New & Renewable Energy 2025. 9 Vol. 21, No. 3
ISSN 1738-3935 (Print)
ISSN 2713-9999 (Online)
https://doi.org/10.7849/ksnre.2025.0024
[2025-9-WD-009]

Check for updates

Bladed 및 CFD 코드 활용 U113 2.3 MW 풍력터빈 블레이드 공력특성 분석

민지원[1] · 정준희[2] · 정재호[3]*

Investigation on Aerodynamic Characteristics of U113 2.3 MW Wind Turbine Blade with Bladed and CFD Code

Ji Won Min[1] · Jun Hee Jeong[2] · Jae-Ho Jeong[3]*

Received 17 July 2025 **Revised** 8 August 2025 **Accepted** 11 August 2025 **Published online** 12 September 2025

ABSTRACT As global environmental pollution worsens, wind energy has emerged as a crucial alternative to fossil fuels in the renewable energy sector. According to the Energy Outlook report by Bloomberg New Energy Finance, wind power is projected to supply over 25% of global electricity by 2050. In South Korea, research on offshore floating wind power systems is actively pursued to address geographical and spatial constraints. Blade Element Momentum Theory (BEMT) is widely used in the industry for blade design and aerodynamic performance evaluation. Recent design strategies to improve Annual Energy Production (AEP) focus on increasing blade length through tip tapering, which enhances aerodynamic efficiency and reduces aerodynamic loads. In this study, a 2.3 MW wind turbine based on UNISON's U113 was scaled using similarity laws and analyzed for aerodynamic performance and AEP using Bladed code. To validate the results, three-dimensional CFD simulations were conducted using ANSYS CFX, a commercial CFD solver. Spanwise distribution of aerodynamic loads along the blade was evaluated. Unlike previous studies, this research integrates BEMT-based performance evaluation with 3D CFD validation, thereby enhancing the reliability of the blade design methodology. The results indicate that the aerodynamic performance predicted by Bladed closely aligns with SCADA data, showing an average deviation of only 2.3%.

Key words CFD(전산유체역학), Blade(블레이드), AEP(연간 에너지 생산량), Wind turbine(풍력 발전기), Aerodynamic characteristics (공력 특성)

Nomenclature

V : wind speed, m/s

$P_0(v)$: power output at wind speed v, W

$H(v)$: annual hours of wind speed v, h

$f(v)$: probability density function of wind speed v

k : shape parameter of Weibull distribution

c : scale parameter of Weibull distribution, m/s

r : radial position of blade element, m

f : tip loss factor

C_L : lift coefficient

C_D : drag coefficient

a : axial induction factor

1) M.S. Candidate, Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

2) Senior Researcher, Department of System&Structur, Unison

3) Professor, Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

***Corresponding author:** jaehojeong@cau.ac.kr
Tel: +82-2-820-5181

Copyright ⓒ 2025 by the New & Renewable Energy
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

a' : tangential induction factor
ϕ : relative flow angle, °
θ : pitch angle, °
α : angle of attack, °
μ : viscosity coefficient
N : number of blades
c : chord length, m
R_0 : rated power of Wind turbine, kW
k : turbulent kinetic energy, m^2/s^2
ω : specific dissipation rate, 1/s
μ : dynamic viscosity, Pa·s
μ_t : dynamic viscosity, Pa·s
ρ : fluid density, kg/m^3
U : velocity vector, m/s
σ_k : turbulent Prandtl number for
σ_ω : turbulent Prandtl number for
P_k : production term of k, m^2/s^3
β^* : empirical model constant for model
S_{ij}' : mean strain-rate tensor
δ_{ij} : kronecker delta
α_ω : empirical constant for eddy viscosity
SF_2 : shear function used in SST model
a_1 : empirical constant used in eddy viscosity formulation

Subscript

AEP : annual energy production
CF : capacity factor
BEMT : blade element momentum theory
CFD : computational fluid method
exp : experimental

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염의 심각성이 대두됨에 따라, 화석 에너지를 대체할 신·재생 에너지원으로 풍력 에너지가 주목받고 있다. 풍력 에너지는 지속 가능한 에너지 시스템 중 하나로 전 세계적으로 수요가 증가하고 있으며, BNEF의 'Energy outlook'보고서에 따르면 2050년까지 풍력 에너지가 전체 에너지 생산의 25% 이상을 차지할 것으로 예측된다. 또한, 제11차 전력수급기본계획에서는 2038년까지 신·재생에너지의 비중이 32.9%를 달성할 예정이라고 밝혔다.[1,2] 풍력발전기의 공력 특성을 연구하는 방법은 주로 풍동 실험, 수치 해석으로 나뉘며, 이 중 풍동 실험은 높은 신뢰도를 확보할 수 있는 장점이 있지만, 실험 조건의 제약과 높은 비용, 시간 소요 등의 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 CFD 기반의 수치해석 기법을 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[3,4] 특히 계산 능력과 CFD 기술의 발전으로 대형 풍력발전기 블레이드의 공력 성능 해석이 더욱 중요해지고 있으며, 블레이드는 풍력발전시스템에서 가장 핵심적인 구성 요소로 간주된다. 블레이드 길이가 증가하면 공력 하중의 증가뿐만 아니라 출력 성능 향상에도 기여한다. 또한 시스템의 대형화는 AEP 확보를 통해 경제성도 향상시킬 수 있다. 따라서 CFD를 활용한 3차원 유동 해석을 통해 블레이드 주변의 복잡한 유동 현상을 파악하고, 이를 기반으로 한 공력 성능 향상 방안의 도출이 시급하다. 본 연구에서는 역설계를 통해 확보한 2.3 MW급 풍력 블레이드를 대상으로, Bladed를 활용하여 공력 및 구조 설계 데이터를 기반으로 하중 해석을 수행하였으며, steady state에서의 성능을 3차원 CFD 해석 결과와 비교하였다. 또한, 유동장을 정밀하게 분석하여 공력 특성을 평가하고, 특히 블레이드의 spanwise에 따른 하중 분포를 분석함으로써 공력 하중 특성을 정량적으로 도출하였다.

