획별 하중을 계산하여 길이방향 적층수를 결정하였다. 복합재료 설계 방법을 적용하여 초기 구조 설계 결과를 확정된 이후 구조 해석을 통해 설계 개선하는 방법을 적용하였다. 초기 설계 결과에 대한 구조 안전성 평가 결과 공진 여부가 확인되어 개선 설계를 통해 최종 설계 결과를 확정하였다.

Table 2. 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

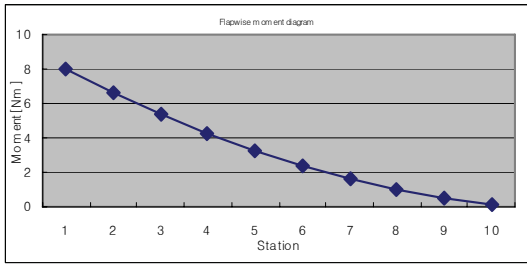


Fig. 1 Moment diagram for Load Case 2

4. 구조 해석

구조 설계 결과에 대한 구조 안전성 평가를 위해 본 연구에서는 구조 해석을 위해 유한 요소 상용 코드인 MSC. PATRAN/NASTRAN을 사용하였으며, 안전성 검토를 위한 파손 기준으로 Tsai-Wu 파괴 이론[5]을 적용하였다. 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 충분한 안전율을 확보한 안전한 구조로 설계되었음을 확인하였다. 블레이드의 공진 여부를 검토하기 위해 고유 진동수 해석 결과 운용 회전수 근처에서 공진이 발생하지 않음을 확인하였다. 좌굴 안정성 평가 결과 또한 하중 배수 4이상으로 운용중 좌굴 안정성을 충분히 확보한 구조임을 확인하였다. Fig. 2-3에 선형 정적 해석 결과인 응력 분포와 변위를 나타내었다. 또한 작용된 블레이드의 주기적 응력이 피로한계이하에서 피로수명요구조조건인 10년(1.2×10^9 Cycles)을 충분히 만족함을 확인하였다.

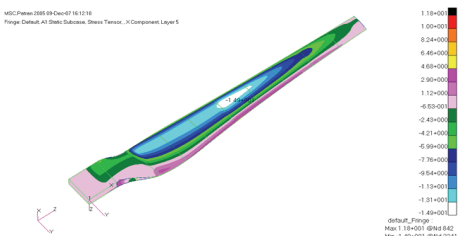


Fig. 2 Stress analysis result of load case 2

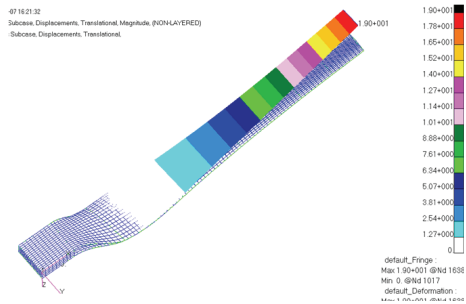


Fig. 3 Displacement analysis result of load case 2

Table 3. Structural analysis results

		Case 2
Max. stress [Mpa]	Ten.	11.4
	Com.	14.9
Max. Disp. [mm]		19
natural frequency(Hz) (First flap mode)		41.95
Buckling load factor (First buckling mode)		10.63

5. 시제품 제작 및 구조시험

시제품 제작을 위해 몰드를 제작하여 구조 설계 결과를 상하면 몰드에 적용하여 시제품 블레이드를 제작하였다. 블레이드에 사용된 재료는 구조적 강도 및 피로 수명이 뛰어나고 비교적 저렴한 Glass/Epoxy를 적용하였고 물성값과 제작된 블레이드의 형상은 각각 Table 4와 Fig. 4에 나타내었다.

설계된 블레이드의 실제 거동이 이론적인 해석 결과와 잘 일치하는지 확인하여 이론 해석에서 제시한 안전계수 등의 제반 사항을 입증하기 위해 구조 시험이 수행되어야 한다. 일반적으로 구조시험은 정하중 시험을 수행하며, 구조물이 파괴에 이를 때까지 하중을 증가하여 파괴 강도를 얻는 형태를 취한다. 본 연구에서는 설계 하중을 작용시켜 이때의 응력 및 변위를 측정하여 해석 결과와 비교 하는 방법과 파괴 강도를 얻는 두 가지 방안을 적용하고자 한다.

