

분리형 블레이드를 위한 4.3MW급 풍력 발전 시스템 블레이드의 고효율 공력 성능 연구

이용규¹ · 박현범^{2,†}

¹건설기계부품연구원

²군산대학교 기계공학과

A Study on the High Efficiency Aerodynamic Performance of 4.3MW Class Wind Power System Blade for Separation Blade

Yonggyu Lee¹, Hyunbum Park^{2,†}

¹Korea Construction Equipment Technology Institute

²School of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

Recently, renewable energy has been widely used as a source of wind energy and solar energy due to the shortage of fossil fuels and environmental problems. Against this backdrop, wind energy is emerging as an important energy source, and the wind power market is showing rapid growth worldwide. In this study, a high-efficiency wind turbine blade was designed with an integrated blade aerodynamic design for prior research on separate blades. The blade airfoil was applied as NACA 4418, and it was verified by comparing it with the analysis results to evaluate the newly designed blade.

초 록

최근 신재생에너지는 주로 사용되는 화석연료의 부족과 환경문제로 풍력에너지와 태양에너지 자원으로 널리 사용되고 있다. 이런 상황에서 풍력에너지는 중요한 에너지원으로 떠오르고 있으며, 풍력 발전 시장은 전 세계적으로 급격한 성장을 보여주고 있다. 본 연구에서는 분리형 블레이드의 선행연구를 위해 일체형 블레이드 공력 설계로 고효율 풍력 터빈 블레이드를 설계를 수행하였다. 블레이드 에어포일은 NACA 4418로 적용하였고, 설계된 블레이드를 평가하기 위해 해석 결과와 비교하여 검증하였다.

Key Words : Wind Turbine System(풍력 터빈 시스템), Horizontal Axis Wind Turbine(수평축 풍력 터빈), Aerodynamic Design(공력 설계), Aerodynamic Analysis(공력 해석)

1. 서 론

최근 국제 원유가격의 급등과 환경오염 문제가 대두되어 대체 에너지 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 안전하고 풍부한 풍력에너지는 태양열, 수소, 연료전지 등과 함께 각광받고 있는 신재생에너지 중의 하나이다. 풍력발전은 독일, 덴마크, 미국 등을 선두로 최근 10년간 빠르게 성장하고 있다.

선진국과 비교하여 국내 풍력 발전 시장의 규모는

매우 작지만 정부의 신재생에너지 지원 정책에 힘입어 지속적으로 성장하고 있다. 풍력 발전은 바람에 포함된 에너지를 로터 블레이드를 통하여 운동에너지로 변환시키고 발전기를 통하여 전기 에너지를 생산하는 발전 시스템으로 매우 친환경적이다. 따라서 최근 대체 에너지로서 다양하게 연구되고 있다.

국외의 경우, R. Özkan은 블레이드 요소 이론을 통해 새로운 최적화 기법을 개발하여 소규모 풍력블레이드 공력 설계와 평가를 수행하였다[1].

국내의 경우, 김민용 등은 1MW급 수평축 풍력터빈 블레이드 공력 설계 및 해석을 수행하여 공력성능을 검증하였다[2]. 김철완 등은 수직축 및 수평축 풍력

터빈의 특성 및 공력 성능 예측을 확인하였다[3]. 공창덕 등은 1kW급 소형 풍력 발전용 블레이드의 공력 설계 변수에 관한 연구를 수행하였다[4].

본 연구에서는 분리형 블레이드 연구하기를 앞서 풍력 발전용 4.3MW급 일체형 블레이드의 피로 수명을 만족하는 블레이드 구조 설계를 위한 선행 연구로서 공력 설계 및 해석을 수행하였다. 일체형 블레이드 에어포일, 깃 끝 속도비, 정격 풍속을 선정하고 설계 요구조건으로부터 블레이드 공력 설계를 수행하였다. 설계된 블레이드는 공력 해석을 통해 설계 요구 조건을 만족하는지 검토하였다.

