

750kW 급 풍력발전기용 복합재 블레이드의 구조설계

정창규* · 박선호* · 한경섭**

Structural Design of a 750kW Composite Wind Turbine Blade

C.K. Jung, S.H. Park and K.S. Han

Key Words : Structural Design, Finite Element Method, Wind Turbine Blade

ABSTRACT

A GFRP based composite blade was developed for a 750kW wind energy conversion system of type class I. The blade sectional geometry was designed to have a general shell-spar structure. The load cases specified in the IEC61400-1 international specification were considered. For withstanding all relevant extreme loads, the structural analysis for the complete blade was performed using a commercial FEM code. The static load carrying capacity, buckling stability, blade tip deflection and natural frequencies at various rotational speeds were evaluated to satisfy the strength requirements in accordance with the IEC61400-1 and GL Regulations. For designing a lightweight blade, the thickness and the lay-up pattern of the skin-foam sandwich structures were optimized iteratively using the DOT program. T-bolts were used for joining the blade root and the hub, which were modeled using a 3D FE volume model. In order to confirm the safety of the root connection, the static stresses of the thick root laminate and the steel bolts were predicted by taking account of the bolt pretension and the root bending moments. The calculated stresses were compared with the material strengths.

1. 서론

풍력발전기용 블레이드의 재료는 초기에 금속이나 목재를 주로 사용하였던 것에 비해, 최근에는 대형화로 인해 경량화가 절실히 요청되므로 복합재료가 주 구조재료로 사용되고 있다. 블레이드에는 나무복합재(Wood Composites), 유리섬유복합재(Glass Fiber Reinforced Plastics), 탄소섬유복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics)가 주로 사용된다. 나무복합재는 소형 풍력블레이드에 주로 사용되며, 탄소섬유복합재는 우수한 물성을 갖고 있으므로 대형화, 경량화에 가장 적합한 재료이나 높은 가격으로 인해 수 MW 이상의 블레이드에 나무나 유리섬유 복합재료와 같이 조합하여 제한적으로 사용되고 있다. 현재에는 유리섬유복합재를 주로

사용한 블레이드가 가장 일반적인 추세이다. 풍력 블레이드의 구조도 많은 변화를 거쳐 발전되어 왔다. 초기에는 항공기용 날개에 사용된 구조를 차용하여 사용했으나, 현재는 shell-spar 구조가 가장 일반적이다.

풍력발전용 블레이드의 수명은 통상 20~30년 정도이고 회전중에는 원심력 및 바람의 항력(Drag)이 작용하므로 풍속에 따른 지속적인 정하중이 작용하게 된다. 또한 블레이드는 급습성이 있으므로 풍속의 변화와 요잉등의 움직임에 따라 진동이 발생하게 되고 이 진동은 블레이드의 고유진동수에 따라 진폭이 감소되거나 증폭되게 된다. 따라서 블레이드가 구조적 안정성을 가지기 위해서는 정하중 특성과 동특성을 고려한 구조설계가 필요하다[1]. 또한 블레이드와 허브의 연결부위는 블레이드에 가해지는 모든 하중을 허브에 전달하

는 역할을 한다. 일반적으로 금속재료의 체결체를 사용하는데, 복합재료와 금속의 상대적인 강성의 차이로 변형이 균일하게 일어나지 않는다. 따라서 이 부분에서 응력집중이 일어날 수 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 750kW 급 유리섬유 복합재 블레이드의 구조해석과 설계를 위해, 상용유한요소 패키지를 사용하여 극한 하중에 대한 응력해석, 고유진동수해석 및 좌굴해석을 수행하였다. 경량화 설계를 위해 각 부분의 샌드위치 재료의 구성과 두께를 변화시키면서 응력해석을 수행하여 최적의 재료 배치를 계산하였다. 블레이드와 허브 연결부위의 응력을 평가하기 위해 3D volume 요소를 사용한 모델을 사용하여 연결부의 안전성을 평가하였다.

2. 블레이드 구조

2.1 구조설계 제한조건

IEC61400-1 규격 및 이에 준하는 GL 인증규격에 따라 풍력발전시스템은 설계 풍속에 따라 5 개의 클래스로 구분된다. 본 연구의 대상인 블레이드는 클래스 1 에 속하며 최대설계 풍속이 70m/s 로 규정되어있다[2].

