

사이드 펄링과 최적 토크스케줄을 고려한 소형 풍력터빈 해석 프로그램 개발

장현무* · 김동명* · 백인수***

*강원대학교 기계융합공학과

**강원대학교 기계의용·메카트로닉스·재료공학부

Development of an Analysis Program for Small Horizontal Wind Turbines Considering Side Furling and Optimal Torque Scheduling

Jang Hyeon-Mu* · Kim Dong-Myeong* · Paek In-Su***

*Department of Advanced Mechanical Engineering, Kangwon National University

**Division of Mechanical and Biomedical, Mechatronics, and Materials Science and Engineering

†Corresponding author: paek@kangwon.ac.kr

Abstract

A program to design a small capacity wind turbine blade is proposed in this study. The program is based on a matlab GUI environment and designed to perform blade design based on the blade element momentum theory. The program is different from other simulation tools available in a point that it can analyze the side-furling power regulation mechanism and also has an algorithm to find out optimal torque schedule above the rated wind speed region. The side-furling power regulation is used for small-capacity horizontal axis wind turbines because they cannot use active pitch control due to high cost which is commonly used for large-capacity wind turbine. Also, the torque schedule above the rated wind speed region should be different from that of the large capacity wind turbines because active pitching is not used. The program developed in this study was validated with the results with FAST which is the only program that can analyze the performance of side-furled wind turbines. For the validation a commercial 10 kW wind turbine data which is available in the literature was used. From the validation, it was found that the performance prediction from the proposed simple program is close to those from FAST. It was also found that the optimal torque scheduling from the proposed program was found to increase the turbine power substantially. Further experimental validation will be performed as a future work.

Keywords: 블레이드 공력설계(Blade aerodynamic design), 익요소운동량이론(Blade element momentum theory), 성능예측(Performance prediction), 최적토크스케줄(Optimum torque schedule), 사이드 펄링(Side furling)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.38, No.1, pp.15-31, April 2018
<https://doi.org/10.7836/kjes.2018.38.2.015>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 04 December 2017

Revised: 23 February 2018

Accepted: 20 April 2018

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호설명

- a : 축방향유도계수 [-]
- a' : 반경방향유도계수 [-]
- F : 익단손실계수 [-]
- c : 시위 길이 [m]
- B : 블레이드 매수 [ea]
- R : 로터 반경 [m]
- r : 블레이드 반경방향 위치 [m]
- P : 출력 [W]

그리스 문자

- λ : 선단속도비 [-]
- α : 받음각 [°]
- β : 비틀림각 [°]
- ϕ : 유입각 [°]

하첨자

- C_l : 양력계수 [-]
- C_d : 항력계수 [-]
- C_n : 수직하중 계수 [-]
- C_t : 접선하중 계수 [-]
- C_P : 출력계수 [-]
- C_T : 추력계수 [-]

1. 서론

최근 범세계적으로 추진되고 있는 신재생에너지 정책에 부합하여 많은 기관과 산업체에서 풍력터빈에 대한 연구 및 개발이 활발히 이뤄지고 있다. 국내 역시 신정부 출범 이후 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 풍력과 태양광, 태양열 등으로 대표되는 신재생 에너지 중 풍력은 효율적이며 높은 기술성숙도를 갖는 에너지로 많은 주목을 받고 있다¹⁾.

이러한 풍력발전은 그 규모에 따라 분류가 가능하며, 이 중 로터 회전 면적이 200 m² 미만이고 정격전압이

AC 1000 V 또는 DC 1500 V 미만인 소형 풍력터빈²⁾을 제작하는 업체의 경우 대규모 제작사에 비해 상대적으로 기술 성숙도와 전문지식을 보유한 설계인력이 부족한 실정이다³⁾. 특히, 블레이드 설계의 경우 초기 단계에 많은 이론적 배경이 요구되어 산업현장에서 이루어지기 어려운 경우가 많다.

소형 풍력은 대형 풍력과 비교하여 풍력터빈의 크기가 작아 제작이 용이한 장점이 있지만, Reynolds 수 대역의 감소에 의한 블레이드 공력효율 저감, 터빈 단가문제로 인한 능동 블레이드 피치제어 기술 적용의 어려움 및 대체과풍속 제어기술의 낮은 기술성숙도, 그리고 정격풍속 이후 고 풍속 구간에서 대형 풍력터빈과의 상이한 토크스케줄 필요와 같은 기술적인 어려움을 갖고 있으며, 또한 대다수의 전문연구인력이 대형 풍력 연구를 수행하고 있어 중소기업 위주의 소형 풍력 기술은 발전이 매우 느리게 진행되고 있다.

전문 연구인력의 부족으로 많은 연구결과가 문헌에 제시되어 있지는 않지만, 그동안 몇몇 문헌을 통해 소형 풍력터빈의 블레이드 형상 최적화 방법과 알고리즘이 소개되었다. 윤진용 외 2인에 의해 제시된 문헌에서는 레이놀즈 수 변화에 따른 블레이드 공력성능 변화를 고려한 블레이드 최적설계 방법을 제시하였으며, 날개요소 운동량 이론과 패널이론에 기반을 둔 익형의 공력해석 프로그램인 X-foil을 연동하여 공력을 최대화하기 위한 시위길리와 비틀림각 계산 인하우스 프로그램(In-house program)을 개발하였다^{4,5)}. 또한 유전자 알고리즘을 도입한 블레이드 최적 설계에 관한 논문이 문헌으로 제시되었으나, 최적의 토크스케줄을 제시하지 못하고 있다⁶⁾.

베를린 공대에서는 X-foil 프로그램을 연동하여 수평축 풍력터빈과 수직축 양력식 풍력터빈 해석이 가능한 QBlade라는 프로그램을 개발하여 지속적으로 업그레이드를 수행하고 있으며, 최근에는 공탄성 해석이 가능한 다물체 동역학 기반의 NREL FAST 프로그램과 연동하여 계산을 수행할 수 있도록 프로그램을 개선하였다^{7,8)}. 또한 소형풍력터빈 해석 프로그램으로 개발된 OmegaSoftWT는 익요소 운동량이론에 기반한 소형풍력터빈 블레이드 설계를 지원하고 있으며, Peak Power Tracking 및 IEC 규정 등에 입각한 블레이드 설계를 제공하고 있다⁹⁾. 하지만 사이드 펄링과 같은 과풍속 제어에 대한 해석이 불가능한 단점을 갖고 있다.

