

## 2.5MW급 블레이드 설계 및 전산해석에 관한 연구

염슬기  
국방기술진흥연구소

### A Study on the Design and Computational Fluid Dynamics Analysis of 2.5MW Blade

Seul-Ki Yeom

Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement

**요약** 국내에서는 한정적인 자원으로 장기적인 관점에 고갈되어 가기 때문에 대체자원에 대한 관심이 높아지고 있다. 신재생에너지 중에서 풍력에너지에 대한 연구 및 제도가 시행되고 있다. 10kw급과 같은 소형에서부터 20MW급의 대형 해상풍력발전기까지 지속적으로 개발되고 있다. 풍력발전기 블레이드의 설계를 위해 BEM 이론을 통한 공력설계, 수직축 및 수평축 블레이드 설계, 실제 풍력시험을 통한 공력성능 검증, GH-Bladed를 통한 시스템적 해석 등을 연구해왔다. 본 논문에서는 NREL 5MW급 풍력발전기 시스템에 적용된 에어포일 시리즈를 선정하여 2.5MW급 수평축 풍력발전기 설계를 진행하였다. 블레이드의 기본적인 설계를 위해 Blade Element Momentum(깃 요소) 이론을 적용하였으며, 블레이드 길이와 정격 회전속도를 통해 각 코드길이와 비틀림 각을 설정하였다. 이 때 에어포일은 DU시리즈와 NACA64-618을 적용하여 두께분포에 따라 구성하였다. 이를 3D 프로그램인 CATIA로 블레이드 한쪽 날개를 설계한 뒤 ANSYS Fluent를 통해 전산유체해석을 진행하였다. 전체 유동장은 점성 비압축성 Navier-stokes를 적용하고, 난류 모델은 정상상태로 Spalart-allmaras를 적용하였다. 유동해석의 시간을 줄이기 위해 서로 다른 좌표계들을 이용하여 블레이드 회전을 고려하는 Multiple Reference Frame(MRF)을 통해 진행하였다. 해당 해석기법을 통해 한 개의 블레이드 값으로 블레이드 전체의 값을 도출하였다. 그 결과, 정격회전속도인 12.17rpm에서 약 2.6MW급 출력을 나타내었다. 이를 통해서 각 요소들을 통해 정격출력에 도달함을 확인하였다.

**Abstract** In South Korea, interest in alternative resources is increasing as they are depleted from a long-term perspective with limited resources. Research and systems for wind energy are being implemented as new and renewable energy. Wind energy is continuously being developed from a small size such as the 10-kW class to large offshore wind power generators of the 20-MW class. For the design of wind turbine blades, aerodynamic design has been studied through blade element moment theory, vertical and horizontal axis blade design, aerodynamic performance verification through wind tests, and systematic analysis through GH Bladed. In this study, an airfoil series applied to an NREL 5-MW wind power generator system was selected, and a 2.5-MW horizontal axis wind power generator was designed. For the basic design of the blade, blade element moment theory was applied, and each cord length and twist angle were set through the blade length and rated rotational speed. The airfoil was constructed according to the thickness distribution by applying the DU series and NACA64-618. After designing one wing of the blade with the CATIA 3D program, computational fluid analysis was conducted through the ANSYS Fluent program. The entire flow field was applied with viscous incompressible Navier-Stokes equations, and the Spalart-Allmaras turbulence model was applied in a normal state. In order to reduce the time for flow analysis, it was conducted through multiple reference frames (MRFs), which consider blade rotation using different coordinate systems. Through this analysis technique, the value of the entire blade was derived with one blade value. As a result, the output was about 2.6 MW at a rated rotation speed of 12.17 rpm. It was confirmed that the rated output was reached through each element.

**Keywords** : BEM Theory, Airfoil, Blade, Wind Turbine, CFD

\*Corresponding Author : Seul-Ki Yeom(Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement)  
email: starblue89@naver.com

Received July 17, 2023

Revised August 8, 2023

Accepted August 10, 2023

Published August 31, 2023

## 1. 서론

국내에서 석유자원의 고갈로 대체에너지에 정책의 시향이 높아지고 있다. 이에 따라 신재생에너지 중 풍력에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 위치에 따라 높은 고도에 설치하는 육상풍력발전기뿐만 아니라 해상풍력발전기도 상용화되었다. 해상풍력발전은 설치 여건에 따라 하부구조물에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[1,2]. 출력에 따라 10kW급 소형풍력발전기에서 2MW, 5MW, 8MW급 대형풍력발전기와 20MW급 해상풍력발전기로 점점 대형화 및 고효율화 되고 있다[3-6]. 특히 해상에 설치하는 풍력발전기는 광활한 바다에 설치하기 때문에 지상보다 고밀도 대 단지를 형성할 수 있어 발전 효율이 커지는 장점이 있다.