2. 공력 설계

2.1 공력 설계 방안

풍력발전 시스템의 설계를 수행하기 위해서는 먼저 시스템 사양에 대한 정립이 필요하다. 시스템 사양은 목적 및 용도에 맞도록 정의되어지며, 이러한 시스템 규격이 정해지면 세부적인 설계 요구조건을 정립할 수 있게 된다. 풍력발전 시스템의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 풍력 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 블레이드의 설계이다. 본 연구에서는 공력설계를 위해 초기 시스템 사양을 Table 1과 같이 정의하였다[5].

Table 1 Aerodynamic Design Requirements

Type	Horizontal Axis Wind Turbine System
Rated Power	4.3MW(Electric Power)
Working Range	Cut-in Wind Speed : 3 m/s ↓ Rated Wind Speed : 4~12 m/s Cut-out Wind Speed : 25 m/s Max. Survival Wind Speed : 55 m/s
Number of Blades	3
Tip Speed Ratio	7

2.2 에어포일 특성

깃 단면의 에어포일 형상은 풍력 발전기의 여러 가지 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 일반적으로 에어포일을 선정하는 기준은 레이놀즈 수 변화에 따른 양력의 변화가 적을 것, 최대 양력계수 및 실속 받음각, 최대 양항비가 클 것, 구조적 강도 보장을 위한 두께가 비교적 두꺼울 것 등이 있다.

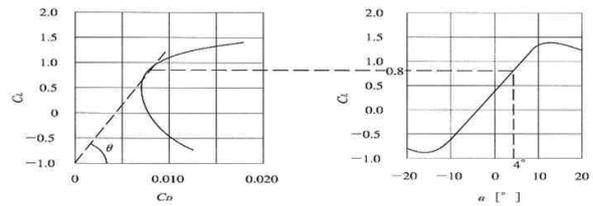


Fig. 1 Lift and Drag Ratios of NACA4418

본 연구에서는 Wind Turbine Airfoil Catalogue를 참고하여 여러 가지 에어포일을 비교 분석하였으며 최대 양력계수 및 최대 양항비, 구조적 강도 보장 두께를 가지는 NACA 4418을 선정하였고, 공력 자료는 Fig. 1과 같다[6].

2.3 블레이드 설계

풍력 발전 블레이드의 직경은 정격 출력에 대한 근사식으로 다음과 같이 계산된다.

$$P_{max} = 0.593 \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

식 (1)에서의 P_{max} 는 이상적인 Betz 이론에 의한 최대 출력, A 는 블레이드 회전 면적, V 는 정격 풍속, D 는 블레이드 직경이다.

$$P_t = 0.48 \frac{1}{2} \rho A_2 V_1^3 \quad (2)$$

식 (2)에서의 P_t 는 본 연구에서의 설계하고자하는 풍력 발전 블레이드의 출력이다. Fig. 2는 바람에너지로부터 받는 풍력블레이드의 공기유동을 표현하였다.

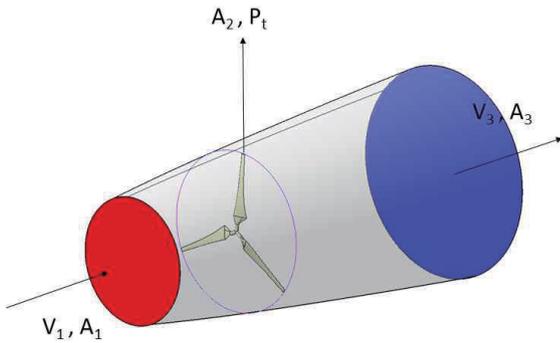


Fig. 2 Airflow in Wind Blades

세부적인 블레이드 형상 설계를 수행한다. 블레이드의 설계를 위해 먼저 설계 요구 조건으로부터 블레이드의 크기 및 에어포일의 형상, 비틀림 각, 깃 끝 속도비 등의 공력설계를 수행하고, 공력 해석을 통하여 요구 성능 만족 여부를 검토한 후 설계를 개선하거나 확정하게 된다.[4]

본 연구에서는 아래 제시한 방안에 의해 공력 설계를 수행하였다. Fig. 3은 본 연구에서의 설계하고자 하는 에어포일의 풍속, 유동각, 받음각 등을 표현하였다.