2. 수치해석 방법론

2.1 해석 대상

본 연구에서는 다양한 설계 조건 및 운전 범위에 대한 성능 곡선을 기반으로 2.3 MW급 풍력발전시스템을 설계하였다. 이를 위해 2 MW, 4.3 MW, 7 MW급 등 유사 용량의 풍력발전시스템에서 도출된 성능 곡선을 참고하여 대표적인 공력 성능 목표를 설정하였으며, 이를 바탕으로 공력 및 구조적 특성을 동시에 고려한 역설계 기반의 설계 방법론을 적용하였다. 특히 본 연구에서는 U113 블레이드를 대상

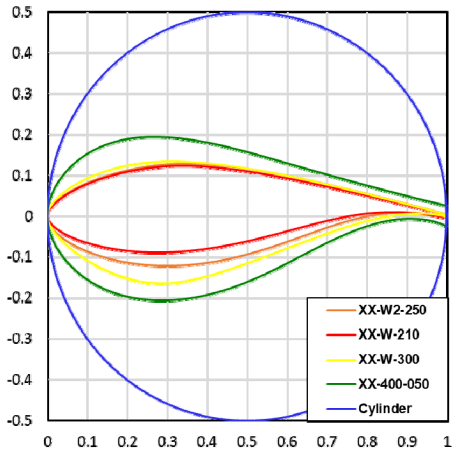


Fig. 1. Blade cross-section airfoil

Table 1. Blade design parameter

Description	Value
Number of blade	3
Blade length [m]	55.2
Rotational speed	variable
Rotational direction	clockwise (viewed from upwind)
Blade profile	DU-series

으로 수행된 선행 연구의 공력 설계 절차 및 주요 설계 변수를 참고하여 이를 기반으로 역설계 접근법을 적용함으로써, 기존 2.3 MW 시스템의 특성을 보존하면서 축소 모델에서도 타당한 해석 결과가 도출될 수 있도록 하였다.[5,6] 본 풍력 터빈은 3개의 블레이드로 구성되며, 단일 블레이드의 길이는 55.2 m로 설계되었다. 회전 속도는 가변 조건으로 운전되며 블레이드의 회전 방향은 시계 방향으로 설계되었다. 블레이드 설계에 사용된 에어포일의 단면은 Fig. 1에 제시되어 있으며, 주요 설계 변수는 Table 1에 요약하였다. 블레이드에 적용된 에어포일은 span 방향으로 구조적 강성과 공력 성능을 동시에 확보할 수 있도록 설계되었다. 루트 부근에서는 두꺼운 에어포일을 적용하여 구조적 안정성을 확보하고, 팁 부근에는 얇은 에어포일을 적용하여 고속 유동 조건에서 공력 성능을 극대화하였다.[7]

2.2 Down-scale을 통한 풍력 발전기 예비설계

본 연구에서는 풍력 발전시스템의 제조 가능성 및 비용 효율성을 평가하기 위해, 풍력발전시스템의 크기가 설계에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 4.3 MW급 풍력발전시스템을 기반으로 downscaling 기법을 적용하여 2.3 MW급 풍력발전시스템을 설계하였다. downscaling 과정에서는 크기 변화에 따른 설계 변수의 조정이 중점이 되었으며, 이를 위해 Scale Factor를 활용하였다. scale factor는 설계 변수의 비율을 정량적으로 표현하기 위해 사용되며, 다음 식 (1)에 따라 정의된다.

$$\alpha = \frac{Scaled\ length}{Nominal\ length} = \frac{L_U}{L_B} \tag{1}$$

식 (1)에서 U는 downscale 된 블레이드를, B는 기준 블레이드를 의미한다. Scale Factor는 로터 반경의 비율로도 정의될 수 있으며, 블레이드의 질량 변화를 고려하여 다음 식 (2)로 확장된다.

$$m_U = \alpha^3 m_B \tag{2}$$

본 연구에서 Scaling 법칙을 기반으로 풍력발전시스템의 Down-scale 모델을 설계하였다. 설계는 Table 2의 조건에 따라 수행되었으며, 다음의 가정을 기반으로 한다.

1. 블레이드의 수, 사용된 재료 및 지지구조의 개념 등은 기존 시스템과 동일하게 유지한다.
2. 모든 형상 변수는 Scale Factor에 따라 선형적으로 변화한다.

