

대형급 고효율 풍력 발전 시스템 블레이드 구조 설계 및 해석 연구

공창덕* · 김민웅* · 박현범**

A Study on Structural Design and Analysis of Large Scale and High Efficiency Blades for Wind Turbine System

Changduk Kong* · Minwoong Kim** · Hyunbum Park**

ABSTRACT

Recently, the renewable energy has been widely used as a wind energy and solar energy resource due to lack and environmental issues of the mostly used fossil fuel. In this situation, the interest in wind power has been risen as an important energy source. For this blade a high efficiency wind turbine blade was designed with the proposing aerodynamic design procedure, and a light and low cost composite structure blade was designed considering fatigue life. Structural analyses including load case study, stress, deformation, buckling, fatigue life and vibration analysis were performed using the Finite Element Method.

Key Words: Wind Turbine Blade, Structural Design, Sandwich Composite

1. 서 론

본 연구에서는 대형 풍력 발전용 블레이드의 피로 수명을 고려한 경량화 설계 기법을 제시하기 위하여, 선행연구로서 1 MW급 블레이드를 대상으로 공력 설계 및 구조 설계를 수행하여 경량화 설계 기법을 제안하였다. 최적 에어포일을 통해 블레이드 공력 형상을 설계하여 블레이드의 공력 해석을 통해 설계 요구 조건을 만족하

는지 확인하였으며 복합재료를 적용하여 블레이드의 구조 설계를 수행하고 구조 해석을 통해 구조 안전성을 검토하였다. 최종적으로 설계된 블레이드에 대하여 Spera가 제안한 실험식을 통하여 피로하중을 계산하였고, 결과값을 적용하여 피로수명해석을 수행하였다.

2. 공력 설계 및 해석

본 연구에서는 국내 신재생에너지 연구의 활성화를 통해 피로수명을 고려한 블레이드 경량화 설계 방안을 정립하기 위하여 대형급 블레이

†2012년 11월 15일 접수 ~ 2012년 12월 17일 심사완료

* 종신회원, 조선대학교 항공우주공학과

** 종신회원, 호원대학교 국방기술학부

연락처, E-mail: swordship@daum.net

드의 공력 설계를 수행하였다. 대상 블레이드는 정격 풍속 12m/s에서 운용되며 정격 출력은 1 MW급으로, 공력설계 시 최대 양력계수, 최대 양항비 및 구조적 강도를 위해 에어포일의 두께가 비교적 두꺼운 형상을 가지는 NACA 63-421을 선정하였다. 공력 설계 방안은 최대 양항비를 갖는 최적의 받음각으로 설계하였다. 성능해석 결과 설계요구조건에 비해 높은 출력을 낼 수 있도록 설계되었음을 확인하였고, 기존의 풍력터빈보다 동력계수가 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 전산 해석코드의 신뢰성을 확인하기 위하여 Applachian State University에서 설계, 제작한 900W급 Whisper H40 풍력터빈의 광력 실험값과 전산해석코드의 결과 값을 비교 하였다. 최종 공력 해석을 통해 설계된 블레이드의 설계 결과는 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 성능해석 결과는 Fig. 2에 나타내었고 실제 설계된 풍력터빈과 전산해석코드의 결과 값 비교는 Fig. 3에 나타내었다[1,2].

Table 1. Aerodynamic design results

Rated Power	1 MW (Electric Power)
Rotor Radius	28.5 m
Blade Root Chord	2734 mm
Blade Tip Chord	957 mm
Blade Total Twist	24.687 deg.
Airfoil	NACA 63-421