풍력발전기는 일반적으로 회전축 방향에 따라 수평축과 수직축으로 나눌 수 있다. 수평축은 블레이드의 전 범위의 피치제어가 가능하여 우수한 출력특성을 보인다. 또한, 높은 타워를 설치함으로써 난류의 영향을 적게 받기 때문에 풍속이 낮은 지역에서 좋은 풍황 자원을 얻을 수 있다. 수직축에 비해 설치면적이 적기 때문에 대부분 수평축 풍력발전기를 설치한다. 수직축 풍력 발전기는 저소음의 효과로 다양한 연구를 진행하고 있다[7,8].

앞으로 점점 더 고효율화 되기 위해서는 각 시스템에 대한 연구가 필요하다. 그 중 풍력발전기의 블레이드는 전체적인 시스템의 성능향상을 위해서 기초적인 부분이다.

본 연구에서는 2.5MW급 수평축 풍력발전기 블레이드 설계를 수행하였다. 풍력발전기의 블레이드는 풍력터빈의 타워에 거치되어 바람의 운동에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 주는 부품이다. 자연상태의 바람(공력)이 블레이드를 회전시키며, 회전력을 이용하여 블레이드에서 발전기로 전달되어 전기가 발생하게 된다. 블레이드 설계를 위해 사용된 에어포일은 실험데이터를 확보하기 쉽고 NREL 5MW급 풍력발전기 시스템에서 검증된 에어포일 시리즈를 선정하였다. 이를 바탕으로 전산유체를 통한 블레이드 공력성능 평가를 수행하고 목표출력에 대한 검증과 유동장에 대한 연구를 진행하였다. 전산유체해석은 대표적으로 적용하고 있는 ANSYS FLUENT를 사용하였으며, 현재까지는 해당 프로그램이 3차원 CFD 해석기법을 최적화된 해석이 가능하다.

## 2. 블레이드 설계

### 2.1 설계제원

블레이드를 설계하기에 앞서 블레이드 익형을 선정하였다. NREL 5MW 풍력발전기 블레이드 설계에 사용되었던 DU시리즈와 NACA64-618 에어포일을 토대로 설계하였다. NREL 5MW 풍력발전기 블레이드 설계에 사용되었던 에어포일은 블레이드 반경 임의의 위치에서 코드 두께비에 따른 양항비가 우수하며, 대형 풍력발전기 블레이드 설계에 적용시키기 위해서 현재까지 많은 연구로 증명되어 있기 때문에 이를 활용하였다. Fig. 1과 같이 각각의 에어포일 두께 분포는 적게는 18% 많게는 40%로 구성되어 있다.

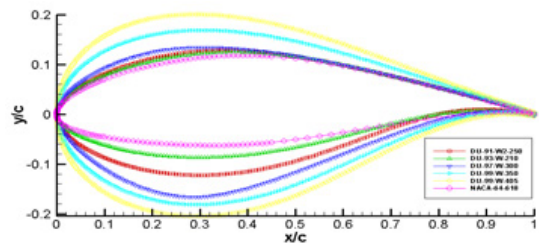


Fig. 1. Airfoil shape of wind turbine blade

자세한 풍력발전기는 제원은 Table 1와 같이 설정하였다. 블레이드의 길이와 정격 회전속도를 설정한 뒤, 상세한 물성치를 얻기 위한 설계를 진행하였다.