주로 대형 풍력터빈 해석에 많이 사용되는 공탄성 해석 프로그램으로는 NREL의 FAST나 DNV-GL Bladed, ECN의 HAWC2 등의 프로그램이 있으며, 사용자가 입력한 익형에 대한 양력계수와 항력계수 등의 정보를 이용하여, 블레이드의 공력해석을 수행한다. 이 중 유일하게 NREL의 FAST 프로그램은 사이드 펄링과 같은 과풍속 제어 시스템 해석을 지원한다. 하지만 X-foil과 같은 익형 성능해석 프로그램을 연동하여 블레이드의 공력성능을 계산하지 않기 때문에 이와 같은 프로그램들은 상대적으로 레이놀즈 수 변화에 대한 공력성능의 변화가 적은 대형 풍력터빈의 경우 적합하지만, 레이놀즈 수 변화에 대한 공력성능 변화가 큰 소형 풍력터빈 해석에는 해석 결과의 정확성이 떨어지는 문제점을 내포하게 된다.

따라서 본 연구에서는 소형 풍력 제작사의 개발자들이 풍력터빈의 상세정보 입력 없이 간단하게 최적화된 형상의 블레이드를 설계하고, 사이드 펄링과 같은 과풍속 제어 시스템을 적용하여 출력성능을 계산해볼 수 있는 알고리즘을 수립하고 이를 그래픽유저인터페이스 프로그램으로 개발하고자 하였다. 본 연구에서 개발되는 프로그램은 기존에 개발된 프로그램들과의 차별성을 갖기 위해, ① Reynolds 수를 고려한 BEM 적용(Batch 파일

로 작성된 X-foil 프로그램에 계산을 통해 산출된 Reynolds 수 및 Mach 수를 매트랩 상에서 호출하여 해당 값을 계산 변수로 적용)으로 블레이드 최적 공력설계 수행 ② 수평축 양력식 소형 풍력터빈에서 사용되고 있는 과 풍속 제어 시스템 중 사이드 펄링에 대한 해석지원, ③ 최적 공력설계가 수행된 블레이드와 사이드 펄링 시스템이 구현된 소형 풍력터빈 시스템 최적화를 위해 필요한 정격 이하 및 정격 이상의 구간에서의 토크스케줄 및 로터회전속도 계산, ④ 토크스케줄, 사이드펄링이 적용된 상태에서의 정상상태 출력곡선 도출 및 대상지점의 와이블 분포를 이용한 연간발전량 산정 등이 가능하도록 프로그램을 개발하였다.

2. 최적화 및 해석 프로그램

2.1 프로그램 알고리즘 구성

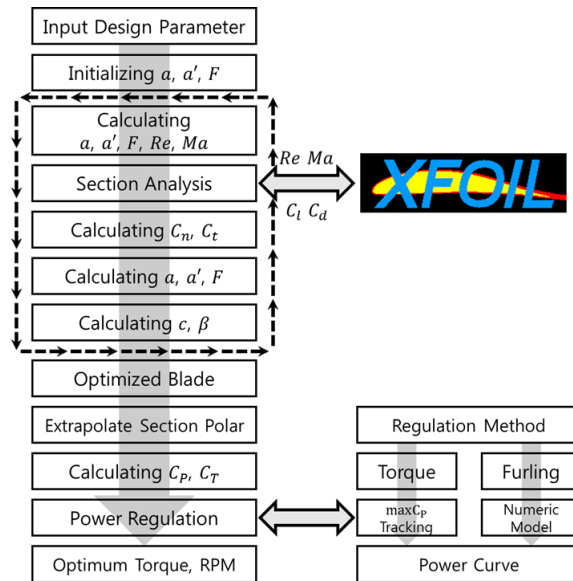
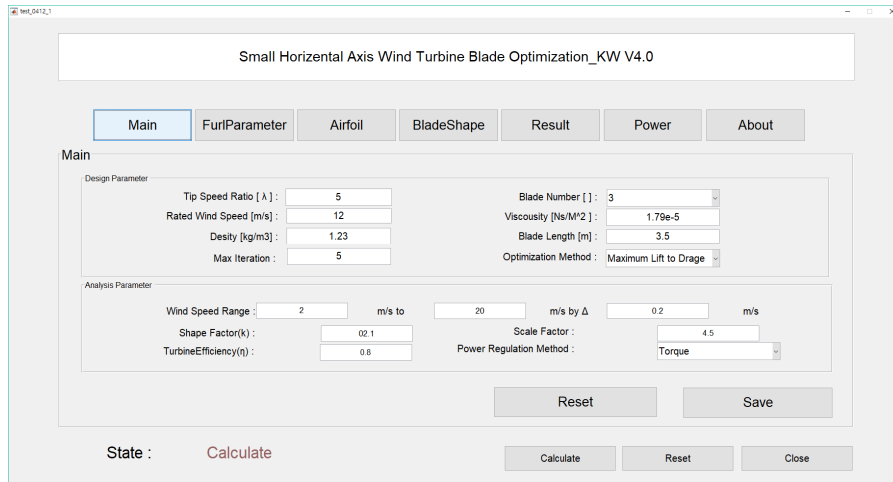


Fig. 1 Optimization algorithm for wind turbine blade

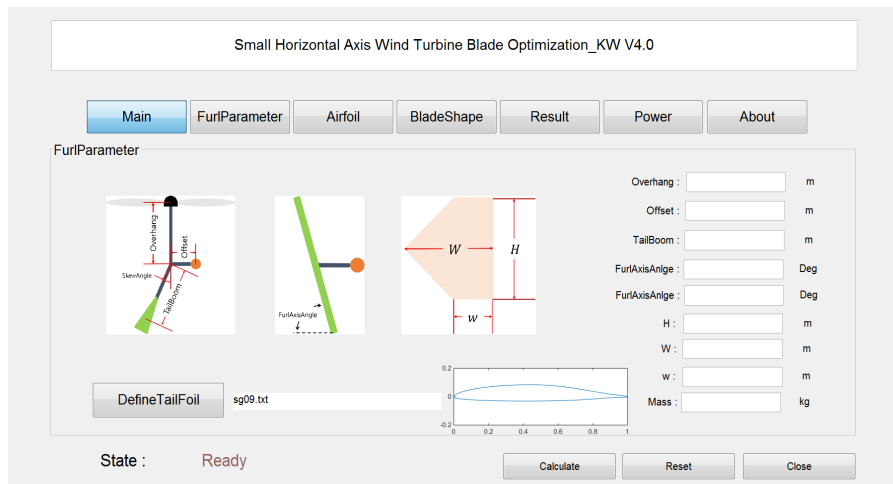
Fig. 1은 본 연구를 통해 개발된 프로그램의 알고리즘을 도시하고 있다. 초기단계에서 선단속도비와 같은 설계변수를 입력하고 최적화를 수행하게 된다. 최적화가 완료된 블레이드 형상정보를 Excel 파일 형식으로 저장하고 블레이드 성능해석을 위해 공력데이터를 Viterna가 제시한 외삽법(extrapolation)을 적용하여 획득하게 된다. 공력데이터에 기반하여 블레이드 출력 및 추력성능 계수를 계산하고 이에 따른 출력곡선을 산출하게 된다. 출력곡선은 정격 풍속 조건 이후 영역에 대하여 정격출력을 유지하는 방식을 도입하였으며, 출력을 유지하기 위해 필요한 로터토크와 회전속도를 데이터시트로 제공하게 되며, 프로그램 탭(tab)상에서 확인할 수 있도록 풍속에 대한 그래프로 나타나게 하였다.