모델의 구조 시험은 본 연구팀이 보유하고 있는 항공기 구조물 시험 장치인 유압식 구조 하중 시험 장치를 이용하여 수행하였다. 정하중 시험을 위해 설계 하중은 집중하중으로 모사되었으며, Fig. 5는 Case2의 하중을 모사하여 시험을 하는 방안을 보여준다. Table 5는 모델의 유한 요소 해석 결과와 구조 시험 결과를 비교한 것으로 서로 유사한 결과임을 보여 주고 있다.

Table 4. Mechanical properties of materials used in the present blade design

	Glass/Epoxy Fabric	Polyurethane Foam
E_{11} [N/mm ²]	10500	60.86
E_{22} [N/mm ²]	10500	59.86
G_{12} [N/mm ²]	1450	19.18
ν	0.27	0.2
X_t [N/mm ²]	283.9	2.63
X_c [N/mm ²]	184.6	1.41
Y_t [N/mm ²]	283.9	2.49
Y_c [N/mm ²]	184.6	1.41
S [N/mm ²]	15.0	0.71
S [N/mm ²]	1.705	0.1197
thickness [mm]	0.25	12.5

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

Item	Analysis result	Test result
Stress	13.1 MPa	14.5 MPa
Tip displacement	19mm	17mm

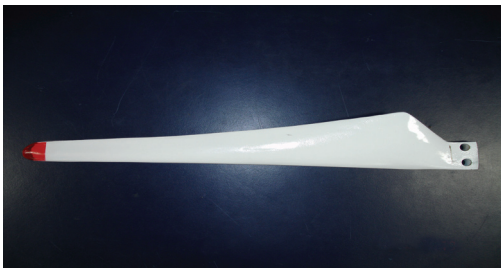


Fig. 4 First prototype blade



Fig. 5 Static structural test view

6. 충돌모사 및 해석

6.1 해석 방안의 타당성 검증

유체 충돌로 모사한 해석적 접근방법의 결과는 충돌시험 결과와 비교하여 그 타당성을 검증한다. 본 연구는 이를 위해 MSC/DYTRAN을 이용하여 해석을 하였다[6].

조류는 종류가 매우 다양하여 밀도와 크기가 각기 다르다. 조류 형상은 앞뒤 반구에 원통형 형상으로 가정하여 구현하였다.[6] 결정된 조류 형상을 바탕으로 알루미늄 평판에 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 선행 연구 결과와 비교하여 신뢰성 검증을 시도하였다.

해석의 검증을 위해 조류의 모델링은 참고문헌 [6]과 동일하게 상용프로그램에서 제공하는 수

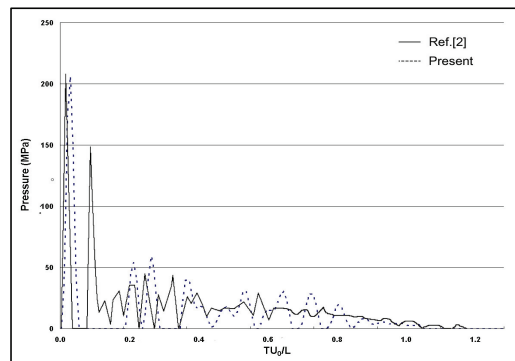


Fig 6. 조류 충돌지점에서의 압력곡선 해석 결과(V=197m/s)

학력학적 유체 재질(Hydrodynamic material)을 사용하였다. 조류를 포함하는 오일러 영역은 8절점 솔리드 요소를 사용하였고, 강체평판에 1.814kg의 조류가 197m/s의 속도로 수직충돌 할 때 유체로 가정한 조류의 밀도는 950kg/m^3 이다.