Table 2. Design parameter

Parameter	Value
Rated power [MW]	2.3
Rotor orientation	Upwind
Control	Variable speed
Rotor, Hub diameter [m]	112.8, 2.4
Hub height [m]	84.6
Blade length [m]	55.2
Cut-in, Rated, Cut-out Wind speed [m/s]	3, 10.5, 25
Cut-in, Rated Rotor speed [rpm]	6, 15.4
Tip speed ratio	10.63
Target Cp value	0.47
Maximum chord length [m]	2.57

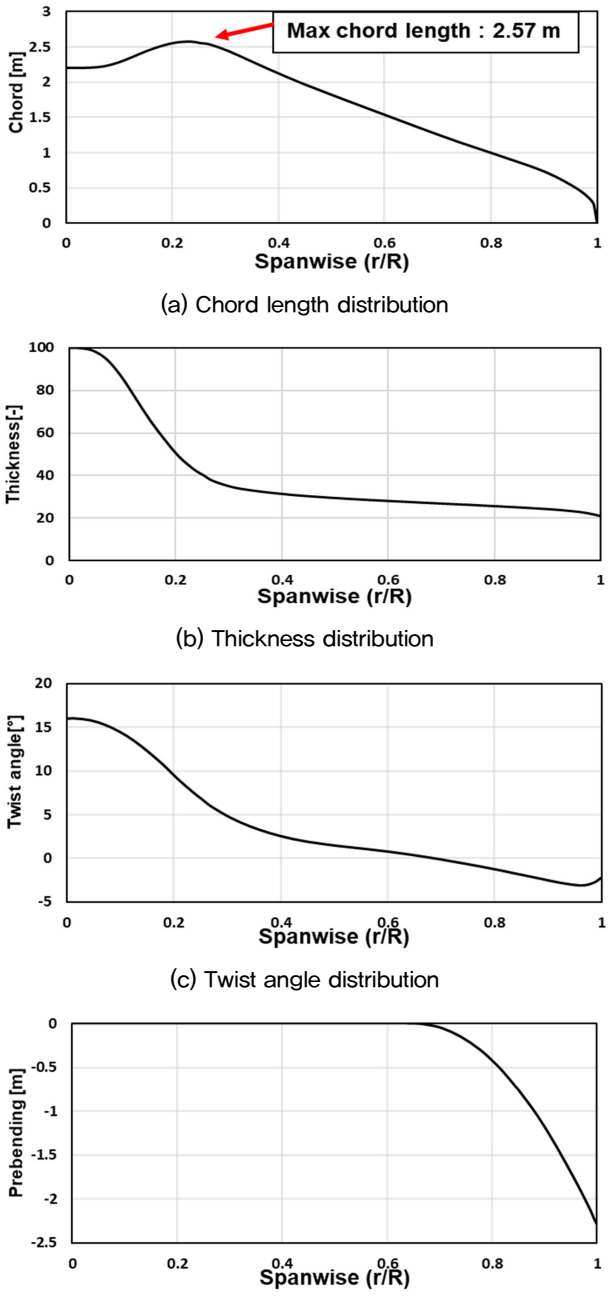
특히 본 연구에서는 blade sectional area, area moment of inertia, mass moment of inertia, blade mass와 같은 구조적 주요 변수들을 중심으로 해석을 진행하였다. 이러한 변수들은 풍력발전시스템의 크기에 따른 하중 분포 및 구조 안정성 평가에 핵심적인 영향을 미치며, Scaling 법칙에 따라 축소된 모델에서도 기존 2.3 MW 풍력발전시스템의 공력 특성과 성능을 유지할 수 있도록 조정되었다. 모델링된 풍력발전시스템의 정격 출력은 2.3 MW이며 Blade length는 55.2 m로 설계되었다. Rotor, Hub diameter는 각각 112.8 m, 2.4 m로 설계되었으며, Cut-in, Rated, Cut-out wind speed는 각각 3.0 m/s, 10.5 m/s, 25.0 m/s로 설계되었다. 그 외 세부 설계변수들은 Table 2에 정리되어 있다.[8,9]

블레이드의 기본 설계는 공력적 성능을 극대화하고 구조적 안정성을 확보하기 위한 핵심 단계로, 선정된 에어포일의 공력 계수를 기반으로 각 span 위치에 대한 코드 길이와 비틀림 각을 결정한다. 이를 위해 각 위치에서의 양력 계수(C_l), 항력 계수(C_d), 축 방향 유도계수(a), 회전 유도계수(a') 등을 입력 변수로 활용하며, 초기 설계에서는 a = 1/3 으로 가정하고 식 (4)를 통해 chord length를 계산한다. 이후 성능 해석 단계에서 식 (5)를 통해 최종 chord length 기준으로 a를 계산한다. 이후 각 span 위치에 대한 비틀림 각은 식 (6)을 이용하여 계산한다. 이러한 설계 과정을 통해 결정된 변수들은 Fig. 2에 제시된 바와 같이, 블레이드 span 방향 위치를 나타내는 r/R에 따라 분포된다. 본 연구에서는 chord length, thickness, twist angle, prebending을 주요 설계 변수로 설정하였다. 이들 변수는 블레이드의 공력적 특성뿐만 아니라 구조 건전성 확보에도 중요한 영향을 미친다. 특히 chord length와 twist angle은 Inboard 및 Outboard 구간에 큰 영향을 미치므로 민감도 분석을 통해 최적화하였다.

