

풍력발전기용 대형 복합재 블레이드에 대한 구조 해석 및 사이징에 관한 연구

이충훈* · 박진무* · 홍순곤** · 박지상** · 김태욱**

Stress Analysis and Sizing for a Glass/Epoxy Composite Wind Turbine Blade

Choong-Hun Lee, Jin Moo Park, Soon-Gon Hong, Ji-Sang Park, Tae-Wook Kim

Key Words : Composite Wind Turbine Blade, Stress Analysis, FEM

ABSTRACT

This paper presents a method and procedure for stress analysis and sizing in development of structures of a large composite wind turbine blade. Structural requirement of IEC standard was reviewed to set up appropriate analysis method and procedure. Several structural layouts were examined in a viewpoint of a large scale wind turbine blade. For the critical load cases, stress analysis were performed using finite element method. Stacking sequence and thickness of a laminate for each part and location were determined considering stress levels and producibility. Nonlinear geometric analysis was performed to check stability problem due to local buckling of a skin structures.

1. 서론

1872년에 최초의 풍력발전이 시작된 이후로 블레이드의 재료와 구조는 많은 변화를 거쳐 현대의 복합재료로 블레이드로 발전되어왔다[1]. 블레이드의 대형화는 설치되는 타워의 높이를 증가시키고 이는 블레이드가 더 큰 풍속에 노출되게 한다. 구조로서의 블레이드는 돌풍에 의한 큰 하중이 가해질 수 있고, 약 30년의 수명을 갖도록 하기 위해서 피로수명이 10^8 - 10^9 사이클 사이의 값을 갖도록 설계되어야 한다.

본 연구는, 현재 풍력 발전 시스템 국산화를 위해 개발중인 750kW 급 기어타입 풍력 발전 시스템에 적용 하기 위한 블레이드 설계 및 해석의 원천 기술을 획득하기 위해 수행되었다. 길이 25m의 유리섬유강화 복합재료 블레이드의 최적설계와

구조해석을 위하여 원소재의 선정, 적절한 복합재료 Lay-up 구성, 구조의 최적배치 및 설계, 국제인증을 획득할 수 있는 수준의 구조해석 기법을 개발하고 그 유효성을 입증하였다.

2. 복합재료 풍력발전 블레이드 설계

2.1 설계조건

본 연구에서는 IEC 클래스 I의 풍력발전 블레이드의 설계를 목표로 하고 있으므로 IEC(International Electrotechnical Commission)에서 규정하는 풍력발전 시스템 클래스와 하중조건들을 만족하는 설계를 하여야 한다. 하중조건은 풍력발전 시스템의 운용상태와 바람의 상태의 조합으로 결정되는 22가지의 상황이다. Table 1은 IEC에서 규정하는 풍력발전 시스템의 클래스 I을 나타낸 것이다[2].

* 고려대학교

** 한국 기계연구원

Table 1 Basic parameters for Wind Turbine Class

| WTGS Class I | V _{ref} | V _{ave} | A/ | | B/ | |
|--------------|------------------|------------------|-------|------|-------|------|
| | | | 15(-) | a(-) | 15(-) | a(-) |
| | | | 50 | 10 | 0.18 | 2 |

본 연구의 대상이 된 블레이드는 풍속 3m/s 에서 시동되고 25m/s 에서 정지되며 정격출력을 발생시키는 풍속은 12.7m/s 이다. 그러나 다양한 풍속 조건의 공력 하중을 고려 해야 한다. 또한 블레이드의 굽힘 모멘트와 비틀림 모멘트에 의해 발생하는 변형의 문제, 강도와 피로측면에서 블레이드의 안전 조건 그리고 발전 효율 등의 문제를 설계에 반영하여야 한다.

2.2 복합재료 블레이드의 사이징

750kW 급 복합재료 블레이드는 E-glass/Epoxy 프리프레그를 사용하여 제작될 예정이다. 그러나 기존의 프리프레그는 그 두께가 얇기 때문에 두께가 상당히 두꺼운 섬유체적율 45%인 UD 프리프레그를 사용할 예정이다. 또한 평직 프리프레그는 41%의 섬유체적율을 가진다. UD 복합재료와 달리 평직 복합재료는 그 물성값을 이론적으로 예측하기 힘들기 때문에 MXB(E-glass fabric) 7701/220(epoxy) 복합재료의 기본 물성 시험에서 구해진 물성값을 사용하여 해석을 수행하였다.