Fig 6은 유한요소 해석 결과에 따른 압력 변화를 선행연구결과와 비교한 그래프이다. 그래프 검토결과 충돌초기에 높은 충돌압력이 발생하고 일정시간 이후에는 정상상태 압력으로 접근함을 알 수 있다. 동일조건하에서 시험을 통해 측정된 참고문헌의 결과와 유사하게 충격압력과 정상상태 압력 값이 비교적 잘 일치함을 확인 하였다.

6.2 조류 충돌 해석

본 연구에서는 유한요소 해석의 타당성 검증을 위해 참고문헌[6]의 자료를 기준으로 유한요소 해석을 수행한 해석결과를 바탕으로 폭풍이 불 때 블레이드의 조류충돌을 유체충돌로 모사하였다. 충돌지점은 블레이드 중앙지점으로 가정하였으며 충돌속도는 55m/s로 선행연구를 참조하여 가정하였다. 블레이드의 재질은 Glass/epoxy 이나 해석의 용이성 및 시간단축을 위해 준 등방성인 알루미늄재질로 가정하여 해석하였으며 사용된 물성치는 Table 6과 같다.

Table 6. 충돌해석을 위한 블레이드 및 조류의 재료 특성값

	Blade	Impactor
Density (kg/m^3)	2810	950
Bulk Modulus (Pa)	$7.03\text{e}10$	$2.2\text{e}9$
Poisson Ratio	0.33	
Yield stress (Pa)	$5.03\text{e}8$	
Thickness (m)	0.00175	
Diameter (m)		0.03
Length (m)		0.06
Mass (kg)		0.079

블레이드와 오일러 요소의 경계조건은 ALE Algorithm으로 정의 되었다.

Fig 7은 유한요소 해석을 위한 모델링 결과이다. Fig 8은 조류충돌에 의한 충격지점에서의 압력 곡선결과를 나타내었다. 이때의 시간은 유체가 충돌시의 속도로 조류자체의 길이만큼 지나는데 소요되는 시간으로 무차원화 한 것이다.

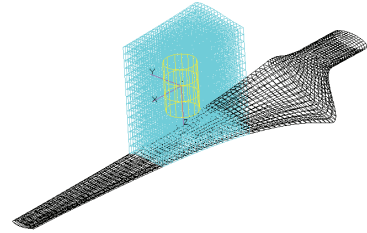


Fig 7. 유체충돌 해석을 위한 블레이드와 오일러 요소 생성

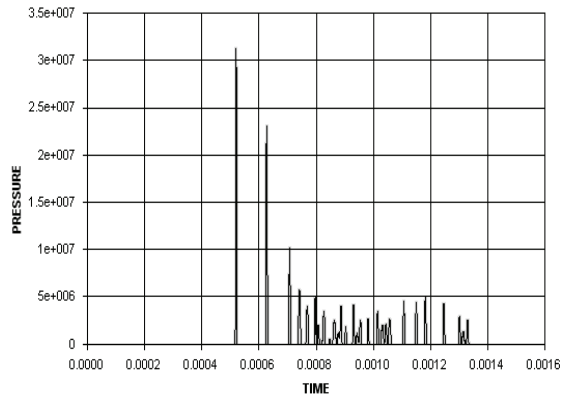


Fig 8. 블레이드에서의 유체 충돌지점에 대한 압력변화 곡선(V=55m/s 경우)

조류가 55m/s로 충돌 시 초기 충격압력과 정체 압력이 잘 나타나고 있으며, 충돌에 따른 최대 응력과 최대 변위 값을 Table 7에 나타내었다.

Table 7. 충돌지점에서의 최대응력과 변위

Thickness	1.75t
Stress(GPa)	0.151
Disp(m)	0.00517

Fig 9에 유체와 구조물의 충돌 시 응력분포를 나타내었다. 응력이 구조물의 허용응력 범위 안에서 발생하며, 조류의 충돌에 대한 충분한 안전율을 확보한 것으로 판단된다.

Fig 10은 유한요소 해석결과 충돌 시 조류의 형상변화를 보여준다. 앞에서의 응력과 변위에 관한 결과에서 판단되는 충돌 시 조류의 형상을 확인 할 수 있었다.