2.2 기본구조 및 재료물성

전형적인 풍력발전용 블레이드의 기본 단면 구조는 Fig.1 과 같이 표피(skin), 스파(spar), 웹(web) 으로 이루어져 있다. 표피는 전체 공력형상을 유지하며 비틀림과 전단력을 받는다. 구성재료는 biaxial fabric/foam 샌드위치 구조를 사용한다. 스파는 대부분의 굽힘하중을 받으며 두꺼운 UD(uni-directional)를 사용한 거더(girder)와 biaxial/foam 샌드위치를 사용한 웹(web)으로 구성된다. 허브와 블레이드를 연결하는 뿌리(root) 부분은 triaxial (UD/biaxial)을 사용한다. 블레이드에 사용되는 복합재는 Glass/Epoxy 재료의 일방향과 45° 직조 프리프 레그가 있으며 샌드위치재료의 내부에 들어가는

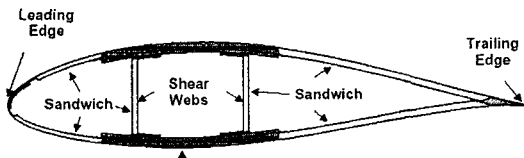


Fig. 1 Typical configuration of wind turbine blade

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

Table 1 Material properties

	UD drenreg	Biaxial drenreg	PUR foam
E ₁ (MPa)	41600	22000	70
E ₂ (MPa)	7300	22000	70
v	0.3	0.3	0.2
G ₁₂ (MPa)	4000	5500	19
ρ(kg/m ³)	1768	1518	119
S _L (MPa)	959	401	-
ε _L (%)	2.15	2.12	-

Foam 으로는 PVC 나 PU(polyurethane)를 주로 사용한다. 여기서는 PU 를 사용하였으며, 해석에 사용된 각 재료의 물성은 Table 1 과 같다.

3. 블레이드 구조해석

3.1 유한요소 모델

유한요소 프로그램은 모델링에 Ideas, 해석과 post-processing 에 ABAQUS 을 사용하였다. 요소는 5600 개의 S4 shell element 를 사용하였다. 재료 두께의 변화를 주기위해 블레이드 길이방향으로 33 개의 요소그룹과 코드(chord)방향으로 3 개의 요소 그룹으로 나누었다. 기본적으로 루트(root)가 가장 두껍고 끝단으로 갈수록 감소하는 분포이다. 블레이드 전체 무게는 약 1900kg 이다.

3.2 정적해석

정적해석에 사용한 풍속은 정상운행상태에서 풍속이 10m/s, 25m/s 일때와 50년 극한돌풍(70m/s) 세 가지를 고려하였다. 하중에 대한 안전계수와 재료에 대한 안전계수는 각각 1.35, 2.70 을 사용하였다[3]. 각각의 공력하중을 적용하여 블레이드 끝단의 변형과 최대응력을 해석하여 Table 2 에 나타냈다. Fig. 2 와 Fig. 3 은 50년 극한돌풍일때의 스킨과 웹의 응력해석 결과이다. 블레이드 끝단의 변형은 모든 경우에 있어서 설계 제한조건을 만족하였다. 최대응력은 스킨에서 나타나며 블레이드 길이방향으로는 가운데 부분이다. 스킨의 허용응력은 148Mpa 이므로 해석된 응력과 비교하여 안전함을 확인하였다. 웹에서는 웹과 스킨의 연결부에서 최대응력이 나타났으며 허용응력과 비교해서 안전한 것으로 해석되었다.

Table 2 Flapwise deflection and maximum stress/strain

Wind Speed[m/s]	Deflection[m]	Max. Stress[Mpa]
10	1.45	41.6/-33.8
25	1.30	38.3/-32.6
70	2.14	82.1/-79.7

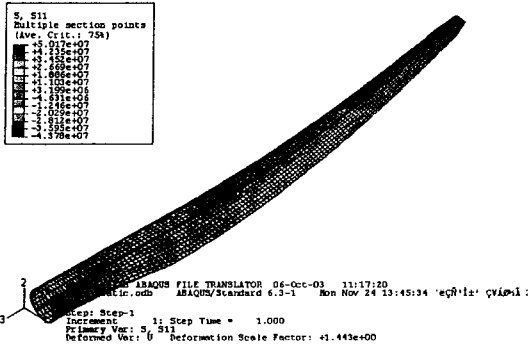


Fig. 2 Stress contour for 70m/s wind (skin)

