

풍력 블레이드의 전단 웹 모양의 최적화를 위한 구조 해석에 대한 연구

김진명^{1*} · 송성일²

¹서울과학기술대학교 기계공학과, ²서울과학기술대학교 기계공학과

초록

In this paper, a study was conducted for the optimization through shear web of shape the Edison program in wind power blade. We measured the displacement and stress distribution through two optimization methods to select the model with the smallest displacement and stress values. Before running the analysis, We try to find the inflection point through the shear web of the model and then analyze by introducing the geometric nonlinearity. The first optimization variables are introduced by the pitch angle and three web shapes. Third model such a honeycomb structure is good way to get an advantage for bending test. According to a method of previous optimization, third model is chosen and then the thickness of the web and blade as a variable is introduced, it is extracted as a result of displacement and the maximum stress per mass.

Keywords : Wind Turbine Blade, Blade elementary theory, Shear web

1. 서론

최근에 기후 변화 협약 등으로 신 재생 에너지와 친환경 에너지는 중요성이 재인식 되었고, 화석 에너지의 소비에 따라 환경 파괴에 대한 문제를 해결 할 수 있는 대체 에너지원으로 평가받고 있다.

EWEA(유럽 풍력 에너지 협회)의 친환경 에너지 중에서 풍력 발전의 연구가 증가되고 있으며 1980년부터 발전기의 용량 증대를 위해서 Wind Turbine Blade의 길이가 증가되고 있는 것을 보여주고 있다. Wind Turbine Blade의 반경의 크기가 커짐에 따라 질량이 증가되고 이에 따라서 생기는 문제를 줄이기 위해 Blade의 경량화를 추구하고 있다. 그에 따라서 Wind Turbine Blade의 질량 최적화에 따른 높은 강도, 강성 및 진동 등에 우수한 특성을 가진 복합재료를 사용을 요구하고 있다.

과거에는 나무나 금속재료인 철이나 알루미늄 등이 주로 사용되었지만, 최근에 사용되고 있는 대표적인 복합재료는 Glass Fiber reinforced Polyester/ Vinylester, Glass Reinforced Epoxy 또는 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 등이 사용된다.

이처럼 복합재료를 이용한 구조해석을 실시 하여 Blade를

다양한 부위에 적용되며, 안정성 해석을 위해서 굽힘 및 좌굴 해석(Bending and Buckling Test) 및 pitch각을 고려한 진동해석, 피로 해석(Fatigue Test) 등이 적용 되었다.

본 연구에서는 Edison Software를 이용하여 5000kW급의 반경 64m인 풍력 발전기의 Wind Turbine Blade의 유한요소모델(FEM)의 해석을 실시하였으며, 복합재료는 이방성의 특성을 가지지만 본 연구에서는 Edison Software를 이용하여 등방성 재료를 주로 사용하였다. 등방성 재료들은 과거에 사용하였던, 철과 알루미늄의 재료이며 이것을 통하여 정적 해석을 시행하였다.

Turbine Blade의 Web의 형상 및 두께를 IEC61400 - 1에서의 Blade 구조 시험 기준 풍속에 따라서 굽힘 시험(Bending Test)를 통해 Web 구조의 최적화를 소개하고자 한다.

2. 정적 구조 해석

Wind Turbine Blade의 설계를 위해서 IEC61400 에서의 Blade 구조 시험 기준 풍속에 따라서 정적 구조 해석을 위한 설계를 하고자 한다.

본 연구에서는 EWEA(유럽 풍력 에너지 협회)의 2005년 도에 사용한 모델을 중심으로 구조 설계를 진행하고자 한다. Fig. 1에 따라서 길이 L은 64m로 설정하였고, 지상에서부터 터빈 허브(Hub) 까지의 높이를 114m로 설정하여 전체적인 구조의 틀을 만들었다.