Table 2 는 해석에 사용된 각 재료의 물성값을 나타낸 것이다.

Table 2 Engineering constants of the composites

| | E ₁₁ | E ₂₂ (GPa) | G ₁₂ | S _L | S _T (MPa) | S _{LT} | ρ kg/m ³ |
|--------|-----------------|--------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|-----------------|------------------------|
| UD | 34.50 | 8.55 | 3.84 | 1025 | 57 | 96 | 1857 |
| Fabric | 20.3 | 19.9 | 11.4 | 341 | 336 | 165 | 1784 |
| Foam | 0.105 | 0.105 | 0.04 | 3.11 | | | 100 |

풍력발전용 복합재료 블레이드는 upper skin 과 lower skin, shear web 그리고 hub 연결부로 구성된다. Fig. 1 은 블레이드의 형상을 보여준다.

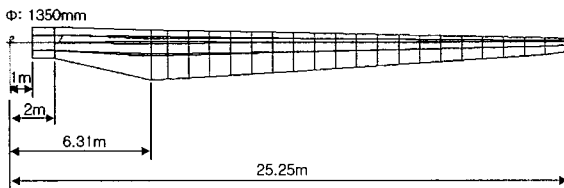


Fig.1 Planform of a 750kW class wind turbine blade

복합재료 블레이드에 사용된 lay-up 은 크게 foam 을 사용한 sandwich 적층판과 사용하지 않은 적층판의 두 가지로 나뉜다. 세부적으로는 블레이드의 각 부분이 감당해야 할 하중에 따라 Table 3

와 같이 서로 다른 10 가지의 lay-up 을 적용하였다.

블레이드의 길이방향(span 방향)을 0° 로 두고 전체적으로 가장 바깥에는 ±45°의 평직을 배치하여 비틀림에 저항하도록 하였다. Upper 와 lower skin 에서 shear web 사이의 부분은 두 번째 층인 0° 층은 블레이드가 받는 벤딩 모멘트를 감당하기 위해 블레이드의 안쪽으로 갈수록 두껍게 설계하고 내부에는 평직을 0°, 90°가 되게 배치하였다. Shear web 사이를 제외한 나머지 skin 에는 좌굴이 일어나지 않도록 foam 을 삽입하였다. Shear web 에도 관성모멘트를 증가시키기 위하여 foam 을 사용하였다. 이러한 lay-up 설계는 Linear static analysis 를 수행한 후 그 결과를 검토하여 각 부분에서 필요로 하는 강성을 보강시켜 다시 해석하는 과정을 반복하면서 최적의 lay-up 을 만들어간다.

Table 3 Lay-up Pattern & Thickness

| Lay-up | Thickness (mm) | | | |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|----|--------|------|
| | ±45° | 0° | 0°/90° | Foam |
| [(±45°) _F /0°/(0°,90°) _F] _S | 2 | 4 | 2 | |
| | 2 | 6 | 2 | |
| | 2 | 14 | 2 | |
| | 2 | 20 | 2 | |
| | 2 | 26 | 2 | |
| | 2 | 30 | 2 | |
| | 2 | 36 | 2 | |
| [(45°) _F /0°/(0°,90°) _F /Foam] _S | 2 | 3 | 2 | 20 |
| | 2 | 8 | 2 | 20 |
| | 4 | 6 | 2 | 20 |

3. 구조 해석

3.1 FEM 모델

구조해석을 위해 5251 개의 element 와 5028 개의 node 로 FE Model 을 형성하였다. 또한 element type 은 4 - node S4 3D shell element 를 사용하였다.