최종적으로 사용자가 얻는 데이터는 최적화된 블레이드 형상정보, 로터의 출력곡선, 정격출력을 유지하기 위한 토크 및 회전속도 스케줄 및 연간발전량이며, 각각의 파일은 엑셀파일 형식으로 저장된다.

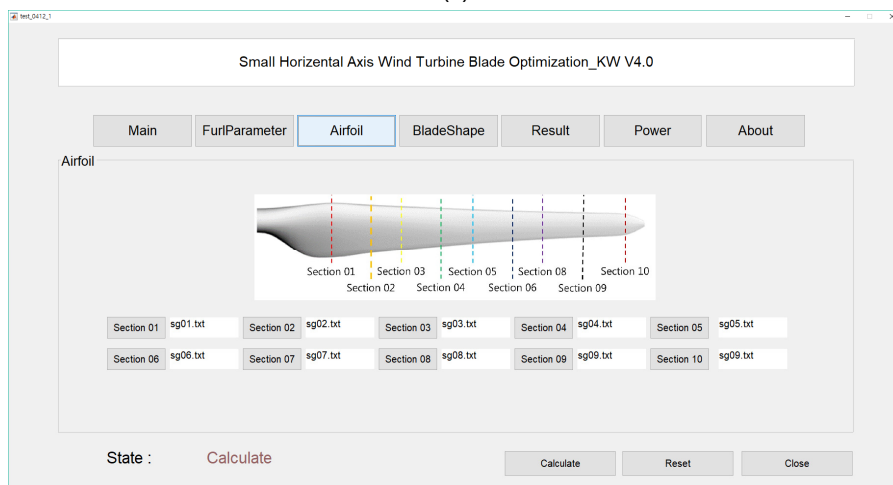
2.2 그래픽유저인터페이스



(a)

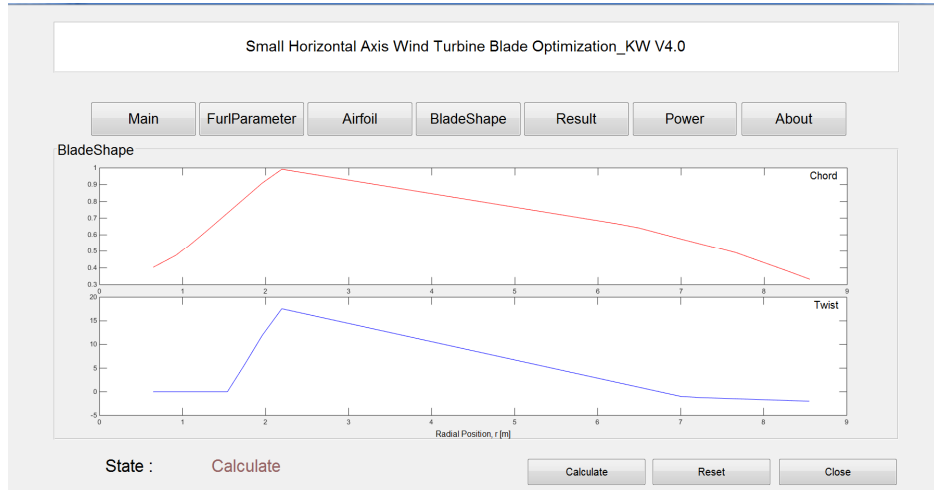


(b)

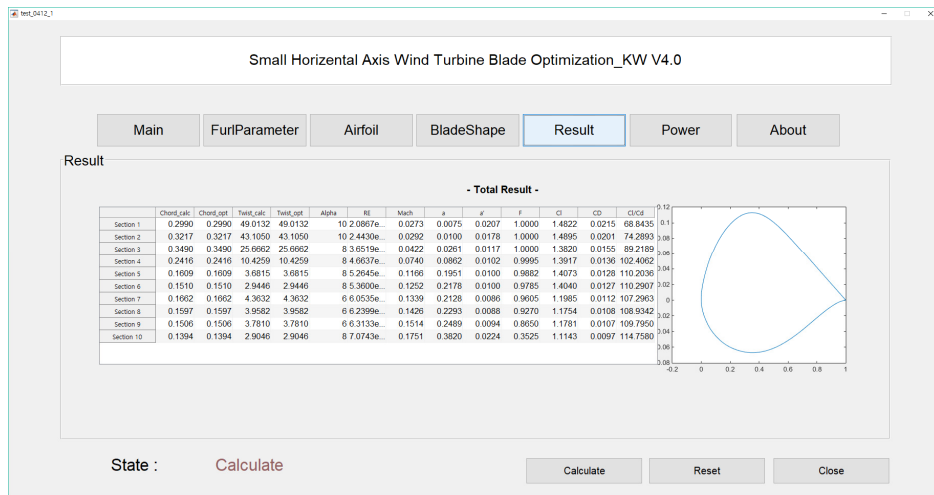


(c)

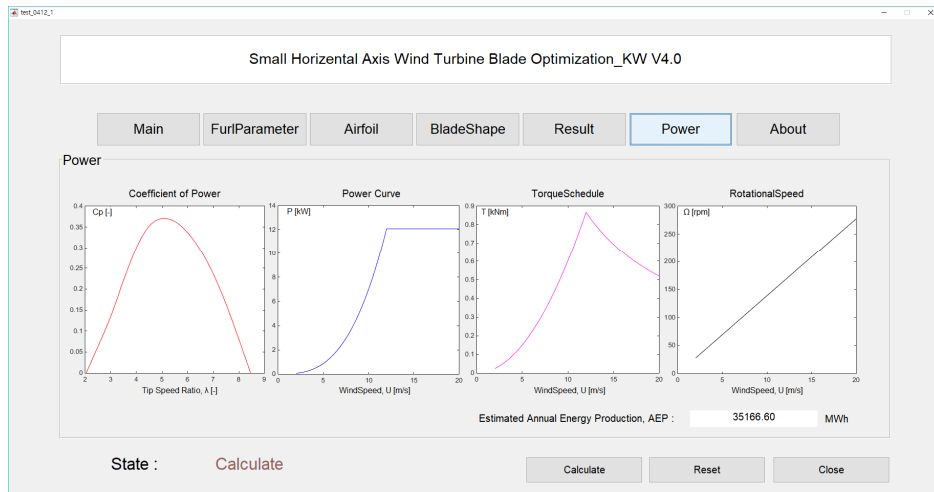
Fig. 2 Graphic user interface of developed program (a) Main tab, (b) FurlParameter tab, (c) Airfoil tab, (d) BladeShape tab, (e) Result tab, (f) Power tab