2.1 Wind Shear law 이론

본 연구에서는 Wind Turbine Blade에 걸리는 강한 풍 하중은 Blade의 끝 부분에 모멘트가 가해지면서 일정 하중 이상으로 모멘트가 가해진다. 이 때문에 Wind Turbine의 작동을 막는 현상이 일어나게 되는데, 이 문제를 최소화하기 위해서 풍 하중이 가장 크게 적용되는 부분의 해석을 시도하여 최적화된 Web구조를 얻으려고 한다.

일반적으로 풍속은 지면에서부터 고도가 높아짐에 따라 더 빠른 속도를 가진다. 또한 Wind Turbine Blade는 회전하기 때문에, 연속적인 고도의 변화와 그에 따른 풍속의 변화를 Wind Shear law를 이용하여 높이와 풍속의 관계를 도출하고, 그에 따른 식은 다음과 같이 표현된다.

Table 1 Velocity parameter for wind turbine class

	A	B	C	D	S
V_{ref}	50	42.5	37.5	30	Value to be specified by the designer
V_{ave}	10	8.5	7.5	6	
A /15(-)	0.18	0.18	0.18	0.18	
A(-)	2	2	2	2	
B / 15(-)	0.16	0.16	0.16	0.16	
A(-)	3	3	3	3	

$$u_o = u_i \left(\frac{h_o}{h_i} \right)^\alpha \tag{1}$$

여기서 u_o 와 u_i 는 각각 높이 h_o 에서의 풍속과 h_i 에서의 풍속을 의미한다. 또한 α 는 지표형상계수를 나타내며, IEC61400-1을 참조하여 Wind shear exponent을 표준 풍력 발전기 등급의 경우에 0.2로 주어진 값을 사용하였다.

Table.1에서 나타난 것처럼 V_{ref} 는 10분 동안의 허브높이의 기준 풍속을 나타내고, 이에 따라 허브 높이에서의 연평균 풍속을 다음과 같이 나타내었다.

$$V_{ave} = 0.2V_{ref} \tag{2}$$

2.2 풍속에 의한 하중

본 연구에서는 풍속에 의한 하중을 계산하기 위해서 2차원 유동 특성을 가지고 있는 블레이드 요소 이론(Blade element method theory)를 사용 한다. 여기서는 회전축으로부터 거리가 r인 깃 단면의 회전 선 속도와 받음 각이 결정된 후에 깃 단면에서의 항력과 양력을 다음과 같이 나타낸다.

$$f_L = \frac{1}{2} \rho C_L u_o^2 l \tag{3}$$

$$f_D = \frac{1}{2} \rho C_D u_o^2 l \tag{4}$$

여기서 ρ 은 공기밀도, C_D 와 C_L 은 각각 항력계수와 양력계수, u_o 는 실제 회전하는 깃 단면의

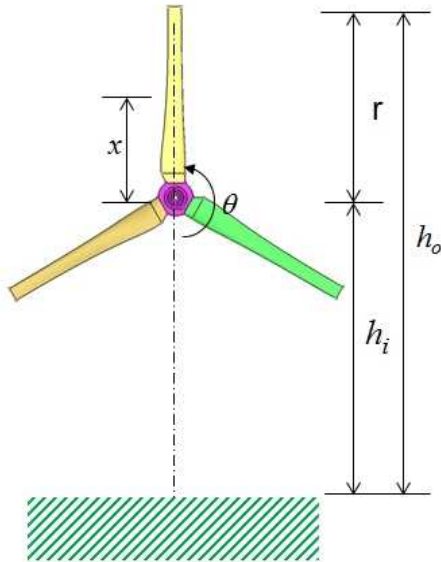


Fig. 1 Structure of wind turbine blade using the reference in EWEA

속도를 의미한다. 그러나 이것은 Wind Turbine blade 길이에 제한된 힘이므로 blade의 전체에서의 힘은 거리 r에 대한 적분을 사용하여 구하고 식은 다음과 같다.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A' u_o^2 \tag{5}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A' u_o^2 \tag{6}$$

여기서 A' 는 pitch각(θ')에 따른 유효면적을 표현한다. 또한 C_D 와 C_L 는 항력 계수와 양력계수를 나타내며 풍속에 의한 하중을 구하는데 사용하였다.