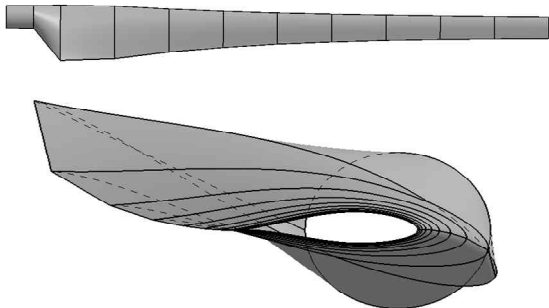


Fig. 1 Aerodynamic design result of blade

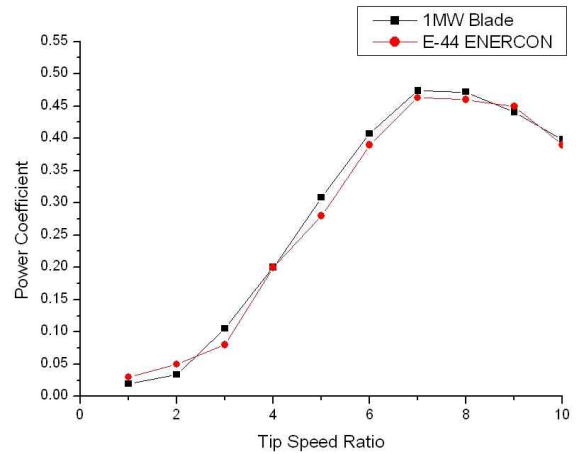


Fig. 2 Power coefficient vs Tip speed ratio

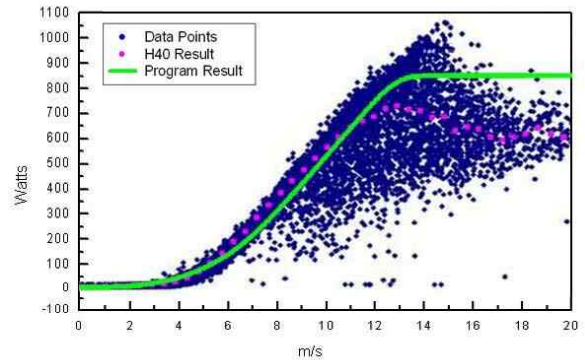


Fig. 3. Compare of program result and Whisper H40

3. 구조 설계 및 해석

블레이드 공력 형상을 분석하여 블레이드 구조 형상은 스킨-스파-샌드위치 구조 형태를 채택하였다. 블레이드의 구조 설계를 위하여 블레이드에 작용하는 하중을 분석하여 다음 Table 2와 같은 하중 조건으로 정의 하였다. 하중 해석 결과 Case 2에서 블레이드에 가장 큰 모멘트를 발생시킴을 확인하여 구조 설계 기준으로 정의 하였다[3].

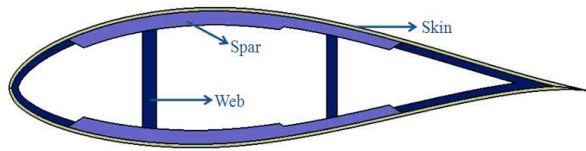


Fig. 4. Configuration of blade section structure

Table 2. Load cases for structural design

Load case	Case 1	Case 2	Case 3
Reference wind speed	12m/s	25m/s	55m/s
Gust condition ($\pm 20\text{m/s}$, $\pm 40^\circ$)	without gust	with gust	storm
Rotational speed	28.2rpm	46.9rpm	stop

본 연구에서 사용된 블레이드의 재료는 구조적 강도 및 피로 수명이 뛰어나고 비교적 저렴한 Glass/epoxy를 적용하였다. 블레이드의 스킨과 웹은 샌드위치 구조를 적용하여 좌굴에 안정하도록 설계하였고, 스파는 굽힘 하중을 담당하도록 설계하였다. 복합재료 설계 방법을 적용하여 초기 구조 설계 결과를 확인한 이후 구조 해석을 통해 설계를 개선하는 방법을 적용하였다 [4].

초기 구조 설계는 단순 설계 기법(Netting rule)을 적용하여 하중방향으로 적층된 섬유만이 그 하중을 담당한다는 가정으로 설계를 하였다. 이후 혼합 설계 방법(Rule of mixture)을 통해 설계를 보완하였다. 혼합 설계 방법은 복합재료 설계시 하중 방향과 다른 방향으로 적층된 섬유도 원래 강도의 10%가 하중 방향에 기여한다는 이론으로서 보다 경량화된 설계 개념이다. 초기 설계에서 결정된 0° 방향의 섬유에 $\pm 45^\circ$, 90° 방향 섬유를 보완하여 최종 설계 결과를 도출하였다.

블레이드 스킨과 웹은 전단하중과 좌굴에 안정성을 확보하기 위하여 샌드위치 구조로 적층하고, 스파는 주로 굽힘 하중을 담당하므로

0° , 90° 와 혼합 법칙을 적용하여 층간분리 현상이 나타나지 않도록 $\pm 45^\circ$ 를 배열하여 적층하였다. 이를 통해 설계된 최종적인 구조 설계 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Structure design results

Station (r/R)	Front Spar (plies)			Rear Spar (plies)		
	Skin	Spar	Web	Skin	Spar	Web
Root~0.1	Skin(20)/Spar(59)					
0.1~0.2	20	59	34	20	40	14
0.2~0.3	20	66	40	20	42	14
0.3~0.4	20	74	40	20	50	20
0.4~0.5	20	83	48	20	55	20
0.5~0.6	20	81	48	20	55	20
0.6~0.7	20	73	40	20	48	20
0.7~0.8	20	55	40	20	38	20
0.8~0.9	20	36	28	20	26	14
0.9~1.0	20	19	20	20	16	8

구조 설계 결과에 대한 구조 해석을 위해 본 연구에서는 유한 요소 상용 코드인 MSC. PATRAN/NASTRAN을 사용하였다. 원심 하중은 회전수를 적용하여 모사하였으며, 경계 조건은 블레이드 뿌리 부위 고정 경계 조건을 적용하였고, 길이방향으로 분포 하중을 적용하였다. 구조 해석은 응력, 변위, 좌굴 및 고유 진동수 해석을 통해 구조 설계 결과의 타당성을 제시하였다 [5].