(d)



(e)



(f)

Fig. 2 Graphic user interface of developed program (a) Main tab, (b) FurlParameter tab, (c) Airfoil tab, (d) BladeShape tab, (e) Result tab, (f) Power tab (Continued)

Fig. 2는 최적화 및 성능예측 알고리즘을 사용자가 쉽게 구동할 수 있도록 매트랩 환경에서 구성된 그래픽 유저 인터페이스의 일부를 나타내고 있다. 각각의 탭(tab)에서는 최적화에 필요한 정보를 입력하거나 최적화 결과를 확인할 수 있다.

메인(Main)탭에서는 블레이드 공력설계 및 성능해석에 필요한 인자를 입력할 수 있으며, 펄링파라미터(FurlParameter)탭에서는 출력제어방법을 사이드 펄링으로 설정하였을 경우 펄링 해석을 위한 형상정보를 입력할 수 있다. 익형(Airfoil)탭에서는 블레이드 섹션에 배치될 익형을 선정할 수 있으며, 블레이드 형상(BladeShape)탭에서는 최적화를 수행 블레이드의 형상정보를 가시화하여 도시하고 있다. 결과(Result)탭에서는 각각의 섹션 최적 설계에 따른 결과 값을 표로 제시하고 있으며, 파워(Power)탭은 블레이드 출력계수를 계산하고 이에 따른 출력곡선을 도시하여 사용자가 확인할 수 있게 하였다. 또한 토크(Torque)탭에서는 성능해석 결과 산출된 최적의 출력과 토크 및 회전속도 스케줄과 함께 연간발전량을 수치적으로 나타내고 있다.

3. 블레이드 공력설계 이론

본 연구에서는 익요소운동량이론(Blade element momentum theory)^{10,11)}에 기반을 두어 블레이드 형상을 최적화하고 성능을 예측하였다.

3.1 블레이드 비틀림각의 결정

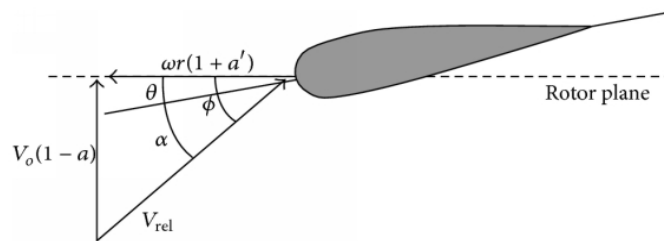


Fig. 3 Wind speed components acting on blade section¹⁰⁾

Fig. 3은 블레이드를 구성하고 있는 수많은 섹션 중 일부분에 작용하는 바람의 속도성분을 도시하고 있다. Fig. 3에서 V_0 는 로터 회전면적(swept area)에 작용하는 풍속이며, ωr 은 반경방향 r 지점에서 블레이드 회전 ω 에 의해 발생된 속도 성분을 나타낸다.

여기서 V_{rel} 을 상대속도(relative velocity)라고 한다. 이때 상대속도와 로터 회전평면이 이루는 각을 유입각(inflow angle, ϕ)이라고 하며, 블레이드 섹션에서의 받음각(α)과의 관계를 통해 최적의 비틀림각(twist angle, β)을 산정할 수 있다^{10,11)}.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_0(1-a)}{\omega r(1+a')} \quad (1)$$

$$\beta = \phi - \alpha \quad (2)$$

최대양향비 조건에서 최적화를 수행할 경우 섹션 익형의 최대 양향비가 나타나는 받음각을 식 (2)에 적용하여 섹션의 비틀림각을 계산하게 된다. 또한 실속을 통한 출력제어를 목적으로 하는 블레이드 형상 최적화의 경우 섹션의 최대 양력계수가 나타나는 받음각(임계 받음각)을 기준으로 블레이드 비틀림각을 계산하게 된다. 이 경우 정격풍속 이상에서는 블레이드 회전속도를 일정하게 유지하기 위한 토크제어가 가능한 상태여야 하며, 풍속이 증가할 때 블레이드 회전속도의 변화가 없기 때문에 익형에서의 받음각은 더 증가하며 따라서 실속현상이 발생하게 된다.

3.2 블레이드 시위길이의 결정

로터 회전면적에 대한 블레이드 면적의 비인 솔리디티(solidity, σ)의 관계를 통해 섹션의 시위길이를 계산할 수 있으며, 이때 블레이드 익단에서 발생하는 와류를 고려하여 손실계수(tip loss factor, F)를 도입하여 다음 식 3과 같이 나타낼 수 있다^{10,11}.

$$c(r) = \frac{8RF\pi ar \sin^2 \phi}{(1-a)BC_n \lambda} \quad (3)$$

C_n 은 블레이드 섹션에 유입된 공기의 흐름에 의해 발생된 하중을 나타내는 계수로 섹션을 바람방향, 즉 터빈 뒤쪽으로 미는 힘을 나타내며, C_t 는 로터 섹션에서 발생하는 회전방향의 힘이다^{10,11}.

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (4)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (5)$$

한편, 사용자가 임의로 설정한 최적화를 진행할 경우 단순한 직선형상의 블레이드를 결과로 제시하며, 이때 시위길이는 식 (3)에 의해 결정되는 것이 아닌 사용자가 임의로 설정한 시위길이를 통해 결정하게 된다.

3.3 성능계수 산출

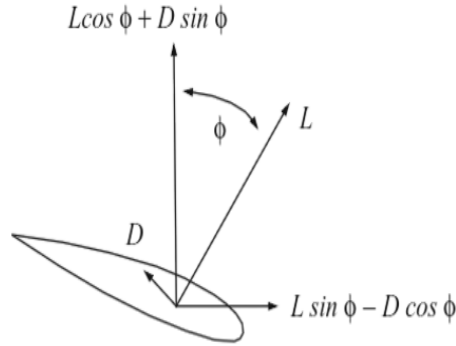


Fig. 4 Forces acting on blade local section^{10,11)}

Fig. 4는 블레이드 국부 섹션에서 바람에 의해 발생하는 힘들의 성분을 간략히 도시하고 있다. 블레이드 섹션에서는 크게 양력과 항력에 의해 블레이드를 회전시키는 힘과 뒤로 미는 힘이 발생하게 되는데, 이때 블레이드 출력은 로터를 회전시키는 토크와 회전속도의 관계로 기술 할 수 있다.