이처럼 식(5)와 (6)을 통해서 Wind Turbine blade의 회전 각도에 따라서 달라지는 풍속에 의한 하중을 계산할 수 있고, 수직면에 발생하는 하중을 기준으로 풍 하중의 분포하중을 도입을 하였다.

일반적으로 풍 하중은 유효 단면적에 분포하중으로서 가해지기 때문에 풍속에 의한 Wind Turbine blade의 분포하중을 다음과 같은 식을 통해 나타내었다.

$$f(x, \theta) = \frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{\alpha - \beta}{2r} x \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

여기서 α 와 β 는 $h_i + r$ 와 $h_i - r$ 높이에서의 풍속에 의한 하중으로 나타내었다. 또한 Fig.1에서 나타난 것처럼 θ 는 Blade의 위치에 따른 각도를 나타내는 기호로서 지표면에서부터 가장 가까운 곳에 위치해 있는 곳은 $\theta = 0$ 으로 나타내고, 반대로 $\theta = 180$ 위치에 있을 때는 $h_i + l$ 의 높이에서의 풍속에 따른 분포하중을 나타낸다. 또한 풍 하중은 고도가 높아질수록 높은 하중이 작용하기 때문에 $\theta = 180$ 에 위치해 있을 때 가장 높은 하중이 작용한다.

이 분포하중을 합력으로 표현하기 위해서 아래와 같은 식이 사용되고 분포하중이 작용하는 부분의 도심에 작용하며, 작용점을 구하는 식(8)은 다음과 같이 표현된다.

Table 2 Blade material data

	Title	Material data
E	Young's Modulus	71,000MPa
ρ	Density	2770 kg/m ³

$$F_w(\theta) = \left[\frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{\alpha - \beta}{4} x \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right] r \tag{8}$$

$$\bar{r} = \frac{\frac{\alpha + \beta}{4} + \frac{\alpha - \beta}{6} x \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{\alpha - \beta}{4} x \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)} r \tag{9}$$

본 연구에서는 식 (8)과 (9)을 도입하여 분포하중의 합력과 작용점을 사용하여 해석을 수행하였다.

3. 블레이드 형상 설계

3.1 재료의 물성

Wind Turbine Blade는 upper skin, lower skin, shear web로 구성이 되며, 일반적으로 각 각의 부위에는 복합재료를 사용한 물성치를 사용하게 되고 이방성의 성질을 가지고 있다.

Edison Software에서는 적용하기 힘들기 때문에 등방성의 성질을 가지고 있는 Steel, Aluminum을 사용하여 해석을 실시하였고, 해석에 사용된 물성치 Al6061은 Table.2에서 알 수 있다.