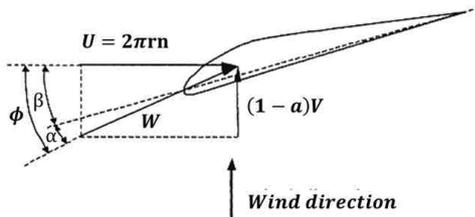


Fig. 3 Rotation Conditions of Airfoil

공력설계를 위한 변수 Setting Angle(θ), Angle of Attack(α), Flow Angle(ϕ)는 다음 식(3)과 식(4)로 계산된다.

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \tag{3}$$

$$\phi = \alpha + \beta \tag{4}$$

$$C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos\phi) \tag{5}$$

식 (5)에서의 C 는 코드 길이, C_L 은 양력계수, r 은 임의의 블레이드의 반경길이이다. 본 연구서의 블레이드는 반경에 11등분으로 나누어 각 에어포일 형상을 설계하였다. 세부적인 공력 설계 결과는 Table 2에 명시하였으며 공력 형상은 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2 Aerodynamic Design Results of 4.3MW Class Wind Turbine Blade

Rated Power	4.3 MW
Rotor Radius	53.254m
Blade Root Chord	9.406m
Blade Tip Chord	2.475m
Airfoil	NACA4418
Twisting Angle	Chord
19.7°	9.406m
14°	7.642m
10.4°	6.307m
8°	5.362m
6.2°	4.583m
4.9°	4.029m
3.9°	3.599m
3.1°	3.250m
2.4°	2.919m
1.9°	2.718m
1.4°	2.475m

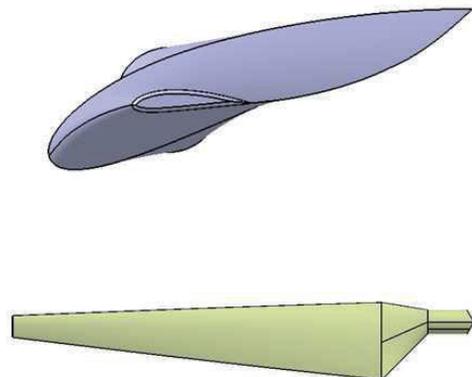


Fig. 4 Aerodynamic Configuration of Blade

블레이드의 양력 값과 항력 값은 Fig. 5와 같이 구하게 된다.

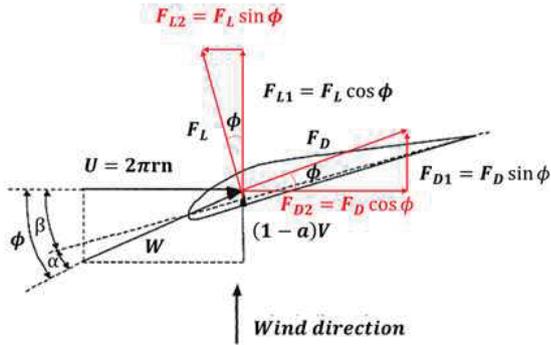


Fig. 5 Lift and Drag Value of Airfoil

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A W^2 \quad (6)$$

식 (6)에서의 F_L 은 양력, ρ 는 공기의 밀도, C_L 는 양력계수, W 는 블레이드의 회전속도와 정격풍속에 합력 값이다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A W^2 \quad (7)$$

식 (7)에서의 F_D 은 양력, ρ 는 공기의 밀도, C_D 는 양력계수, W 는 블레이드의 회전속도와 정격풍속에 합력 값이다.