블레이드 출력계수는 블레이드에서 발생하는 출력과 이상적인 로터의 출력의 비율을 나타낸다. 블레이드의 출력은 국부 섹션에서 발생하는 접선방향의 힘(f_T)과 거리에 의해 계산되는 토크와 회전속도의 관계를 통해 산출할 수 있으며, 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 전체 로터에서 발생하는 출력은 국부 섹션에서 산출된 블레이드 출력을 반경방향으로 적분하여 얻을 수 있으며 이를 이상적인 조건의 로터(무한한 매수의 블레이드를 갖는 로터) 출력으로 나누어 출력계수를 계산해낼 수 있다(식 (7))¹⁰⁾.

$$dP = \Omega r f_T dr \tag{6}$$

$$C_P = \frac{B\Omega \int f_T \times r dr}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \tag{7}$$

출력계수와 동일한 원리에 기반하여 블레이드에 작용하는 추력을 나타내는 추력계수를 산출할 수 있다. 블레이드 섹션을 뒤로 미는 힘을 반경방향으로 적분하여 추력을 계산하고 이를 이상적인 로터의 추력으로 나누어 다음 식 8과 같이 추력계수를 산출할 수 있다.

또한 선단속도비 변화에 따른 블레이드 출력 및 추력계수의 변화에 관한 데이터를 얻기 위해 본 연구에서는 사용자가 설정한 정격풍속 영역에서 로터회전속도를 변화시켜가며 성능데이터를 계산하도록 알고리즘을 구축하였다¹⁰⁾.

$$C_T = \frac{B \int f_N dr}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (8)$$

또한 블레이드의 성능계수를 계산하기 위해서는 전범위 받음각에 해당하는 섹션의 공력데이터가 필요하다. 하지만 본 연구에 적용된 익형해석 프로그램인 Xfoil은 실속 이전 영역의 데이터만을 얻을 수 있기 때문에 Viterna가 제시한 외삽법(extrapolation)을 적용해 모든 범위의 받음각에 대한 공력데이터를 획득하였다¹²⁾.

3.4 과풍속 출력제어방법과 최적 토크스케줄

본 연구에서는 사용자가 설정한 과풍속 제어방법에 따라 최적의 토크스케줄을 산출하도록 알고리즘을 구성하고 있다. 사용자가 설정할 수 있는 출력 제어방법으로는 로터 및 발전기의 토크를 이용한 출력제어 방법과 사이드 펄링시스템을 이용한 방법이 적용되어있다.

토크를 이용한 방법을 설정할 경우 정격풍속 이후 구간에서 출력을 정격출력으로 제한하며, 이때 풍속에 대응되는 토크와 회전속도를 산출하게 된다. 풍속별 토크 및 회전속도는 Nelder-Mead의 함수최소화 알고리즘에 의해 산출된 출력계수를 $C_p - \lambda$ 곡선상에서 보간법을 적용해 산출된 선단속도비를 통해 계산하게 된다. 또한 출력과 토크의 관계를 통해 최적의 회전속도를 얻을 수 있다.

펄링시스템을 과 풍속 제어방법으로 선정할 경우 펄링시스템에 필요한 기하형상정보를 입력받아 수립된 간략화 수치모델을 통해 정상상태임을 가정하여 시스템 성능을 예측하게 된다. 예측 결과로는 출력과 나셀 요잉(Yawing) 및 테일 붐의 펄링(Furling)이 있으며, 산출된 출력곡선에 기반을 두어 언급된 토크를 사용한 제어방식과 동일한 최적 토크스케줄 산정 알고리즘을 거쳐 최적의 토크 및 회전속도를 제시하게 된다.

3.5 펄링시스템 모델

본 연구에서는 Fig. 5에 나타난 인자들을 대상으로 시스템 수치모델을 수립하였다. 수치 모델은 NREL에서 수행된 소형 풍력터빈에 관한 보고서에 제시된 수식 중 유체의 점성마찰 등의 요인을 배제하고, 간략화한 모델을 적용하였으며, 테일 핀 및 붐에 관한 수식은 시스템의 기하적 형상특성을 고려하여 수립하였다. 또한 펄링시스템이 적용된 풍력터빈의 경우 바람을 입력으로 볼 때, 이에 대한 시스템 응답특성 중 과도 구간이 크게 나타나게 된다. 즉, 나셀 및 테일 붐이 정상상태의 위치에 오기까지 소요되는 시간이 상대적으로 크게 나타나며, 본 연구에서는 이러한 특성을 배제한 정상상태만을 고려하였다.

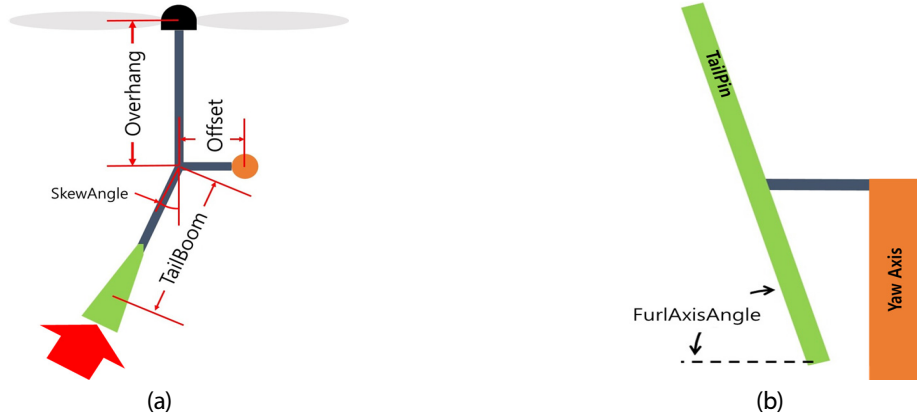


Fig. 5 Tail furling configuration properties of Excel 10. Top view of turbine (a), Tail geometry (b)

펄링시스템을 예측하기 위해서 가장 먼저 선행되어야 할 내용은 불어오는 바람에 의해 테일 붐이 접혔는지 여부를 확인하는 것이다. 즉, 펄링이 이루어진 상태인지를 확인하는 것이 가장 중요하며, 다음과 같이 테일 핀으로부터 발생하는 힘의 수직성분과 테일을 구성하고 있는 붐과 핀의 무게의 관계를 통해 정의할 수 있다.