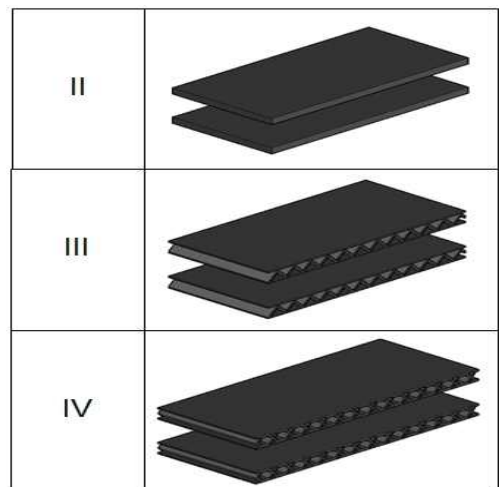


Fig. 2 A variety of web structures

3.2 형상 변수 설정

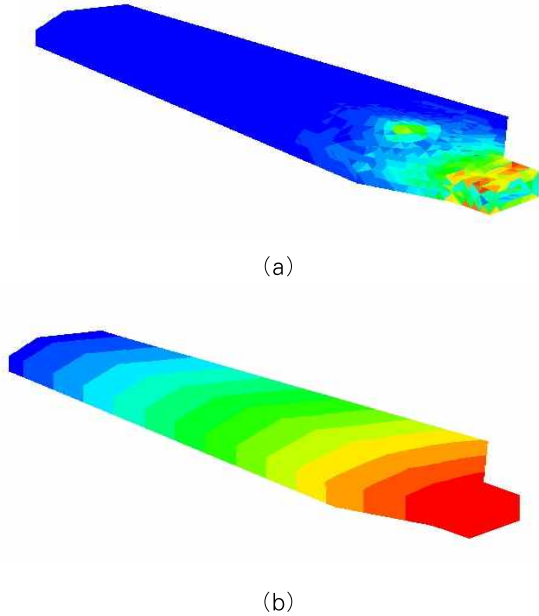


Fig. 3 Deformed blade shape; (a) Stress distribution and (b) Displacement distribution in wind turbine

Wind Turbine blade는 바람에 따라 상당한 힘을 받게 된다. 회전 할 때 이에 따라 Upper skin와 Lower skin사이에 blade의 강도를 보강하기 위해서 Web을 사용을 하였다. Web은 전단방향의 힘을 지탱해줄 뿐 아니라 전체 구조물에 강성을 제공하게 된다. Fig.2에서는 Web의 다양한 구조를 말해주고 있다.

Fig.2의 I는 Web이 적용이 안 되었을 때의 영향을 알아보기 위한 기본적인 모델이고, II는 Web이 적용되어 있는 가장 기본적인 모델이고, 두께는 1m, 길이는 64m로 blade의 내부에 적용이 되었다. 여기서 web의 결합은 보통 접착제를 통해 이루어지게 되며, 해석을 수행할 때는 접착제의 영향을 배제하고 수행하였다. III와 IV는 Web의 전체의 두께는 II 모델과 일치하지만 각 각은 Truss구조와 벌집(Honeycomb)모양의 구조를 추가적으로 도입하였다.

4. FEM 구조 해석

4.1 Wind Turbine Blade 모델

Fig.3 에서 볼 수 있는 것처럼 3039개의 node와 9052개의 element로 구성되어 있다. 또한 Edison software의 1차 Tetra요소인 C3D4를 이용하여 해석을 진행하였다.

4.1 Wind Turbine Blade 모델

본 연구에서는 선형 해석을 기본으로 하여 해석을 실시하였다. 여기에 적용되는 변수는 Pitch 각과 Shear web의 형상의 변화이다. Pitch각은 30°일 경우로 제한을 두고 식(8)을 이용하여 적용하였다.

Table.1에서는 IEC 61400-1에서는 V_{ref} 를 10분 동안 허브에서 속력으로 서술하고 있고, 풍력 발전기의 등급에 따라 30m/s에서부터 50m/s로 나타난다. 또한 여기에 추가적으로 S등급에서의 풍속을 추가하여 해석을 수행할 것이며, 이것을 통해서 풍 하중의 합력을 구하고 작용점에서의 합력이 작용했을 때, Web의 모양에 따른 영향과 질량에 따른 강도를 설계할 것이다.

Fig.3에서 보는 것과 같이 블레이드의 길이 방향(R)의 0.23R 지점에 집중하중을 부여 하였을 때의 Stress 분포와 Displacement 분포를 볼 수 있다.