$$\frac{c}{r}=\frac{2\pi}{N\lambda C_l}\frac{4\lambda^2\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2+(\lambda\mu(1+a'))^2}} \tag{3}$$

$$\frac{c}{r}=\frac{2\pi}{N\lambda C_l}\frac{4\lambda^2\mu^2 a'}{\sqrt{(1-\frac{a}{f})^2+(\lambda\mu(1+\frac{a'}{f}))^2}}(\frac{1-a}{1-\frac{a}{f}}) \tag{4}$$

$$\tan\phi=\frac{1-a}{\lambda\mu(1+a')},\ \theta=a-\phi \tag{5}$$



(a) Chord length distribution

(b) Thickness distribution

(c) Twist angle distribution

(d) Prebending distribution

Fig. 2. Two-dimensional shapes of U113 blades

3. Bladed 활용 역설계 결과 분석

3.1 Bladed 활용 블레이드 공력 특성 분석

Fig. 3은 Bladed를 활용하여 Down-scaling 기법으로 설계된 2.3 MW급의 풍력발전시스템의 steady state에서의 공력 특성을 나타낸다. 본 그래프는 풍속 변화에 따른 pitch

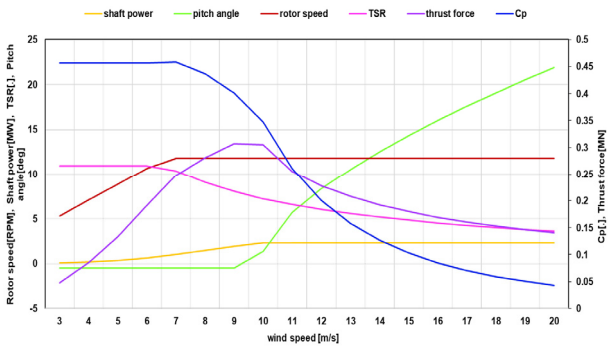


Fig. 3. Aerodynamic characteristic

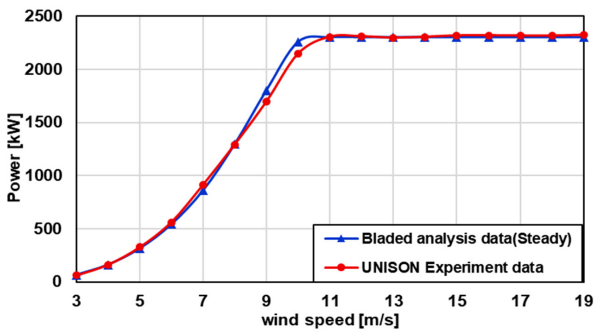


Fig. 4. Comparison of shaft power of steady state

angle, rotor speed, TSR, thrust force, Cp 등을 포함하며, 각 변수들의 변화를 기반으로 공력 성능의 특성을 분석하였다. 풍속이 증가함에 따라 pitch angle이 조정되고, 이로 인해 블레이드의 받음각이 변화하면서 thrust force는 특정 구간에서 최대값에 도달하는 경향을 보인다. 또한, rpm이 정격 r풍속까지 증가하다가 일정 수준에 도달하면 일정하게 유지된다. 이 과정에서 power coefficient는 정격 풍속 이후 점진적으로 감소하는데, 이는 rpm이 고정된 상태에서 tip speed ratio가 감소하고, 이에 따라 블레이드의 받음각이 변화함으로써 궁극적으로 power coefficient가 저하되는 전형적인 성능 곡선을 반영한다. 이러한 분석 결과는 Down-scale된 2.3 MW급 풍력발전시스템이 pitch angle 및 rpm 변화에 따른 공력 특성에서 원 시스템과 유사한 동적 특성을 유지함을 시사한다. 이에 따라, Down-scaling 기반의 역설계 방법론이 풍력발전시스템의 설계 및 성능 예측 검증을 위한 유효한 설계 접근법으로 활용 가능함을 확인하였다.[6,7]

Table 3. Comparison of shaft power

Contents	Bladed data [kW]	Experimental data [kW]	Error rate [%]
3	64.253	60.178	6.341
4	160.107	161.084	0.610
5	312.711	326.034	4.260
6	540.362	561.535	3.918
7	858.076	912.988	6.399
8	1294.340	1292.700	0.126
9	1800.780	1696.806	5.773
10	2257.370	2147.661	4.860
11	2300.830	2306.781	0.258
12	2300.830	2310.310	0.412
13	2300.830	2297.376	0.150
14	2300.830	2305.333	0.195
15	2300.830	2318.700	0.776
16	2300.830	2319.787	0.823
17	2300.830	2318.056	0.748
18	2300.830	2316.659	0.687
19	2300.830	2324.344	1.021