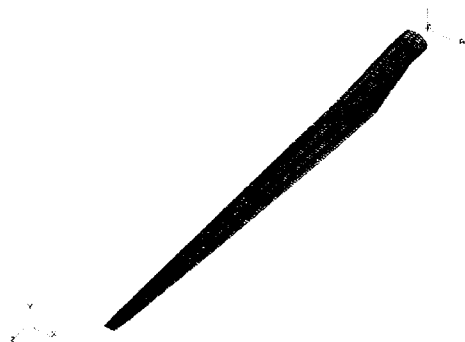


Fig. 2 FE model of a 750kW class wind turbine blade

3.2 선형 해석

해석에 사용된 풍속은 3 가지로 블레이드가 정상 운용되는 12.7m/s, 운용을 정지하기 시작하는 25m/s, 클래스 I 의 블레이드가 받을 수 있는 가장 센 바람인 70m/s 의 경우를 고려하였다. Table 4 에 세 가지 상황에서의 블레이드 상태를 나타내었다. 70m/s 의 풍속은 풍력 발전기 운행에 있어 극한의 상황에 해당하며, 블레이드 각 부위가 극한하중에서 충분한 강도를 가지는지를 점검하기 위한 조건이다.

Table 4 Wind turbine situations of wind speed

| Wind Speed | Pitch angle | RPM |
|------------|-------------|------|
| 12.7m/s | 1° | 26 |
| 25m/s | 15.5° | 32 |
| 70m/s | 0° | 53.2 |

각각의 풍속과 조건에 따른 하중을 FE model 에 적용하였으며 Pre/Post processor 와 Solver 는 MSC PATRAN 과 ABAQUS 를 사용하였다.

블레이드 각 부분의 응력상태를 보면 upper, lower skin 에는 0° 층의 응력이, shear web 에서는 ± 45° 층의 응력이 가장 높다. 이는 하중이 가해졌을 때 upper 와 lower skin 에는 굽힘 모멘트에 의한 압축응력, 인장응력이 그리고 shear web 에는 전단하중에 의한 전단응력이 주로 작용하기 때문이다.

Table 5 는 normal force 에 의한 굽힘 모멘트의 발생으로 큰 하중이 작용하는 블레이드 길이방향 0°층의 수직응력 σ_y 과 끝단에서의 변위를 나타낸다. Table 5 에서 25m/s 의 경우가 12.7m/s 보다 변위와 응력이 작은 이유는 25m/s 에서의 하중이 블레이드 root 로부터 끝단 방향으로 길이의 약 45% 위치에서 최대하중을 받다가 85%위치에서 압축으로 바뀌면서 하중이 줄어들지만 12.7m/s 에서는 약 80% 부근에서 최대하중이 되어 더 큰 굽힘 하중이 발생하기 때문이다.

Table 5 Displacement & Stress distribution

| | displacement | Max stress | Min stress |
|---------|--------------|------------|------------|
| 12.7m/s | 791mm | 29 MPa | -30MPa |
| 25m/s | 188mm | 22 MPa | -16MPa |
| 70m/s | 11313mm | 544MPa | -414MPa |

정상 운용 상태에서의 응력 수준을 보면, Table2 의 UD 층의 섬유방향 강도의 25% 값인 256.25MPa 을 endurance limit 로 볼 때, Table5 의 12.7m/s 와 25m/s 의 최대응력이 이 값의 11.3%와 8.59%에 불과하다. 이는 endurance limit 내에

12.7m/s 와 25m/s 의 하중에 의한 응력이 존재하므로 블레이드는 정상운용조건에서 발생하는 피로하중에 충분히 안전하다고 할 수 있다. 또한 70m/s 의 극한 하중에 대한 응력수준 역시 극한하중의 53% 정도이다. 이를 안전경계계수(margin of safety)에 대하여 고려하면 0.884 값을 가지므로 블레이드가 70m/s 의 하중에 대해서 안전하다고 판단할 수 있다.

블레이드의 중량은 2519.276 kg 이며 무게 중심은 원점에서(265.18, 46.928, 8.902.927)이며 회전 중심에 대한 관성 모멘트는 $I(XX)=2.89E+11 \text{ mm}^4$, $I(YY)=2.89E+11 \text{ mm}^4$, $I(ZZ)=9.15E+08 \text{ mm}^4$ 이다.