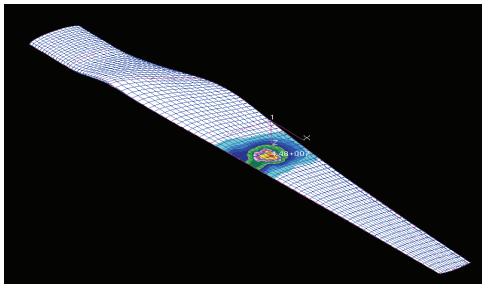
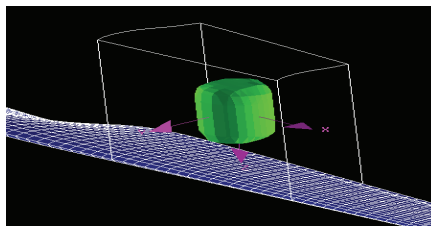
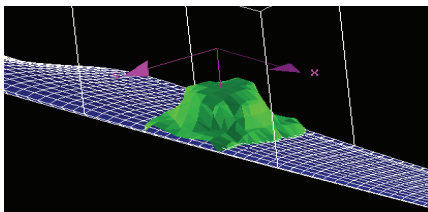


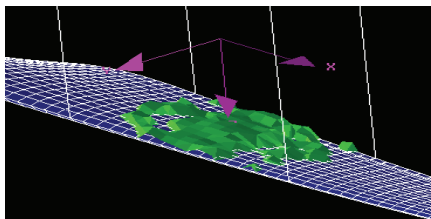
Fig 9. 충돌 지점에서의 응력분포(0.45msec)



0 sec



0.438 msec



1.463 msec

Fig 10. 조류충돌 시 시간에 따른 조류요소의 변형된 형상

7. 결론

본 연구에서 국내 지역에 적합하고 가정에서 운용이 가능하도록 소음이 적은 100W급 저소음 수평축 블레이드의 공력 및 구조 설계 결과를 분석하여 구조 해석을 수행하였다. 선형 정적 해석, 고유 진동수 해석, 좌굴 해석 및 피로수명해석 등의 유한 요소 해석을 수행한 결과 구조 안전성 및 안정성을 확보한 구조 설계 결과임을 확인하였다. 또한, 폭풍의 상황 하에서 조류 충돌 시 블레이드의 구조에 미치는 영향을 해석을 통하여 조사하였다. 본 연구를 통해 수행된 조류유체충돌로 모사한 조류 충돌에 관한 해석적 기초 연구 결과를 바탕으로 정확한 대상체가 주어진다면, 충격계의 질량별로 다양한 해석을 수행하고 추후 조류 충돌 시험을 병행하여 해석 결과의 시험 결과를 비교 검증하여야 할 것이다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 블레이드 설계단계에서 외부 손상에 의한 충격손상에 대해 충분한 안전율을 고려한 설계를 수행하는데 활용할 수 있을 것이다. 유체-구조 연성기법을 등방성재료대신 비등방성인 복합재료에 적용하여 연구가 진행 중에 있다.

참고문헌

- 1) 공창덕, 방조혁, "1 kW급 소형 풍력 발전용 블레이드의 공력 설계 변수에 관한 연구", 한국항공우주학회 춘계 학술대회 논문집, 2003.
- 2) 공창덕, 방조혁, 오경원, "1 kW급 소형 풍력 발전용 블레이드의 구조 설계", 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, 2003.
- 3) Dieter, G. E et al., "Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology", National Academy Press, pp.5-65, 1991.
- 4) Gourieres, D. L., "Wind Power Plants", Pergamon Press, 1982.
- 5) Chang, F. K. et al., "Strength of Mechanically Fastened Composite Joint", J. of Composite Materials, 1982.

6) 문창오, 우중호, 우태식, 황철호, 박찬익,
“항공기용 Windshield의 조류충돌 저항성 평가”,
한국항공우주학회지, 제24권, 제2호, 1996,
pp.95-105.

7) Wilbeck, J. S., “Impact Behavior of Low
Strength Projctiles”, Air Force Materials
Lab. Rept. AFML-TR-77-134, July 1978.