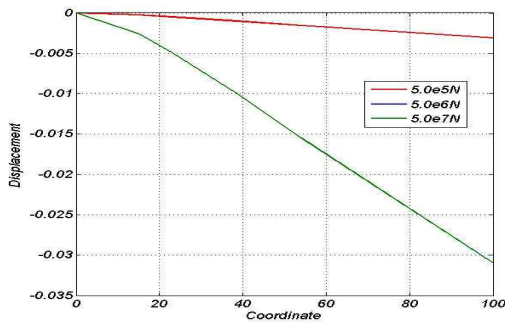


Fig. 4 Displacement-blade section graph under control of load

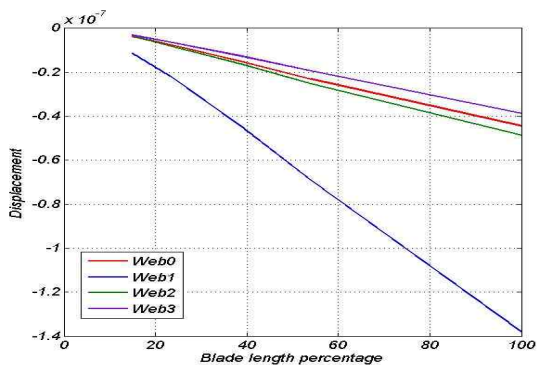


Fig. 5 Displacement-blade section graph

Table 3 Thickness of web and blade structure

	Web 두께 (m)	Blade 두께 (m)	체적 (m^3)
1번모델	0.1	1	2.16E+03
2번모델	0.1	0.8	2.12E+03
3번모델	0.1	0.5	2.10E+03
4번모델	0.08	1	1.85E+03
5번모델	0.08	0.8	1.80E+03
6번모델	0.08	0.5	1.78E+03
7번모델	0.05	1	1.32E+03
8번모델	0.05	0.8	1.27E+03
9번모델	0.05	0.5	1.24E+03

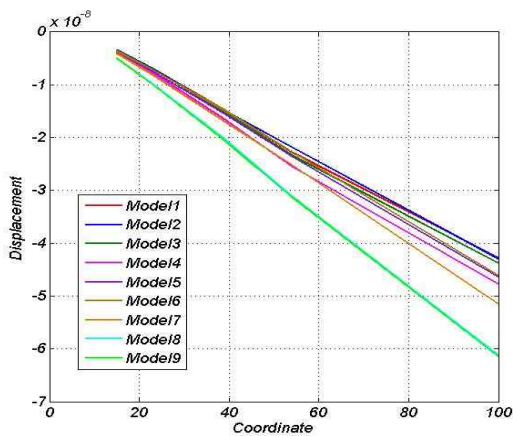


Fig. 6 Displacement-blade section graph

블레이드의 SECTION별 끝 단에서의 하중의 크기를 기준으로 측정을 하였고 Fig.4는 하중에 따른 변위에 대한 데이터이다.

본 연구에서는 Fig.4를 통해서 선형 또는 비선형을 판단하려고 한다. Fig.4는 하중이 5.0e6와 5.0e7N의 힘을 주었을 때, 0.15R부근에서 변곡점이 생기게 되는 것을 확인 할 수 있고, 이를 통해서 기하학적 비선형을 도입했다.

이에 따라 IEC 61400-1에서 서술되어진 것과 같이 A등급의 풍속을 도입함에 따라서 Fig.2 와 같이 web 3가지 형태에서의 질량 당 변위를 최소화 할 수 있는 모델을 선정하려고 한다.

Fig.5에서는 pitch각이 30도라는 가정으로 식 (8)을 이용하여 합력을 주었을 때 변하는 변위를 나타낸 그래프이다. 여기서 벌집모양이 도입된 형태의 Web3에서 질량 당 변위가 가장 최소화 된 것을 볼 수 있다.

이에 따라서 2차 설계 변수를 질량을 최소화 할 수 있는 벌집모양을 구성하는 두께를 설정하여, 2차 최적화를 실시하

고자 한다.

4.3 2차 설계 변수 및 해석

본 연구에서는 앞에서 고려된 shear web 3가지 형태에서의 기하학적 비선형 해석을 실시하였고, 결과는 벌집 모양 구조의 web이 선정되었고, 두께 조절을 통해 2번째 최적화를 실시하고자 한다.

Table.3은 두께에 대한 3가지 변수에 대해서 나타낸 표이다. 이 표에 따라서 벌집모양의 구조의 두께를 0.05, 0.08, 0.1m로 3가지의 형태로 나타내고, 반대로 blade의 두께는 0.1, 0.8, 0.5m으로 설정하고 직교표를 도입함에 따라 9개의 모델을 도입하였다.