Fig.3 에서의 응력 분포를 보면 블레이드 끝 단에는 아주 작은 응력이 발생하고 root 쪽으로 가면서 조금씩 증가하여 400MPa 까지 증가하다가 특정 지점에서 다시 낮아지는 형태의 응력분포가 반복된다. 이는 블레이드의 끝 단에서 root 쪽으로 갈수록 높아지는 인장, 압축응력에 대응하여 skin 의 0°층의 두께를 늘려가도록 하였기 때문이다. 이와 같은 이유로 Fig.4 에 보이는 shear web 의 45° 층의 두께도 두 가지로 설계되어있다. 블레이드 전체의 응력을 동일하게 설계할 수도 있으나 대형 구조물로서의 제작성을 고려하여 적당한 응력 수준 이내에 들도록 설계하는 것이 바람직하다. Root 부가 시작되는 부분에는 복잡한 응력 fringe 를 보인다. 이는 그 부분에서 급격하게 변하는 형상과 shear web 의 끝부분이 미치는 영향 때문이다.

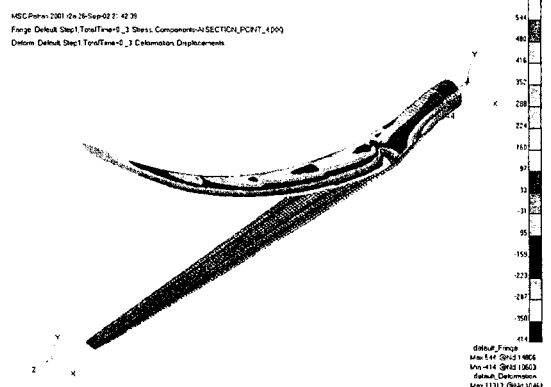


Fig. 3 Deformed shape & stress distribution of blade under 70m/s aerodynamic load(0°layer, σ_{xx}).

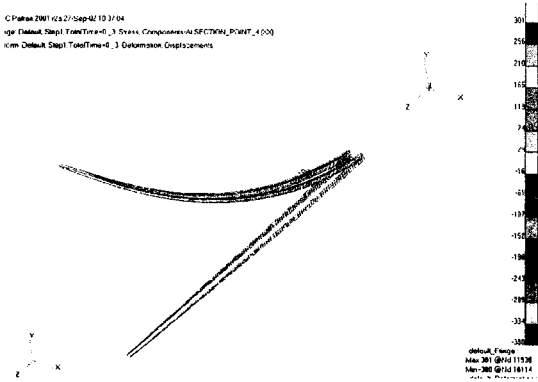


Fig. 4 Deformed shape & stress distribution of shear web under 70m/s aerodynamic load(± 45 layer, σ_{xy}).

3.2 국부 좌굴 해석(Local buckling analysis)

항공기의 날개나 블레이드와 같은 구조물의 upper skin 에 대해서는 국부 좌굴에 대한 고려가 필수적이다. 선형 해석으로는 국부 좌굴 하중 및 좌굴모드의 예측이 곤란하며, 좌굴후 하중감당 능력에 대한 고려도 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 비선형 해석을 수행하여 국부 좌굴 현상을 점검하였다.

좌굴해석의 결과 root 부에서 좌굴이 발생했는데 그 이유는 이 부분에 가장 큰 압축 응력이 작용할 뿐만 아니라 앞 절의 선형해석 결과에도 언급한 바와 같이 형상의 변화와 shear web 의 영향에 의해 skin 에 단순 압축하중 외에 굽힘 하중이 함께 작용하기 때문이다. Fig. 5 은 upper skin 과 root 연결부에서 국부 좌굴이 발생한 후의 상태를 보여주고 있다.

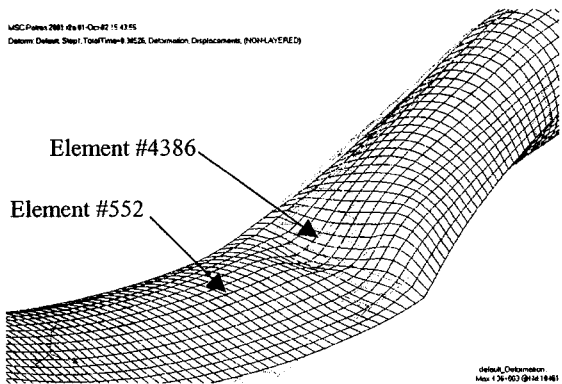


Fig. 5 Buckled shape(3 times magnified)

Fig.6 은 좌굴이 발생한 지점의 element #4386 과 발생하지 않은 element #552 의 upper 와 lower 0°층

의 거동을 하중의 증가에 따라 나타낸 것이다.