본 연구에서의 블레이드를 설계하여 Fig. 5와 식 (6)과 식(7)을 이용하여 계산한 결과 블레이드 1개 계산 시 출력 값은 1.659MW 값을 확인하였다. Table 3은 이론식을 통해 구해진 블레이드 1개의 출력 값을 표현하였다.

Table 3 The Power of Designed Blade

Power of 1 Blade	Power of 3 Blade	Target
1.659MW	4.977MW	4.3MW

본 연구에서의 공력 설계를 통해 얻은 출력 값을 검증하기 위해 Betz Limit 이론식에 재계산한 결과 효율

52.8%가 나오는 것을 확인하였고 설계 결과는 문제가 없음을 확인하였다.

3. 공력 성능 평가

3.1 공력해석범위

Fig. 6은 본 연구에서의 해석하고자 하는 블레이드 공력해석 범위이다. D는 블레이드 반경의 값이며 해석 시간을 줄이기 위해 Periodic조건에 대한 모델링과 해석을 수행하였다.

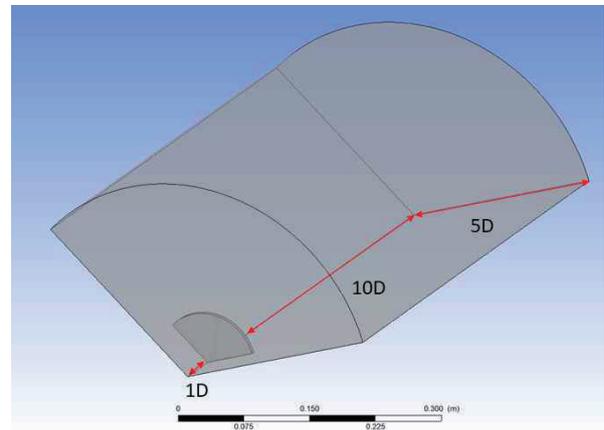


Fig. 6 Blade Flow Field Aerodynamic Analysis Range

3.2 수치해석격자

Fig. 7은 본 연구에서의 해석하고자 하는 CFX모델의 해석격자이다. 블레이드 표면에는 경계층을 고려하여 육면체 격자, 나머지 영역에는 사면체 격자로 수행하였다. 전체 격자수는 2,000,000개로 적용하였다.

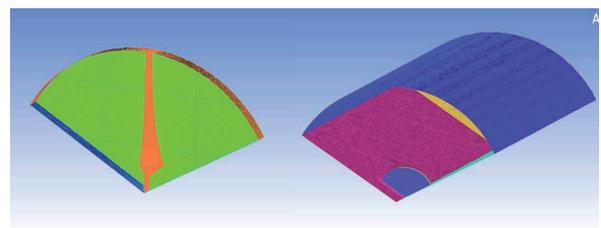


Fig. 7 Grid for Numerical Analysis

3.3 경계조건

풍력 블레이드 유동해석의 주요 경계 조건은 아래

Table 4와 같다. 유동해석은 설계 시 사용된 설계요구 조건과 같게 모사하였고 유체모델은 CFX 내 기본 공기 모델을 사용하였으며 난류모델은 층류로부터 난류로의 천이영역에 대한 높은 신뢰성의 $k-\omega$ 모델 기반인 SST(Shear Stress Transfer) 모델을 적용하였다[7].

Table 4 Aerodynamic Analysis Boundary Condition

Inlet	$V = 12\text{m/s}$, $T_t = 15^\circ\text{C}$
Outlet	$P_t = 1\text{atm}$
Opening	$P_t = 1\text{atm}$, $T_t = 15^\circ\text{C}$
Working Fluid	Air Ideal Gas
Turbulence Model	Shear Stress Transport
Heat Transfer	Total Energy Model
Blade/Wall	No Slip Wall

3.4 공력 해석 결과

풍력 블레이드 공력 설계 목표 출력 값은 4.3MW이며, 상용 코드를 활용한 수치해석 결과를 검토한 결과 설계 값과 해석 값의 오차는 약 9%이며 해석을 통해 설계를 검증하였다. Fig. 8은 블레이드 공력해석 결과이며 앞면과 뒷면의 압력을 표현한 그림이다. Table 5는 Fig. 5의 이론식과 Table 4의 하중 분포를 통해 구해진 블레이드 1개의 출력 값을 표현하였다.