$$(F_{lift}\sin\zeta + F_{drag}\cos\zeta)\cos\gamma - m_{tail}g = 0 \quad (9)$$

여기서 ζ 는 테일 핀으로 입사되는 풍속의 받음각을 의미하며, 펄링이 이루어지지 않은 경우는 나셀의 요잉각으로 대체된다. 또한 F 는 테일에서 발생하는 항력과 양력을 의미하며, m_{tail} 은 테일을 구성하는 요소들의 질량이고 γ 는 테일 축이 비틀어져 있는 각도인 Furl Angle을 나타낸다. 나셀의 요잉을 발생시키는 모멘트는 바람이 로터 회전면적을 밀어내는 힘과 요잉 축과 로터 중심의 수직거리를 통해 정의할 수 있으며 다음과 같다.

$$F_{T,rotor} = \frac{1}{2}\rho A V^2 C_T \quad (10)$$

$$M_{rotor} = F_{T,rotor} \times d_{offset} \quad (11)$$

식 (11)에서 d_{offset} 은 로터 회전중심과 요잉축의 수직거리이다. 여기서 주의해야할 부분은 나셀의 요잉이 발생한 경우 식 (10)의 풍속은 요잉이 이루어진 각만큼 보상이 필요하게 되며, 식 (10)을 다음과 같이 다시 정의할 수 있다.

$$F_{T,rotor} = \frac{1}{2}\rho A (V\cos\theta_{yaw})^2 C_T \quad (10)$$

나셀의 요잉은 로터의 추력과 함께 테일에서 발생하는 모멘트에 의해 발생하게 된다. 따라서 테일핀에서 발생하는 공기역학적 힘을 정의할 필요가 있으며, 요잉 축과 테일 핀까지의 거리를 이용해 테일 모멘트를 계산할 수 있다.

$$F_{Pin} = (F_{lift} \sin \zeta + F_{drag} \cos \zeta) \sin \gamma \quad (12)$$

$$M_{Pin} = F_{Pin} \times (d_{TailBoom} + d_{Offset} \sin \delta) \quad (13)$$

모멘트를 계산하기 위해 적용된 길이는 테일부의 길이와 펄링각(δ)을 고려한 오프셋길이의 합을 통해 정의할 수 있다. 또한 테일 핀에 입사되는 바람의 받음각은 테일 붐이 접힌 펄링각과 로터 수평면상에서 펄링 축이 기울어진 각도인 Skew 각(ψ)를 통해 다음과 같이 정의할 수 있으며, 앞서 식 (9)와 (12)에 적용할 수 있다.

$$\zeta = \delta_{furl} - \psi_{skew} \quad (14)$$

앞서 간략화된 모델로 수립된 수식들을 통해 시스템의 정상상태 해석을 수행하기 위해 반복적인 계산을 통해 수렴 값을 찾는 방법을 적용하였으며, 테일과 로터에서 발생하는 모멘트의 합이 요잉 축에서 0이 되는 조건을 적용하여 정상상태 해석을 수행하게 된다.

3.6 연간발전량 예측

또한 터빈 제작하고 운영하는 부분에 있어 연간 출력성능은 매우 중요한 지표가 될 수 있는데, 본 연구에서는 사용자가 임의로 설정한 지역의 와이블변수로 최적화가 수행된 로터의 연간발전량을 예측하여 제시하고 있다¹¹⁾.

$$AEP = \sum f(V) \times P(V) \times 8760 \quad (15)$$

4. 프로그램 검증

선행연구로 구축된 블레이드 최적 토크스케줄 및 성능해석 알고리즘은 널리 알려진 익요소운동량 이론에 기반을 두고 있어 그 신뢰성과 정확도를 검증할 수 있었다¹³⁾. 따라서 본 연구에서 새롭게 제시하고 있는 사이드 펄링시스템의 성능 예측알고리즘과 최적 토크스케줄 산출 알고리즘을 검증하기 위해 NREL에서 제공하고 있는 상용프로그램인 FAST를 적용하여 비교 검증을 수행하였으며, 검증대상은 사이드펄링을 출력제어방법으로 채택하고 있는 상용터빈으로 선정하였다. 자세한 제원은 다음 Table 1과 같으며, 비교를 위해 동일한 형상을 정의

하였다. 또한 FAST의 모델과의 비교를 위해 정상상태의 데이터만을 비교 검증에 사용하였다.

Table 1 Specifications of "B" turbine¹⁴⁾

Subjects	Unit	Specification
Blade number / length	ea / m	3 / 3.2
Rated Condition	m/s / kW	13 / 10

4.1 블레이드 형상비교

Table 1에 명시된 상용블레이드 터빈의 제원으로 모델링된 블레이드 형상은 다음 Fig. 6과 같다.

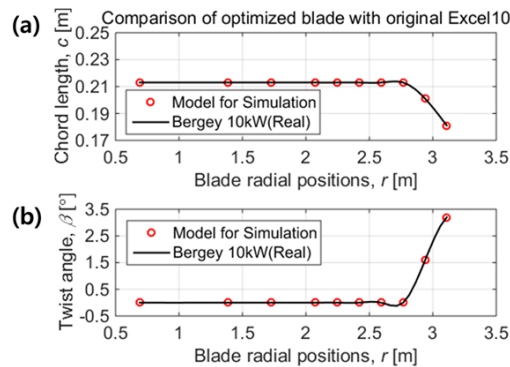


Fig. 6 Comparison of optimized blade shape and reference turbine blade, chord length (a), twist angle (b)

또한 블레이드는 모든 섹션에 대하여 동일한 SH3052 익형이 적용된 블레이드이며, 적용된 익형의 설계조건에서 공력특성은 다음 Fig. 7과 같다. 익형의 공력성능은 본 프로그램의 메인 엔진으로 사용된 Xfoil을 통해 산출되었다.

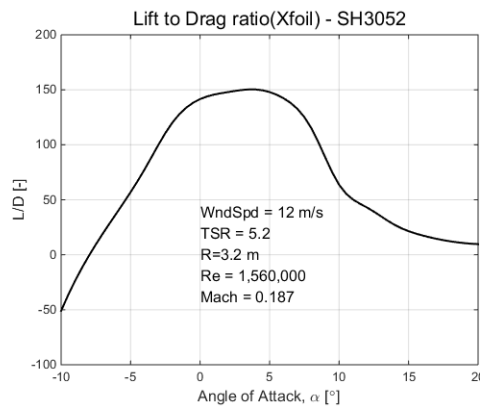


Fig. 7 Aerodynamic performance of SH3052 airfoil of Excel 10 turbine

4.2 블레이드 성능비교

블레이드 및 시스템의 성능을 예측하기 위해 펄링 시스템이 고려된 출력을 산출하여 해석의 정확도와 신뢰성을 검증하였다. 검증을 위해 사용된 비교 데이터는 NREL에서 제공하는 FAST모델링^{15,16)}이 적용되었으며, 채용된 데이터는 시스템 출력, 토크스케줄 및 풍속에 대응되는 회전속도 스케줄이다. 또한 발전기와 인버터 및 기계적 효율을 모두 포함한 효율은 문헌에서 제시된 0.82를 적용하였다.