Table 1. Main design parameters

| Section                | Spec.    |
|------------------------|----------|
| Rated power            | 2.5MW    |
| Design wind velocity   | 10m/s    |
| Cut-in wind velocity   | 3m/s     |
| Cut-out wind velocity  | 25m/s    |
| Blade radius           | 47.096m  |
| Blade number           | 3        |
| Rated rotational speed | 12.17rpm |
| Tip speed ratio        | 6        |
| Rotor orientation      | Upwind   |

### 2.2 BEM(Blade element Momentum)이론을 통한 블레이드 설계

풍력발전기 블레이드 설계를 위하여 BEM이론을 통하여 코드길이, 비틀림 각을 설정하였다. BEM이론은 블레이드 국부위치에서의 2차원 익형 단면의 공력특성인 양력과 항력을 바탕으로 익형 단면의 변화 등에 능동적으로 대처할 수 있으며, 전체적인 풍력발전기의 성능을 비교적 정확하게 예측할 수 있다[9,10].

Table 2. Wind turbine design flow chart

| r/R  | Radius | Chord length | Twist angle | Airfoil    |
|------|--------|--------------|-------------|------------|
| 0    | 0      | 2.50         | 25.00       | Cylinder   |
| 0.05 | 2.37   | 2.50         | 25.00       | DU40_A17   |
| 0.10 | 4.75   | 3.44         | 25.00       | DU40_A17   |
| 0.20 | 9.50   | 5.13         | 23.85       | DU40_A17   |
| 0.30 | 14.21  | 3.67         | 17.44       | DU35_A17   |
| 0.40 | 18.99  | 3.07         | 13.75       | DU30_A17   |
| 0.50 | 23.74  | 2.70         | 11.34       | DU25_A17   |
| 0.60 | 28.49  | 2.45         | 9.64        | DU25_A17   |
| 0.66 | 30.86  | 2.37         | 8.99        | DU25_A17   |
| 0.71 | 33.24  | 2.29         | 8.36        | DU21_A17   |
| 0.81 | 37.99  | 2.14         | 7.31        | NACA64_618 |
| 0.91 | 42.73  | 1.91         | 6.27        | NACA64_618 |
| 1.00 | 47.10  | 1.50         | 5.24        | NACA64_618 |

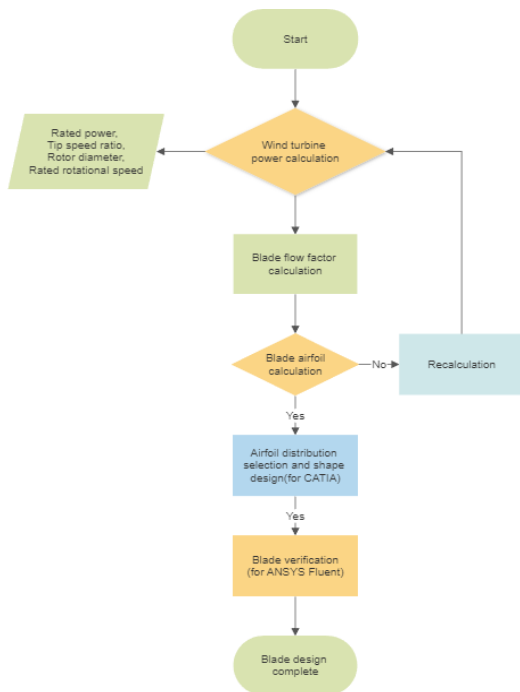


Fig. 2. Wind turbine design flow chart

블레이드는 스펠방향에 따라서 각각의 요소들로 나뉘어져 있다, 이를 통해 최적화된 블레이드 형상을 설계하였다. 블레이드 설계 시,  $r/R=0.25$ 이하의 영역에서는 구조적인 특성을 고려하여 비틀림각이 감소된다. Table 2과 같이 블레이드의 제원을 나타내었다.

### 3. CFD 유동해석

#### 3.1 해석격자 및 경계조건

본 연구에서는 설계된 2.5MW급 수평축 풍력발전기 블레이드에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 구성된 블레이드 및 전체 유동장에 대한 계산격자를 보이고 있다. 계산 격자는 ANSYS ICEM CFD을 통하여 생성하였다. Fig. 3에서 보는 것처럼 반경 R을 기준으로 inlet 부분은 약 3배, outlet 부분은 약 5배를 설정하였으며, 전체 격자 수는 약 400만 cell로 Hexahedral 격자로 구성하였다. 그리고 블레이드의 표면 압력이나 유동흐름을 잘 표현하기 위하여 O-gird를 사용하여 블레이드 주변에 격자를 집중적으로 주었다. 블레이드의 trailing edge 부분에 생기는 mesh quality 문제를 해결하기 위하여 블레이드 주위에 layer를 쌓았다.