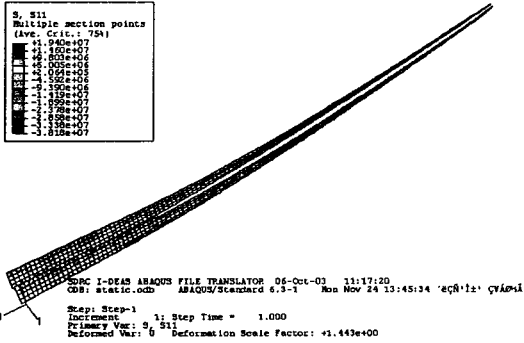


Fig. 3 Stress contour for 70m/s wind (web)

3.3 고유진동수해석

블레이드는 wind shear, 타워의 영향 및 풍속의 변화 등에 따라 진동을 하게 되므로 공진을 피하도록 설계되어야 한다. 또한 운용 중 각기 다른 회전수에 따라 고유진동수가 달라지므로 블레이드의 회전수에 따른 고유진동수의 변화를 해석하였다. Lead-lag 와 Flapwise 1 차 고유진동수는 각각 3.9Hz 와 2.4Hz 이다.

회전하는 블레이드에 대해서 가진 주파수(excitation frequency)는 회전주기의 정수비의 형태로 발생한다[1]. Fig. 4 는 회전수에 따른 고유진동수 변화를 campbell 선도로 표시한 것이다. 블레이드가 3 개이기 때문에 1P, 3P, 6P 가 중요한 가진 주파수이다. 공진을 방지하기 위해서는 Flapwise1 차 고유진동수가 공칭회전수(nominal rpm)인 25rpm 에서 3P 와 +-10% 이상 차이가 나야한다. 그림에서 보듯이 운용구간에서 공진가능성은 없는 것으로 확인되었다.

3.4 좌굴해석

구조물의 파괴응력보다 낮은 응력상태에서 발생하는 국부좌굴문제는 구조물의 안전성 계산에 반드시 검토되어야 한다[4]. 앞서 선형 해석에 사용된 세가지 풍속 조건중에서 가장 하중이 크게

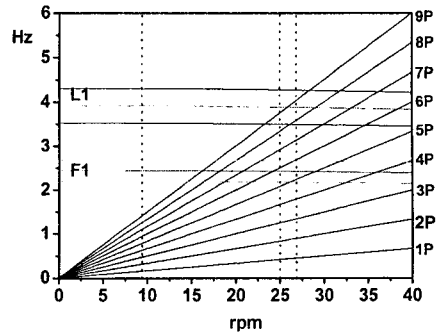


Fig. 4 Campbell diagram

작용하는 50 년 극한풍속에 해당하는 하중을 기준으로 비선형 좌굴해석을 수행하였다. 처음 세 개의 고유값(buckling load factor)은 1.47, 1.48, 1.50 으로 나타났다. 좌굴은 루트로부터 각각 19m,7m,13m 떨어진 부분에서 가운데 스킨에서 일어났다. 선형 응력해석 결과에서 보듯이 이 부분이 굽힘에 의해 압축응력이 최대가 되는 위치이므로 좌굴에 가장 취약한 것으로 판단된다.

4. Root 연결부 해석

4.1 기본구조

Fig. 5 는 T-bolt(cross-bolt) 연결부의 기본구조를 보여준다. T-bolt 는 복합재 블레이드와 피치베어링을 연결하는 부위로서 블레이드에 작용하는 공력 하중, 원심하중, 자중을 견디도록 설계되어야 한다. 연결부는 복합재료인 블레이드 루트 적층판, transverse bolt, expansion bolt, 피치 베어링으로 구성된다. 블레이드에 작용되는 하중은 laminate 와 transverse bolt 의 접촉에 의해 허브의 피치 베어링까지 전달된다. 주요 하중은 결합력을 의한 볼트의 pre-tension 과 공력에 의한 모멘트와 축하중이다[5]. root laminate 의 두께는 75mm, transverse bolt 의 지름은 58mm, expansion bolt 의 지름은 27mm 로 하였다. 총 볼트의 개수는 40 개를 사용하였고 bolt circle 지름은 1.25m 이다.