본 연구에서는 대상 블레이드의 스킨과 웹에 적용된 샌드위치 구조에 대해서 재질을 각각 Urethane Foam과 Balsa를 적용하여 2가지 Case에 대해 비교, 분석하였다 [7]. Urethane Foam을 적용한 결과 블레이드의 선형 정적 해석 결과 스킨의 최대 인장 응력은 56.4MPa 이며, 압축 응력은 49.7MPa로 확인되었다. 스파 플렌지의 인장 응력은 81.5MPa, 압축 응력은 54.3MPa로 검토되었다. 변형 해석 결과는 2.94m로 블레이드의 끝단 부위에서 확인 되었으며 블레이드의 자중은 4.32ton으로 확인하였다. Balsa의 경우 전체적인 응력변화 및 변위는 크게 달라지지 않

았으나 자중이 5.04ton으로 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 대형 블레이드 경량화 설계 방안으로 Foam 재질을 사용하여 설계를 수행하였다. 미국 ETCGreen사의 UGE 1000H는 4.35ton으로 상용 블레이드에 비해 경량화된 것을 검토하였다.

Foam을 사용하여 블레이드의 전체 응력을 검토한 결과 충분한 안전율을 확보한 구조로 설계되었음을 확인하였다. 좌굴 해석 결과 1차 모드의 좌굴 하중 배수는 1.293이며 2차 모드는 4.098 로 안전한 것으로 검토 되었다. 고유 진동수 해석을 통해 Campbell 선도를 검토한 결과 공진에 대한 안전성이 확보된 것으로 확인되었다.

Fig. 6와 Fig. 7은 스킨의 응력 분포와 스파 플렌지의 응력 분포를 보여주고 있으며, Fig. 8는 블레이드의 변형율을 보여주고 있다. Fig. 9는 1차 좌굴 모드를 보여주고 있으며, Fig. 12는 고유진동수 해석을 통해 Campbell 선도를 검토한 결과이다.