이에 따라서 A등급의 풍속을 참조하여 집중 하중을 도입하였다. 집중하중은 blade에서의 도심 부분에 적용이 되어졌고, Fig.6과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig.6은 9가지 모델을 기준으로 하중에 대한 변위를 나타내는 그래프이다. 여기서 1번과 2번의 처짐량이 최저값으로 $-4.3e-8$ 의 값을 나타낸다.

또한 8번과 9번의 처짐량은 최고치로 $-6.15e-8$ 의 값을 가진다. 여기서 질량에 대한 변위는 Table.3에서 볼 수 있듯이 1번 모델에서 최소한의 변위로 최적의 조건을 가지고 있는 것처럼 보이거나 체적차이가 $4000 m^3$ 나타나기 때문에 2번 모델이 더 최적화에 적합한 모델이라고 할 수 있다.

본 연구에서의 결과에 따라서 굽힘시험에 Blade의 두께보다 Web의 두께가 처짐량에 더 영향을 주는 것을 알 수 있으며, Web의 두께가 얇아질수록 처짐량이 더 커지는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 Wind turbine blade의 shear web의 모양 및 두께에 따라서 최적화 시키는 방법에 대해서 소개하고 있다.

Wind turbine blade 모형에서는 web이 없는 기본 구조,web의 기본 형태, 트러스 구조 및 벌집 모양 등의 총 4가지 구조에서의 변위 및 응력 측정을 통하여 최적의 모형을 벌집 모양으로 선정하였다.

벌집모양(Honeycomb)의 구조 및 블레이드 형태에서 두께를 최적화 하는 방법으로서 9가지의 방안으로 선정하였고, Edison Software를 이용하여 블레이드의 최적화 시행 및 비교 검토하였다.

1) 본 연구는 기하학적 비선형을 고려하여 블레이드 Web의 최적화 설계를 얻기 위하여 질량 당 처짐량을 비교 분석하였다.

2) 1번과 2번 모델에서 최저의 처짐량 $-4.28e-8$ 와 $-4.3e-8$ 을 얻었으나 질량의 차이에 의해서 질량당 처짐량에 최적화된 모델은 2번 모델로 선정하였다.

3) 위 결과에 따라 Web의 두께는 Blade의 두께보다 처짐량에 큰 영향을 끼치며, Fig.6에 따라 Web두께가 두꺼울 때 처짐량이 가장 작은 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- IEC International Standard 61400-1 Part 1: Safety Requirements, 1999, pp. 19-41.
- International Standard, IEC 61400-23, 2001, "Full-scale structural testing of rotor blades," First edition.
- Hong-Kwan Kim, Jang-Ho Lee, Se-Myong Jang, Ki-Weon Kang** (2010) "Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade."
- Nicholas Gaudern, Dr. Digby D. Symons,** (2010.) Comparison of Theoretical and Numerical Buckling Loads for Wind Turbine Blade Panels REPRINTED FROM WIND ENGINEERING VOLUME 34, NO. 2,
- Seung Min Kwon, Moon Jeong Kang and Hong Hee Yoo** (2012) Stability Analysis of a Wind Turbine Blade Considering Wind Force and Variation of Pitch Angle (Received June 29, 2012 ; Revised October 24, 2012 ; Accepted October 29, 2012)
- KIM, J.G.** (2003) 한양대학교 전력산업연구개발사업 증기터빈 블레이드의 신뢰성 해석 보고서
- Hyun-Goo Kim, Sang-Woo Woo, Moon-Seok Jang, Hyuong-Ki Shin** (2008 May 22, 2008) Computational Flow Analysis on Improvement Effect of Wind Shear by a Structure Installed Upstream of a Wind Turbine pp.278-281

R. Lanzafame, M. Messina (15 December 2006) Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory

Choong-hun Lee, Jin-Moo Park, Tae-Wook Kim and Ji-Sang Park. (2002) Structural design and analysis of a composite wind turbine blade

Hong-Kwan Kim, Jang-Ho Lee, Se-Myong Jang, Ki-Weon Kang Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade

Alejandro González Canales, (August 2008) Evaluation of bondline thickness on wind turbine blade subcomponents

Hyo-In Byeon, (2004) Analysis and Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Composite Rotor Blades ,