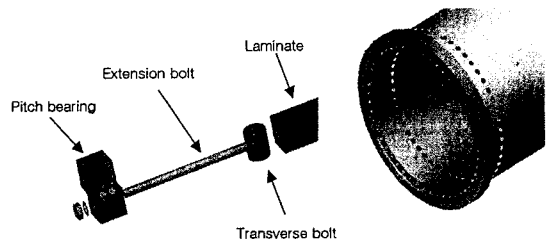


Fig. 5 Composition of T-bolt connection

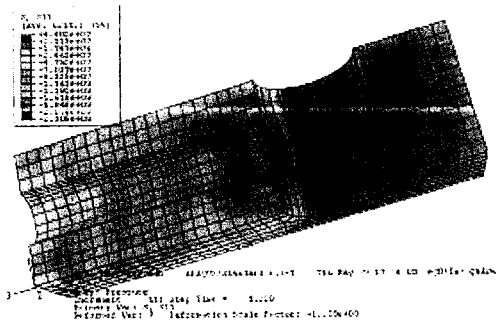


Fig. 6 Stress contour of root laminate

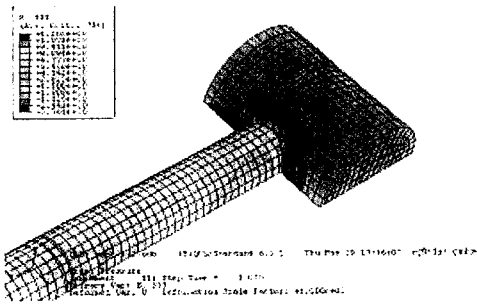


Fig. 7 Stress contour of T-bolt

4.2 유한요소해석

Fig.6 과 7 은 50 년 극한돌풍 조건에서의 root laminate 와 체결볼트의 응력 분포를 보여준다. laminate 에서는 볼트의 체결력을 위한 pre-tension 의 영향으로 압축응력이 많은 부분을 차지하고 있다. transverse bolt 와 직접 접촉하는 가운데 부분에서 가장 큰 압축응력이 걸리는 것을 알 수 있다. transverse bolt 를 지나서는 외부하중에 의한 인장응력이 걸리고 있다. 체결볼트에서는 expansion bolt 에서는 인장응력이 나타나고, transverse bolt 압축응력이 걸리는 것을 알 수 있다. transverse bolt 는 expansion bolt 로 인해 bending 이 일어나므로 laminate 와의 접촉 압력이 볼트의 나사산 주위에 집중되어있다. expansion bolt 가 삽입되는 hole 은 지름이 30mm 로 bolt 의 지름보다 크게 되어있으므로 그 부분에서는 laminate 와 접촉을 하지 않으므로 인장응력이 나타난다. Table 3 는 root laminate 와 볼트에 걸리는 응력과 각각의 강도를 나타낸 것이다. 볼트의 강도는 Cr-Mo high strength bolt 를 기준으로 했다. Table 3 에서 볼 때 50 년 극한 돌풍 조건에서 laminate 와 체결 볼트가 재료의 강도와 비교해 안전한 것으로 나타났다.

Table 3 Maximum stress and strength of T-bolt connection

	Max. Stress[Mpa]	Strength [Mpa]	S.F.
Root Laminate	44/-230	690/900	6.5
Bolts	809/-376	1040	1.3

5. 결론

본 연구에서는 750kW 급 풍력발전기용 블레이드의 구조설계를 위한 설계절차를 제시하였다. IEC WECS type class I 에 따른 하중조건을 적용한 유한요소 모델을 사용하여, 선형 정적해석, 고유진동수 해석 및 좌굴 해석을 수행하여 구조적 안정성을 검토하였다. 경량화 설계를 위해 각각 다른 재료의 두께분포와 laminate 구성에 대해 응력분포를 해석하여 최적의 재료배치를 계산하였다.

블레이드와 허브의 연결부인 T-bolt joint 에 대한 응력해석을 통하여 root laminate 와 bolt 의 접촉에 의한 응력집중을 검토하였다. 극한 하중에서의 응력과 root laminate 와 bolt 의 재료강도를 비교하여 체결부의 안전성을 평가하였다.

후기

이 연구는 에너지관리공단과 (주)유니슨의 위탁 연구영역에 의해서 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Ladean R. McKittrick, Douglas S. Cairns, P.I. John Mandell, David C. Combs, Donald A. Rabern and R. Daniel VanLuchene, "Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using Finite Element Model", SAND2001-1441, 2001
- (2) IEC Standard 61400-1 Part I: Safety Requirements, 1999
- (3) Germanischer Lloyd, Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems, 1999
- (4) 이충훈, 박진무, 홍순곤, 박지상, 김태욱, "풍력발전기용 대형 복합재 블레이드에 대한 구조해석 및 사이징에 관한 연구", 한국복합재료학회 추계학회논문집, 2002
- (5) R. Osthorst, R.Fuhrhoff and R.Kortemkamp, "Measurements and Calculations with the Aim of Optimizing the T-bolt Blade-Connection Joint", Technical Report, Aerodyn, 2002