해석결과 출력계수와 출력에 대한 비교는 Fig. 8에 제시되었다. 정확한 출력성능을 예측하기 위해 비교 검증에 사용된 해석은 FAST 시뮬레이션과 동일한 토크스케줄을 적용하였으며, 적용된 토크스케줄은 Fig. 9(a)는 시스템 응답특성 중 요잉 각도에 대한 도표으로, 기존 NREL 문헌상에 제시되어 있지 않아 동일한 파라미터로 모델링되어 수행된 시뮬레이션 결과이다. 해석 결과 동일한 조건하에 출력과 회전속도가 유사한 경향성을 보이는 것을 확인하였으며, Fig. 10를 통해 펄링(Furling)각과 요잉(Yawing)각 역시 유사한 경향성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 프로그램의 정확도와 신뢰성을 검증할 수 있었다.

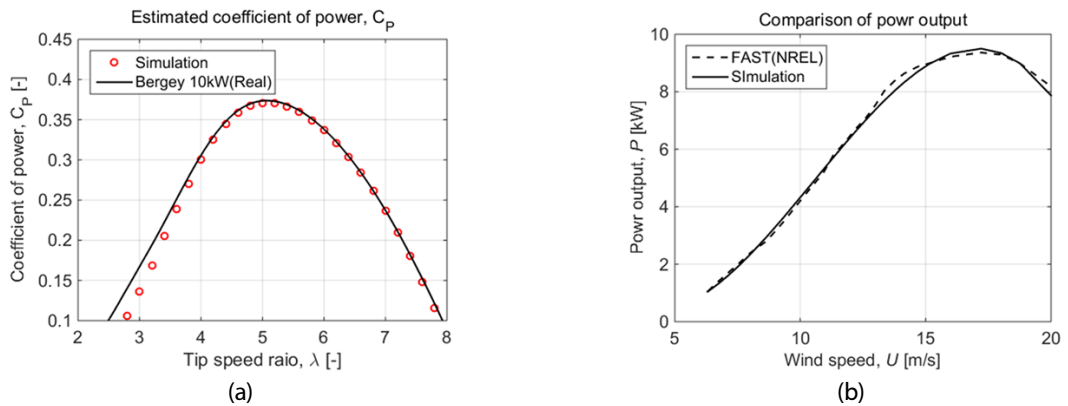


Fig. 8 Comparison of coefficient of power (a) and power output (b)¹⁵⁾

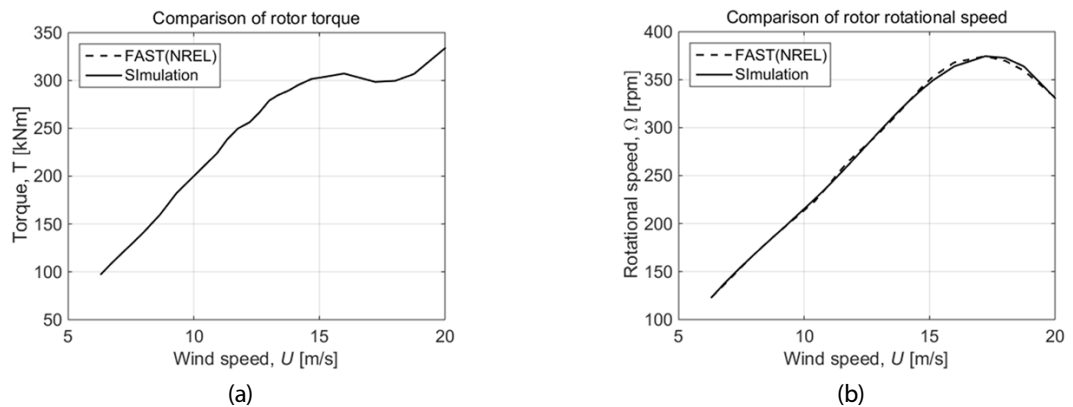


Fig. 9 (a) Torque schedule for comparison, (b) Comparison of rotor rotational speed schedule corresponded to wind speed

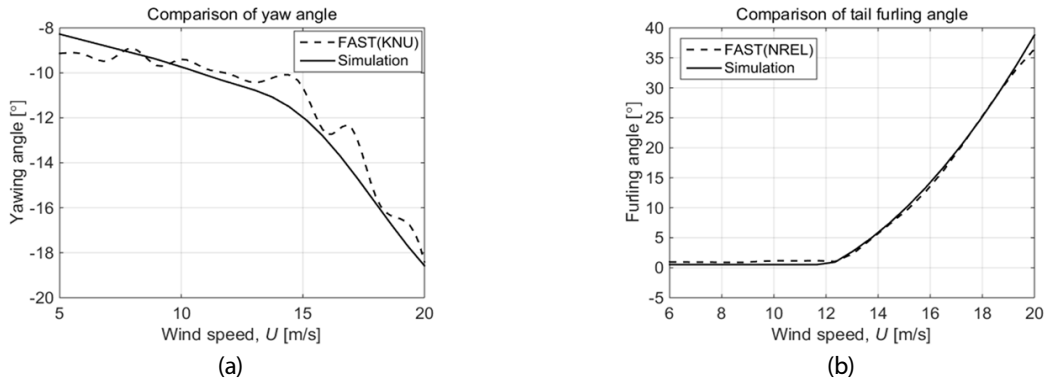


Fig. 10 Comparison of turbine yawing angle (a) and tail furling angle (b)¹⁵⁾

4.3 시스템 최적 토크 및 회전속도 스케줄

앞서 비교 검증을 수행한 케이스를 살펴보면 해당 토크스케줄을 적용하는 경우 표 1에 명시된 정격출력에 도달하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 출력성능을 개선시키기 위해 본 연구에서 함께 구축된 최적 토크스케줄 예측알고리즘을 적용하였다. 적용결과 Fig. 11(a)에 제시된 바와 같이 이전 토크스케줄에 비해 토크가 증가하는 스케줄을 얻었으며, 해당 토크스케줄을 적용하게 되는 경우 Fig. 11(b)에 제시된 바와 같이 로터 회전속도가 이전 모델에 비해 감소되는 것을 알 수 있다. 최적의 토크 및 회전속도 스케줄 결과를 적용하는 경우에 대한 출력성능은 Fig. 12에 제시하였다. Fig. 12를 살펴보면 풍속 증가에 대해 기존 출력성능 대비 최적 토크스케줄이 적용된 출력성능을 보여주고 있다. 또한 최적 토크스케줄 적용 후 정격풍속이 13 m/s로 감소되었으며 정격출력 값이 10 kW에 도달함을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 블레이드 및 시스템의 기계적인 특성만을 고려하여 최적의 토크스케줄을 산정하였다. 따라서 전류와 전압으로 대치되는 토크와 회전속도가 기존 시스템의 발전기 및 인버터 등과 같은 요소 부품들과의 호환이 가능한지 여부를 판단할 수 없다는 한계점을 갖는다. 따라서 실제 시스템의 최적 토크스케줄을 산출하는 경우에 계산을 통한 토크와 회전속도가 부품 요소들의 전류와 전압 허용 범위에 있는지를 확인해야 할 필요가 있다.