Fig. 3에서는 입구영역은 속도경계조건으로서 일정한 유입속도를 설정하고, 출구영역은 압력경계조건으로서 일정한 압력을 설정하였다. 이 때, turbulence intensity and length scale(난류강도)에서 turbulent intensity는 0.03%, turbulent length scale은 0.0008382m로 설정하였다. 격자 수가 많으면 많을수록 해석시간은 비례적으로 증가하기 때문에 블레이드 영역과 주위 유동역은 interface 시키고 회전면에 대하여 periodic zone을 설정하여 하나의 블레이드를 계산하여도 3개의 블레이드 출력 값을 얻을 수 있다.

회전체에 대한 해석기법은 SRF(Single reference frame), MRF(Multiple reference frame), MPM(Mixing

plane model), SMM(Sliding mesh model), DMM(Dynamic mesh model) 등이 사용된다. 본 연구에서는 MRF 기법을 이용하여 수치해석을 진행하였다. 이 기법은 서로 다른 좌표계들을 이용하여 블레이드의 회전을 고려하는 방법으로 해석시간을 단축시키는 장점이 있다.

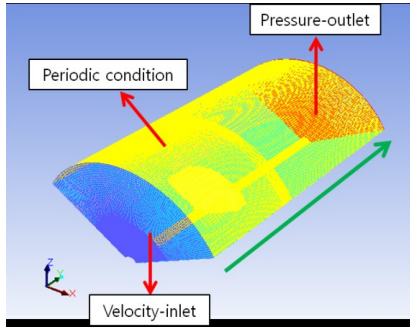


Fig. 3. Computational domain and boundary condition

블레이드 해석을 위하여 유입속도는 5m/s로 설정하고 회전속도를 5~12.17rpm까지 Table 3과 같이 설정하였다. 정격 회전속도 부근에서는 출력 값이나 유동흐름에 대한 변화를 관찰하기 위하여 1rpm씩 조절하였다. Tip speed ratio(끝단 속도비)는 Eq. (1)과 같이

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_{\infty}} \quad (1)$$

Where,  $\omega$  angular velocity, R blade radius,  $V_{\infty}$  inflow velocity

Table 3. Wind turbine design flow chart

|        | $V_i$ [m/s] | Rotational speed[rpm] | Tip speed ratio |
|--------|-------------|-----------------------|-----------------|
| Case 1 | 5           | 3                     | 2.959128952     |
| Case 2 | 5           | 5                     | 4.931881587     |
| Case 3 | 5           | 7                     | 6.904634222     |
| Case 4 | 5           | 9                     | 8.877386857     |
| Case 5 | 5           | 10                    | 9.863763174     |
| Case 6 | 5           | 11                    | 10.85013949     |
| Case 7 | 5           | 12.17                 | 12.00419978     |

### 3.2 적용모델

블레이드 유동해석을 위해 ANSYS FLUENT을 통하여 해석을 진행하였다. 난류모델은 정상상태로 Spalart-allmaras를 적용하였다. 이 모델은 free stream의 방향과 반대로 흐르는 유동의 해석이 가능하므로 박리 유동의 해석에 적합한 것으로 알려져 있으며, 계산 속도면에

서 기존의 Two-equation model과 비교해 보았을 때 월등한 수렴속도를 보여주고 있어 3차원 계산 시에 계산 시간의 단축효과를 기대할 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

Fig. 4에서는 블레이드 루트와 팁영역에서의 유선분포를 나타내고 있다. 블레이드 루트면에 부착된 흐름이 일정지점까지 박리되는 것을 볼 수 있다. 이 영역은 다른 영역보다 두께가 두껍기 때문에 나타나는 현상이다. 블레이드 팁 영역에서는 복잡한 유동이 일어나게 되는데 전체적으로 봤을 때 공력성능의 저하를 일으킨다.