비선형 해석결과, 하중이 극한하중의 38.5%에 도달할 때 음의 eigenvalue 값을 보이며 좌굴이 일어났음이 나타났다. 또한 element #4386 의 그래프에서 두 선이 국부 좌굴이 발생하기 전에 벌어지는 것은 국부 좌굴이 발생하는 위치에 굽힘 하중이 초기부터 작용하여 하중이 증가함에 따라 그 영향이 커지기 때문이다. 따라서 좌굴을 방지하기 위해 이 부분에 foam 을 넣어서 굽힘 강성을 높여 주거나 shear web 의 길이의 변화나 추가와 같은 구조적인 보안을 통해서 구조 전체의 중량을 증가시키지 않고 국부 좌굴을 억제 할 수 있다. 그러나 이 부분에서 발생한 응력은 강도에 비해 대단히 낮으므로 0°층의 두께를 증가시키는 것은 중량의 증가를 초래하며, 제작의 간결성, 편리성 등을 고려할 때 무시 할 수 있다.

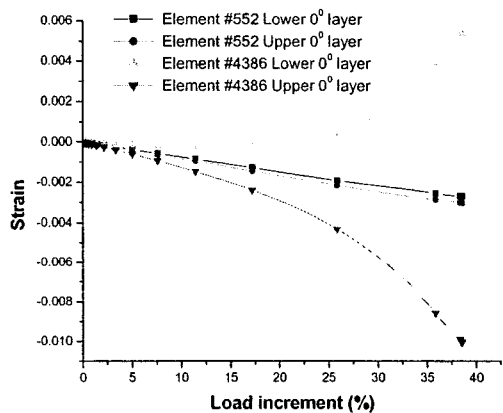


Fig.6 Local buckling at 70m/s

4. 결론

본 연구는 IEC 규정에 의거하여 작용하중 및 제반 조건을 결정하였으며, 12.7m/s, 25m/s, 70m/s 의 공력하중에 대하여 선형 및 비선형 해석을 수행하였다. Lay-up pattern 의 선정은 선형 해석을 이용 각각의 lay-up pattern 의 거동된 상태 비교를 통하여 이루어 졌으며, 12.7m/s 와 25 m/s 에 대한 응력 결과 및 70m/s 에 대한 응력 결과를 각각 피로의 관점과 안전경계계수(margin of safety)의 관점에서 검토하여 블레이드의 안전성을 검토하였다. 또한 비선형 해석을 통하여 국부 좌굴후 하중 감당 능력을 판단하였다.

위의 결과를 이용하여 축소시제 도면을 도출하

었다. 그러나 본 논문의 lay-up pattern 은 over desing 되어 있는 상태이며, 22 가지 하중조건 중 3 가지의 하중 조건에 대한 해석결과를 이용한 것이다. 그러므로 차후 나머지 19 가지의 하중 조건 및 축소시제 실험의 진행을 통하여 얻어진 결과를 상세 비교하여 lay-up pattern 의 최적화와 중량의 경량화를 도출하고 이 결과를 다시 설계에 적용하여 최적의 블레이드를 얻고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지 관리공단의 ‘750kW 급 Gearless type 풍력발전 시스템 개발’의 일환으로 수행된 연구임

참고문헌

- (1) 최재승, 김규홍, 이경태, “한국형 풍력터빈의 요구조건 검토” *한국항공우주학회지*, Vol. 30, No. 1, 2002, pp. 165-172.
- (2) IEC International Standard 61400-1 Part 1: Safety Requirements, 1999, pp. 19-41.
- (3)W.C. de Goeij, M.J.L. van Tooren, A. Beukers, Implementation of bending-torsion coupling in the design of a wind-turbine rotor-blade: *Applied Energy* 63(1999) 191-207.
- (4) M.E. Bechly and P.D. Clausen, Structural design of a composite wind turbine blade using finite element analysis: *Computers & Structures* Vol.63, No.3, pp.639-646.1997
- (5)S.M. Habali, I.A.Saleh, Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics, Part I: Desing of the blade and root: *Energy Conversion & Management* 41(2000)249-280
- (6)Ladean R.Mckittrick, Douglas S. Cairns etc., Analysis of a Composite Blade Desing for the AOC 15/50 Wind Turbine Using a Finite Element Model: SAND2001-1441 Unlimited Release May 2001