3.2 Shaft power 비교 분석

Fig. 4는 Bladed를 활용해 역설계된 U113의 steady state에서의 shaft power 해석 결과와 실험 데이터를 비교한 그래프를 나타낸다. 실험 데이터는 2021년 1월부터 2021년 12월까지의 SCADA 2초 평균 데이터를 제공받아 비교·분석하였다. 이를 통해 공력 설계의 타당성과 해석 결과의 정밀도를 정량적으로 평가하였다. Table 3에 제시된 비교 결과에 따르면, 풍속 3.0 m/s에서 최대 오차율이 약 6.3%로 나타났으며, 저풍속 영역에서 발생하는 공력적 비선형성 및 실험과 해석 간의 경계 조건의 차이로 해석된다. 그러나 풍속이 증가함에 따라 해석 값과 실험값 간의 차이는 점차 감소하였으며, 정격 풍속인 10.5 m/s 이후에서는 해석 값과 실험값이 동일한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 Bladed의 정상 상태에서의 해석이 고풍속 조건에서 블레이드의 공력 특성을 정확히 반영함을 의미한다. 평균 오차율은 약 2.2%로, 공력 해석과 실험 결과 간의 높은 정합도를 보여준다. 특히, 고풍속 조건에서 실험값과 해석 값이 일치하는 것은 블레이드 설계 시 공력 해석 및 성능 예측 도구로서 Bladed의 신뢰성을 입증하는 결과로 해석된다. 반면, 저풍속 조건에서의 오차는 공력적 비선형성과 수치 해석 과정의 근사화에 기인할 수 있으며, 이는 향후 정밀도 향상을 위한 추가 연구의 필요성을 시사한다.

3.3 AEP 비교 분석

풍력발전시스템에서 블레이드는 가장 중요한 구성 요소 중 하나로 경제성을 확보하기 위해 AEP, 연간 에너지 생산량을 최대화하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 AEP에 대한 분석을 통해 블레이드 설계와 성능 간의 상관관계를 평가하고, 풍력 발전 시스템의 경제성을 정량적으로 검토하였다. AEP는 각 풍속에서의 에너지 생산량을 확률 가중 평균한 값으로 정의되며, 이는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.[10,11] 본 연구에서는 특정 풍속 v에 대한 연간 에너지 생산량을 계산하기 위해 Weibull 분포를 기반으로 한 확률밀도 함수 $F(v)$를 적용하였다. Weibull 분포의 형상 매개변수 k는 2로 설정하여 풍속 분포의 형태를 결정하였으며 Weibull의 척도 매개변수 c는 8.88로 설정하여 Table 4와 같이 확률밀도 함수를 계산하였으며 풍속별 확률의 합계는 0.9970으로 확인하였다. 이후 확률밀도 함수와 각 풍속 구간에서의 에너지 생산량을 합산하여 전체 AEP를 계산하였다.

$$
\begin{aligned}
&H(v) = (365 \times 24) F(v) \triangle v \ [hour] \\
&F(v) = \frac{k}{c} \bullet \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \bullet e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \\
&AEP(v) = P_0(v) \times H(v) \ [Wh] \\
&AEP_{total} = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} P(v) \bullet 8760 \bullet F(v) \, dv \\
&v_{\min} : Cut-in \ speed \\
&v_{\max} : Cut-out \ speed
\end{aligned}
\tag{6}
$$

Table 4. Probability of wind speed

Wind speed [m/s]	Probability of wind speed	Wind speed [m/s]	Probability of wind speed
0	0.0000	13	0.0229
1	0.0349	14	0.0153
2	0.0662	15	0.0098
3	0.0909	16	0.0060
4	0.1070	17	0.0035
5	0.1140	18	0.0020
6	0.1125	19	0.0011
7	0.1042	20	0.0006
8	0.0912	21	0.0003
9	0.0758	22	0.0001
10	0.0601	23	0.0001
11	0.0455	24	0
12	0.0330	25	0