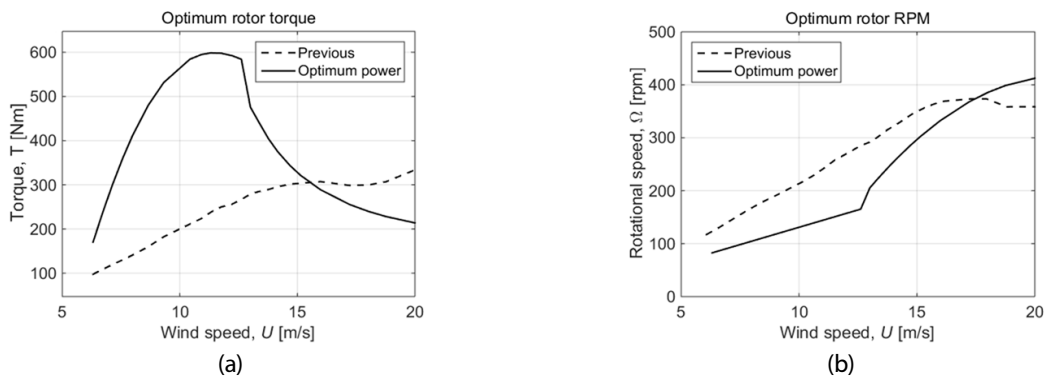


Fig. 11 Comparison of torque schedule (a) and rotational speed schedule (b) between optimized torque schedule and previous

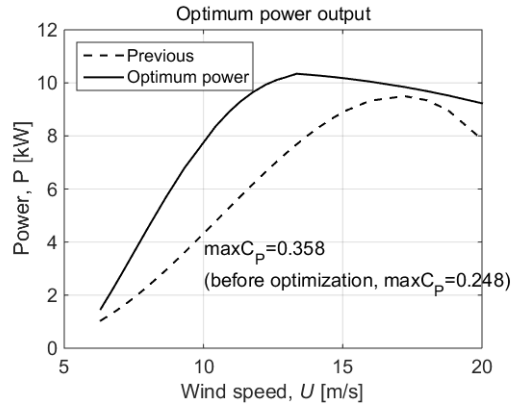


Fig. 12 Comparison of power output between optimized torque schedule and previous

5. 결론

본 연구에서는 소형 풍력 블레이드의 최적설계와 사이드 펄링 과풍속제어를 포함한 정상상태 성능해석이 가능한 GUI 기반 매트랩 프로그램을 개발하였다. 해당 프로그램은 익요소 운동량 이론에 기반하고 있으며, 레이놀즈 수 변화에 따른 공력성능 변화를 계산하기 위해 X-foil 프로그램을 연동하도록 개발되었다. 또한 프로그램의 성능 검증을 위해 상용 10 kW 풍력터빈을 대상으로 FAST 해석 결과와의 비교를 수행하였으며, 검증 결과 FAST 해석 결과와 매우 유사함을 확인하였다. 또한 본 프로그램의 토크스케줄 최적화를 통해 대상 풍력터빈의 토크스케줄을 수정하였으며, 수정된 최적 토크스케줄을 적용하게 되는 경우 기존 10 kW 풍력터빈의 출력성능 보다 향상된 출력성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 하지만 본 연구에서 제시된 프로그램의 최종 검증을 위해서는 사이드 펄링 시스템이 구현된 소형 풍력터빈의 출력 성능시험결과와의 비교분석이 필요하기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구입니다(No. 20154030200950, 20153030023610). 본 논문은 장현무의 석사학위논문을 바탕으로 작성되었습니다.

REFERENCES

1. World Energy Council, Wind Energy Resources 2016, 2016.
2. Korean Agency for Technology and Standards, KS C 8570 : 2015 Small wind turbine, 2015.
3. Small Windturbine Engineering Center of Kangwon National University, Backgrounds of technical development enterprise for small windturbine engineering, http://winteam.kangwon.ac.kr/index.php?mp=4_2, accessed 2017-08-10.

4. Yoon, J. Y., Paek, I. S., and Yoo, N. S., Development of an aerodynamic design program for a small wind turbine blade, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 1, pp. 40-47, 2013.
5. Yoon, J. Y., A Study on the aerodynamic blade design and verification for small horizontal axis wind turbines, Master dissertation, Kangwon national university, 2013.
6. Kim, Y.J., Al-Abadi, A., and Delgado, A., Strategic blade shape optimization for aerodynamic performance improvement of wind turbines, ASME Turbo Expo 2016, Jun. pp. 13-17, 2016.
7. Joseph, S., Juliane, P., David, M., George, P., Christian, O. P., and David, G., Aeroelastic Simulation of Multi-MW Wind Turbines Using a Free Vortex Model Coupled to a Geometrically Exact Beam Model, Journal of Physics : Conference Series 753, 2016.
8. Jonkman J. M. and Buhl, M. L., Fast User's Guide, NREL, 2005.
9. Anflux, Omega softWT, <http://www.anflux.com>, accessed 2017.11.5.
10. Hansen, M. O. L., Aerodynamics of Wind Turbines 2nd Ed., Earthscan, London, 2008.
11. Manwell, J. F., MCGowan, J. G., and Rogers, A. L., Wind energy explained-Theory, Design and Application, WILEY, London, 2002.
12. Viterna, L. A. and Corrigan, R. D., Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines, NASA Lewis Research Center, 1982.
13. Bergey Windpower, Excel 10 kW Specification Sheet, Bergey, USA, 2011.
14. Jonkman, J. M. and Hansen, A. C., Development and Validation of an Aeroelastic Model of a Small Furling Wind Turbine, NREL/CP-500-39589, 2004.
15. Corbus, D., Meadors, M., Small Wind Research Turbine – Final Report, NREL/TP-500-38550, 2005.
16. Jang, H.M., Kim, D. M., and Paek, I. S., An Aerodynamic Design of Small Wind Turbine Blade based on Low-tip Speed Ratio Optimization, The Korean Society for New and Renewable Energy 2017, p.135, Sept 06, 2017.