Table 5 Aerodynamic Analysis Resulting Load Distribution Value

X-Component	-383,300N
Y-Component	-12,930N
Z-Component	141,710N

Table 6 Blade Analysis Power Values

Power of 1 Blade	Power of 3 Blade
1.312MW	3.936MW

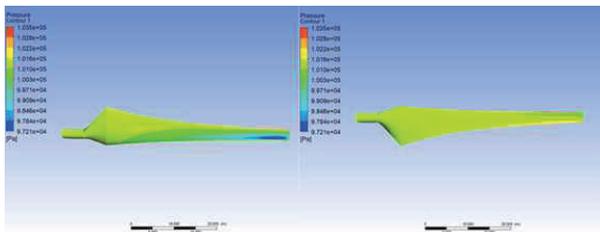


Fig. 8 Results of Blade Aerodynamic Analysis

4. 결 론

본 연구에서는 대형화 풍력블레이드의 육상 수송을 위한 분리형 블레이드 설계 방안을 정립하기 위하여 선행 연구로서 일체형 블레이드의 공력 설계를 수행하였다. 대상 블레이드는 정격 풍속 12m/s에서 운용되며 정격 출력은 4.3MW급으로 선정되었다.

공력 설계 시 최대 양력계수, 최대 양항비 및 구조적 강도를 위해 에어포일의 두께가 비교적 두꺼운 형상을 가지는 NACA 4418을 선정하였다. 공력 설계 방안은 최대 양항비를 갖는 최적의 받음각으로 설계하였고 공력 해석을 수행하여 공력 설계 값을 검증하였다. 향후에는 본 연구를 통해 설계된 공력 형상 결과를 반영하여 블레이드 구조 설계 및 해석을 수행할 예정이다.

본 연구 결과는 향후 대형화 되는 블레이드의 분할 위치를 평가하고 분할에 대한 안전성을 검토하기 위한 선행 연구로서 기초 모델이 될 형상을 선행으로 설계한 결과이다. 향후 본 모델을 분할하여 분할 위치를 최적화하는 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030020380, 육상 풍력 운송 한계 돌파를 위한 70m이상 접착식 분리형 블레이드 개발). 본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임.(2023R1A6C101B042).

References

- [1] R. Özkan and M. S. Genc, "Aerodynamic design and optimization of a small-scale wind turbine blade using a novel artificial bee colony algorithm based on blade element momentum (ABC-BEM) theory," *Energy Conversion and Management*, vol. 283, May

2023.

- [2] M. Y. Kim, "A Study on Aerodynamic and Structural Design of High Efficiency Composite Blade of 1MW Class HAWT Considering Fatigue Life," Domestic Master's Thesis Chosun University, Gwangju, 2012.
- [3] C. W. Kim and T. H. Cho, "Aerodynamic Design and Performance Prediction of Wind Turbine Blade," *Journal of the Academic Conference of the Korean Society of Propulsion Engineering*, pp. 677~681, Nov. 2011.
- [4] C. D. Kong and C. H. Bang, "A study on Parametric Study for 1kW Class Micro Wind Turbine Blade," *Journal of the academic conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, pp. 271-274, Apr. 2003.
- [5] D. L. Gourieres, "Wind Power Plants," Pergamon Press, 1982.
- [6] B. Frank, et al, "Wind Turbine Airfoil Catalogue," Riso National Laboratory, 2001.
- [7] H. S, Lee, "A Study on Design of Small Vertical Axis Wind Turbine System with High Efficiency and Low Noise," Domestic Master's Thesis Chosun University, Gwangju, 2011.