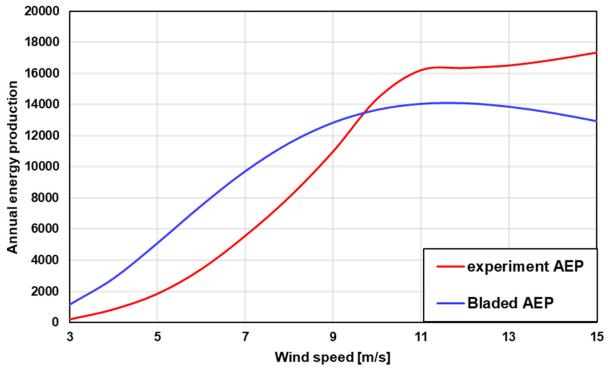


Fig. 5. Comparison of AEP

Bladed를 통한 AEP 계산은 Weibull 분포를 기반으로 특정 풍속 구간에서의 발생 확률을 고려한 반면, 실험값은 실제 2021년 1월부터 12월까지의 풍속 데이터를 이용해 계산된 연간 에너지 생산량이다. Fig. 5와 같이 AEP 총합 비교 결과, Bladed를 통해 예측된 AEP는 약 132,576.82 kWh로 나타났으며, 실험값은 128,560.07 kWh로 나타나 약 3.12%의 차이를 보인다. 이는 Bladed에서 적용한 이론적 분포인 Weibull 분포와 실제 측정된 풍속 분포 간의 차이에서 기인한다. Weibull 분포는 장기 평균 풍속과 분포 형태를 기반으로 하여 일반적인 풍력 자원 특성을 반영하지만, 단일 연도의 실제 풍속 변동성이나 극단적 기상 현상은 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 반면, 실험값은 특정 연도의 실제 지역 풍속 변동성을 더 정확히 반영한다. 두 데이터는 유사한 경향을 나타내며, Bladed가 연간 에너지 생산량을 예측하는 데 있어 신뢰할 수 있는 도구임을 보여준다. 그러나 풍력 발전기의 경제성 및 성능 평가에서는 이론적 분포와 실험 데이터 기반, 지역적·단기적 변동성을 보완적으로 분석하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 계산된 AEP를 바탕으로 Wind Class별 이용률 C_f을 분석하였다. C_f은 풍력발전기의 AEP를 최대 이론적 에너지 생산량으로 나눈 값으로, 발전기 효율성과 경제성 평가의 주요 지표이다. 이용률 계산식은 식 (7)과 같이 정의되며 R_0는 풍력발전기의 정격 출력 [kW]으로 계산할 수 있다. Bladed를 사용하여 Wind Class Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ 각각에 대해 이용률을 산출한 결과, Wind Class에 따라 Table 5와 같이 Wind Class가 낮아질수록 평균 풍속이 감소하며, 이에 따라 발전기의 이용률도 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 풍력 발전기의

Table 5. Capacity factor by wind class

	Wind class Ⅰ	Wind class Ⅱ	Wind class Ⅲ
Annual average wind speed [m/s]	10	8.5	7.5
C_f [%]	41.89	40.13	36.91

$$C_f = \left(\frac{AEP}{8760 \cdot R_0} \right) \cdot 100 \tag{7}$$

AEP가 풍속에 민감하게 반응한다는 것을 시사한다. Bladed와 실험값을 기반으로 예측한 Wind Class별 AEP 및 이용률 결과는 풍속 분포와 발전기의 정격 출력 간의 상관관계를 반영하며, Bladed가 이용률 산출에도 신뢰할 수 있는 도구임을 확인하였다. 또한, Wind Class 별 이용률의 차이는 지역 풍력 자원 평가 및 발전기 설계 최적화에 중요한 정보를 제공한다. 결론적으로, Wind Class Ⅰ의 높은 이용률은 높은 평균 풍속을 가진 지역에서 풍력 발전기가 더 효율적으로 작동할 수 있음을 나타낸다. 반면, Wind Class Ⅱ 및 Ⅲ에서는 평균 풍속의 감소로 인해 이용률이 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 분석 결과는 풍력 발전기의 설계 및 운영 효율성을 평가하고 최적화하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

4. CFD 활용 역설계 결과 분석

4.1 CFD 해석 방법론

본 연구에서는 UNISON U113 블레이드의 유동장을 분석하기 위해 CFD를 활용한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 격자계의 전체 구조는 Fig. 6에 제시되어 있으며, 블레이드가 회전하는 영역은 Rotating Domain으로 정의되었으며 블레이드 주변의 유동 해석을 위한 고정 영역은 Stationary Domain으로 정의되었다.[12] 격자계는 총 4,636,800개의 셀로 구성되었으며, Rotating Domain에 4,060,800개의 셀, Stationary Domain에 576,000개의 셀로 구성되었다. 계산 영역은 로터 블레이드로부터 유입 방향으로 로터 반경의

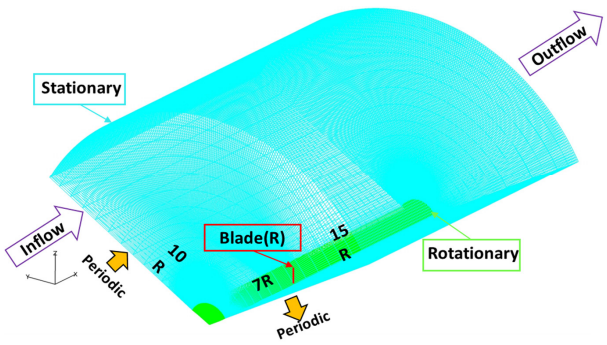


Fig. 6. Blade analysis grid

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho k U) = div[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) grad(k)] \\
&+ P_k - \beta^* \rho k \omega \\
&\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + div(\rho \omega U) \\
&= div[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}}) grad(\omega)] \\
&+ \gamma_2 (2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3}\rho\omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\delta_{ij}) \\
&- \beta_2 \rho \omega^2 + 2\frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \\
&\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}
\end{aligned} \tag{8}$$