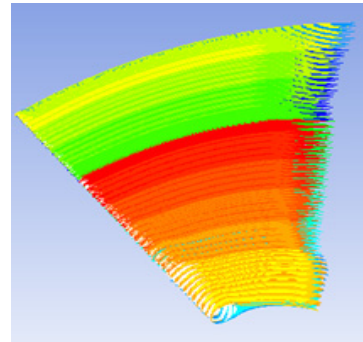


Fig. 4. Surface streamlines for rotational speed of 12.17rpm

본 연구에서는 설계한 2.5MW급 수평축 풍력발전기 블레이드에 대한 수치해석을 수행하였다. 그 결과로써, 회전속도에 따른 출력 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 정격 회전속도인 12.17rpm 일 때, 약 2.6MW의 출력을 나타냄을 확인하였다. 이를 통해 정격출력에 충분히 도달하였으므로 공기역학적 측면에서 출력에 맞는 블레이드가 설계되었다.

본 논문에서는 블레이드의 물성치를 가지고 3D모델링하고 이를 통해 전산유체해석을 하였다. 이 절차와 결과 값을 통해 회전속도에 따른 출력분포를 확인할 수 있었으며, 모델링과 전산해석결과가 적합한 것을 확인할 수 있었다.

추후 풍력발전기 시스템 구축을 위해서 하나의 기반이 될 것이다. 블레이드의 실질적인 적용을 위해서는 전산 유체해석뿐만 아니라 실험을 통한 데이터값 도출이 필요하다.

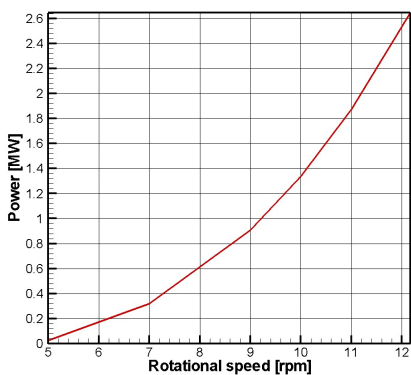


Fig. 5. Output power between the rotational speed

## References

- [1] K. C. Seo, J. S. Choi, J. S. Park, "Development of foundation structure for 8MW offshore wind turbine on soft clay layer", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol.27, No.2, pp.394-401, Apr. 2021. DOI: <https://www.doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.2.394>
- [2] T. Y. Kim, J. H. Maeng, "A study on offshore wind farm development through a review of floating offshore wind power project cases in norway", Journal of Wind Energy, Vol.14, No.2, pp.14-25, Apr. 2023. DOI: <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.2.002>
- [3] S. M. Kim, C. J. Moon, G. S. Jung, "A study on Design of Wind Blade with Rated Capacity of 50kW", The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol.16, No.3, pp.485-492, Jun. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.3.485>
- [4] C. Y, E. K. Son, S. M. Hwang, D. J. Kim, and S. W. Kim, "10kW wind turbine blade aerodynamic design and verification", Journal of Aerospace System Engineering, Vol.11, No.6, pp.42-49, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2017.11.6.42>
- [5] S. H. Kim, H. K. Shin, H. J. Bang, "Bend-twist coupling behavior of 10MW composite wind blade", Journal of Aerospace System Engineering, Vol.29, No.6, pp.369-374, Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2017.11.6.42>
- [6] H. G. Moon, S. H. Park, K. T. Ha, and J. H. Jeong, "Multi-MW wind turbine blade vortex generator design optimization and aerodynamic characteristics analysis using CFD", Vol.12, No.2, pp.30-36, Jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.33519/kwea.2021.12.2.004>
- [7] H. B. Park, "Study on design, manufacturing and test evaluation using composite materials of vertical axis wind turbine blade", Journal of Aerospace System Engineering, Vol.12, No.3, pp.58-63, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.3.58>

- [8] J. W. Park, Y. S. Lee, "The study of the design and analysis on the rotor blades of the 200W vertical axis wind generator system", Journal of Advanced Engineering and Technology, Vol.10, No.1, pp.117-123, Apr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.35272/jaet.2019.12.2.47>
- [9] C. Y. Choi, M. Y. Sun, "A study on airfoil direct design using BEM theory", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol.23, No.3, pp.360-365, Jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.23.3.202106.360>
- [10] D. A. Griffin and T. J. McCoy, "COE reductions through active aerodynamic control of rotor aerodynamics and geometry, National Renewable Energy Laboratory(NREL), NREL/SR-500-43391, Aug. 2008.

염 슬 기(Seul-Ki Yeom)

[정회원]



- 2014년 2월 : 부산대학교 기계공학과 (석사)
- 2017년 6월 ~ 2022년 1월 : 국방기술품질원 연구원
- 2022년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

국방표준화, 전산유체역학