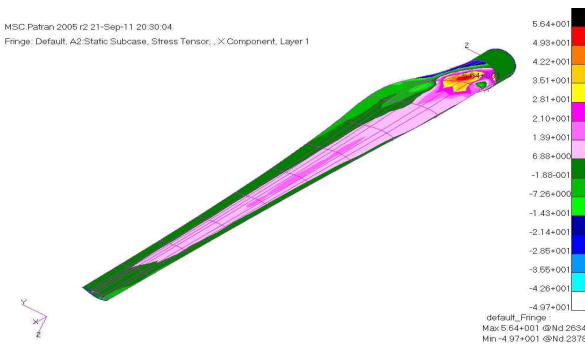


Fig. 6. Stress contour on skin of blade

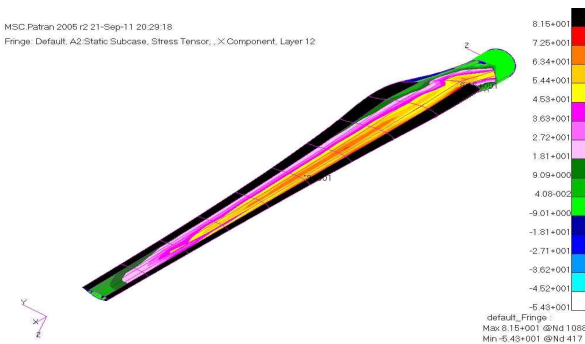


Fig. 7. Stress contour on spar flange of blade

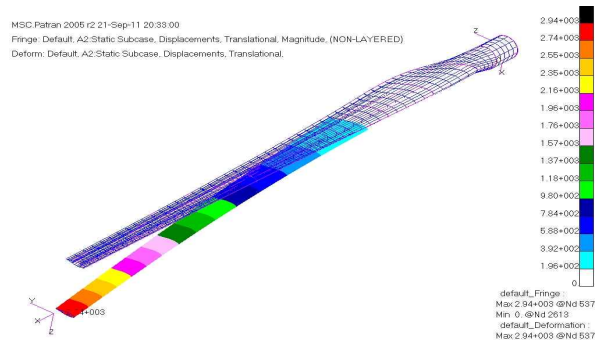


Fig. 8. Displacement of blade

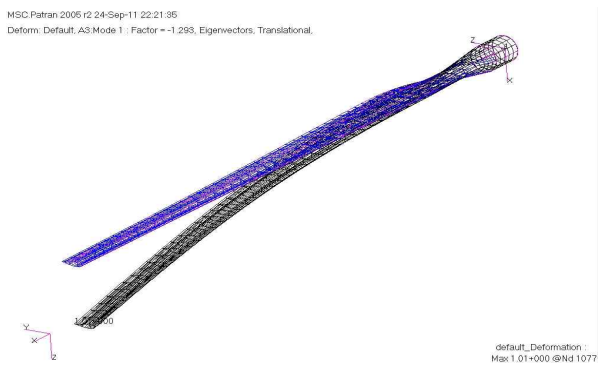


Fig. 9. First buckling mode shape and load factor

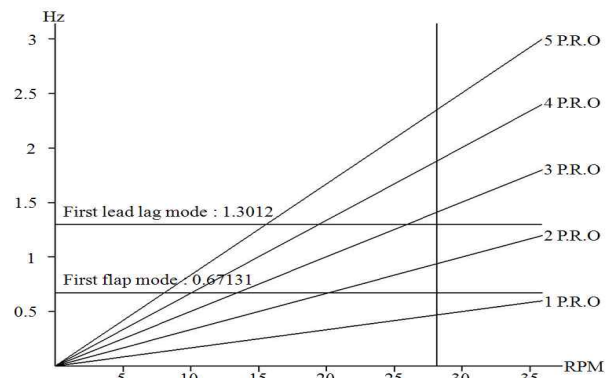


Fig. 12. Campbell diagram

4. 피로 수명 해석

피로 하중의 주요 요인은 블레이드의 회전축이 풍향과 항상 같은 방향을 유지하지 못하거나 풍속이 일정하지 않고 항상 변하며, 블레이드 회전에 따른 자중 변화 등에 기인한다. 또한 회전 날개의 피로수명에 영향을 주는 주기하중은 크게 시위에 수직인 하중과 시위방향의 하중은

로 구분할 수 있다. 정하중의 입장에서 회전 날개의 단면 형상을 고려해 보면, 시위에 수직한 하중이 주요 하중으로 작용하지만 피로하중의 입장에서 원형 단면인 허브를 고려하면, 시위방향의 하중 또한 중요한 하중이 된다. 따라서 본 연구에서의 주기 하중은 시위에 수직한 하중과 시위방향의 하중을 모두 고려하였다. 회전날개의 주기하중을 계산하기 위해서 Spera가 제시한 실험식을 사용하였다.

분석된 피로 수명 하중을 적용하여 구조 해석을 통해 피로 수명 안전성을 평가하였다. 하중은 Spera의 실험식에 의해 계산된 최대 피로하중을 공력해석에 의한 하중분포 곡선을 이용하여 회전날개의 길이방향으로 분포시켜 적용하였다. 피로 하중에 대한 응력 해석 결과 최대 압축 응력 73.1MPa, 최대 인장 응력 76.1MPa로서 허용 피로 강도 153.2MPa에 대해 충분한 안전율이 확보한 것을 확인하였다. 따라서 블레이드 설계 결과는 요구 피로 수명 20년을 확보한 구조물임을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 신재생에너지 연구의 활성화를 통해 피로수명을 고려한 블레이드 설계 방안을 정립하기 위하여 대형급 블레이드의 구조 설계를 수행하였다. 공력 설계 후 구조 설계 하중을 계산 하였으며 구조 형상은 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하였다. 최적 형상을 선정하기 위해 폼 샌드위치구조와 발사 샌드위치 구조를 비교 분석한 결과 유사한 응력 분포에서 보다 경량화된 구조설계 결과를 제시할 수 있는 폼 샌드위치 구조를 선정하였다. 구조 설계 결과의 안전성을 검토하기 위하여 유한요소 해석을 통해 구조 해석 결과를 검토하여 설계 요구 조건을 만족하는 구조 설계 결과임을 확인하였다. 본 연구에서는 S-N 선형 손상 이론, Goodman 선도, Spera의 실험식 등에 의해 20년 이상 운용 가능한 블레이드 구조 설계 결

과를 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] Gourieres, D. L., 1985, "Wind Power Plants", Pergamon Press.
- [2] Frank, B. et al., 2001, "Wind Turbine Airfoil Catalogue", Riso Natational Laboratory.
- [3] Changduk Kong, 2001, "A Study on Structural Design of Medium Scale Composite Wind Turbine Blade", Osaka Prefecture University.
- [4] 공창덕, 최수현, 박현범, 2009, "고효율 복합재 블레이드를 사용한 500W급 풍력터빈에 관한 연구", 한국항공우주학회지 2009년도 추계 학술발표대회 논문집, pp. 201-208.
- [5] 공창덕, 박현범, 김주일, 2007, "경량화 복합재 위그선의 주익 및 수평 미익 구조 설계 및 해석에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제35권, 제2호, 2007, pp. 149-156.