7배, 후류 방향으로는 로터 반경의 15배, 반경 방향으로는 로터 반경의 10배의 계산 영역을 확보하여 경계 효과를 최소화하였다. 본 계산에서 블레이드 표면은 no-slip 조건, 입구에서는 free-stream 조건을 부여하였으며, 회전 대칭성을 고려하여 120° periodic boundary 조건을 적용함으로써 단일 블레이드만으로 전체 회전을 모사하였다. 격자 품질 확보를 위해 전 영역을 정렬 격자로 구성하였으며, 특히 벽면 경계층 내부 유동의 정확한 해석을 위해, y+가 5 이하가 유지되도록 설정하였다. 유입 풍속 5.5, 7.5, 9, 10 m/s 조건에서 격자 독립성 검토를 수행하여 계산 격자의 신뢰성 및 계산 효율성을 향상시켰으며 난류 모델로는 SST $k-\omega$ 모델을 사용하였는데 이는 블레이드 주변의 경계층 유동 및 난류 특성을 정확히 예측하기 위한 선택으로, Rotating Domain과 Stationary Domain 모두에서 동일하게 적용되었다. SST $k-\omega$ 모델은 벽면 근처에서는 $k-\omega$ 모델을 적용하고, 자유 유동 영역에서는 $k-\varepsilon$ 모델을 자동으로 적용하는 혼합형 모델이며, 이를 통해 경계층 내부 유동 및 외부

유동의 특성을 동시에 안정적으로 예측할 수 있다. 특히, 역압력 구배에 의해 유도되는 재순환 영역 크기 및 박리지점의 위치를 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 해석에 사용된 해당 모델의 수송 방정식 및 난류 점성계수 정의는 식 (8)에 나타나 있으며, 이는 Wilcox의 standard $k-\omega$ 모델을 기반으로 ε항을 ω로 치환하여 표현된다. 본 모델은 완전 난류 유동을 가정하므로, 층류-난류 천이 구간에서의 박리 현상 등은 명확히 반영하지 못하는 한계가 있으며, 실제 실험 결과와 해석 결과 간에 차이를 발생시키는 주요 원인으로 작용한다.[13]

4.2 Shaft power 비교 검증

본 연구에서는 UNISON U113 블레이드에 대해 CFD, Bladed, 그리고 실험 데이터를 기반으로 shaft power를 비교 분석하였다. 해석은 유입 풍속 조건 7.5 m/s, 9.0 m/s, 10.0 m/s에서 각각 수행되었으며, 해석 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Bladed와 CFD 결과를 비교한 결과, 전반적으로 두 값은 유사한 경향을 보였으며, 평균 오차율은 약 4.15%로 나타났다. 이는 Bladed의 BEMT(Blade Element Momentum Theory) 기반 해석과 CFD의 난류 모델 기반 해석 간의 이론적 접근 방식 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다. 특히, 7.5 m/s의 경우 Bladed는 1179.21 kW의 출력을 예측한 반면 CFD는 1235.72 kW로, 오차율은 약 4.79%로 나타났다. 반면, 10.0 m/s에서는 두 방법의 예측값이 각각 2522.22 kW와 2432.41 kW로, 오차율이 약 3.56%로 감소하였다. 이는 풍속이 증가함에 따라 두 해석 간의 예측 차이가 점진적으로 줄어드는 경향을 시사한다. 또한 실험 결과와 CFD 결과를 비교한 결과, 두 데이터는 매우 높은정합성을 보였으며, 평균 오차율은 약 1.12%로 나타났다. 7.5 m/s 조건에서는 실험값이 1232.23 kW, CFD 결과가 1235.72 kW로, 오차율은 약 1.12%로 나타났다. 7.5 m/s 조건에서는 실험값이 1232.23 kW, CFD 결과가 1235.72 kW로, 오차율은 0.28%로 나타났다. 10 m/s 조건에서도 실험값이 2399.62 kW, CFD 결과가 2432.41 kW로, 약 1.35%의 오차율을 나타냈다. 이러한 결과는 CFD 해석이 실험 조건 및 유동 특성을 신뢰성 있게 반영하고 있음을 의미하며, 난류 모델 및 경계 조건 설정이 실제 유동 특성을 정확히 반영하고 있음을 보여준다.[12] Fig. 7의 shaft power 그래프는 풍속이 증가함에 따라 출력이 비선형적으로 증가하는 7.5~9.0 m/s 구간과 10.0 m/s 이상의 구간에서 출력 증가율이 감소하는 특성을 명확히 나타낸다. 이는 풍력발전시스템이 정격 풍속을 초과하는 경우, 제어 방식을 통해 정격 출력을 유지하는 전형적인 동작 특성을 반영한 결과이다. 결론적으로, Bladed와 CFD, 그리고 실험 결과 간의 비교를 통해 CFD 해석이 실험 데이터를 신뢰성 있게 모사할 수 있음을 확인하였다. 또한, Blade d의 BEMT 기반 해석 역시 초기 설계 및 예비 분석 단계에서 신뢰성 있는 도구로 활용될 수 있다. 본 결과는 풍력발전시스템의 설계 및 성능 검증 과정에서 Bladed와 CFD의 상호보완적 활용 가능성을 시사한다.[14,15]

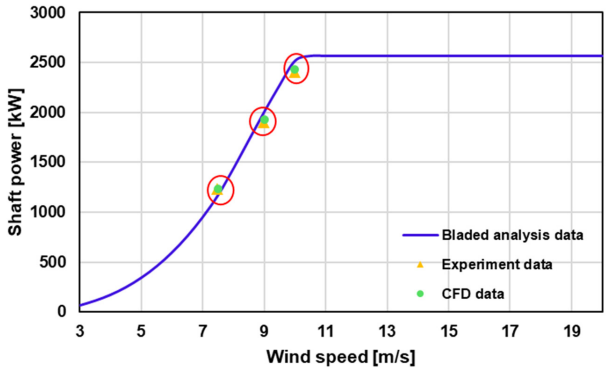


Fig. 7. Comparison of shaft power

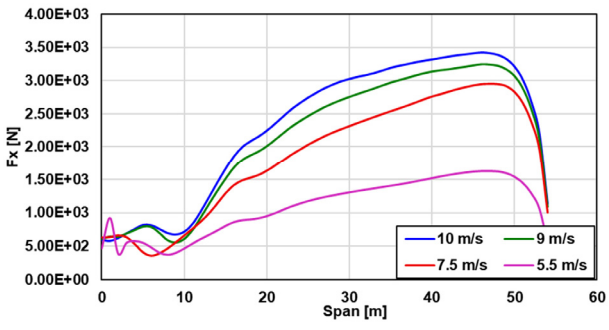
4.3 블레이드 하중 비교 분석

본 연구에서는 UNISON U113 블레이드의 span 방향 힘 분포를 CFD 해석을 통해 정량적으로 분석하였다. Fig. 8은 Flap 방향 및 Edge 방향에 따른 각 span 위치별 하중 분포를 풍속 조건 5.5 m/s, 7.5 m/s, 9.0 m/s, 10 m/s에서 비교한 결과를 나타낸다.

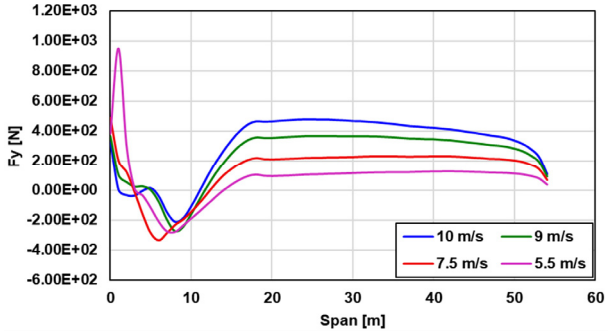
$$C_{torque} = C_L \times \sin(\theta) - C_D \times \cos(\theta)$$
$$C_{thrust} = C_L \times \cos(\theta) + C_D \times \sin(\theta) \quad (9)$$

식 (9)는 블레이드 단면에서 발생하는 양력과 항력을 회전 좌표계 기준의 torque 및 thrust 방향의 힘 계수로 변환하는 공식이다. 이 식은 각 단면에서의 미소 하중을 실제 torque 및 thrust 성분으로 분해하여, 하중 해석에 직접적으로 적용할 수 있다. Flap 방향 하중은 span이 증가할수

록 상대 유속이 비선형적으로 증가하고, 이에 따라 θ도 변화하여 블레이드 tip 부근에서 flap 방향 하중이 급격히 상승하는 경향을 Fig. 8(a)에서 확인할 수 있다. 또한 풍속이 증가함에 따라 양력 계수와 θ가 증가하며, 5.5 m/s 조건에서는 약 1.62E+03 [N], 10.0 m/s 조건에서는 약 3.50E+03[N]의 최대 하중이 발생함을 확인할 수 있다. Edge 방향 하중은 식 (9)와 같이, 항력 계수와 상대 유속의 제곱에 비례한다. root 구간, 0~10 m 구간에서는 상대 유속과 θ가 작아 Edge 방향 하중도 작은 값을 가진다. 그러나 span이 증가하면서 상대 유속이 증가하며 Edge 방향 하중이 점진적으로 증가한다. 또한, 5.5 m/s 조건에서 약 1.26E+0[N], 10 m/s 조건에서는 약 4.77E+02[N]의 최대 하중이 관측되며 고풍속 조건에서는 tip 부근에서 양력 계수와 항력 계수가 모두 증가하며, Edge 방향 하중이 증가함을 확인할 수 있다. Span 방향의 하중은 주로 원심력 및 내부 구조 응력에 기반하여 풍속에 변화에 따른 값의 차이가 1% 미만으로 나타났다. 하중 성분의 절댓값은 Flap 및 Edge 방향 하중에 비해 상대적으로 작았으나, 0~15 m 구간에서 급격한 피크를 형성한 후 감소하는 분포를 나타낸다. 이러한 경향은 블레이드 내부 형상 변화 및 구조적 특성에 따른 하중 분포의 결과로 해석되며, 블레이드의 전체적인 안정성과 구조 설계에 영향을 미치는 중요한 요소로 고려된다.[16,17] 결론적으로 풍속 변화는 블레이드의 공력 특성 및 하중 분포에 직접적인 영향을 미치며, 이는 향후 블레이드 설계 및 성능 평가를 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 특히 고풍속 조건에서의 공력 분포에 대한 정밀한 후속 연구가 요구된다.[17,18]



(a) Flap force

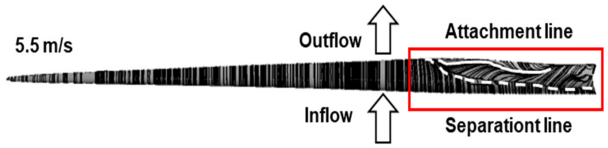


(b) Edge force

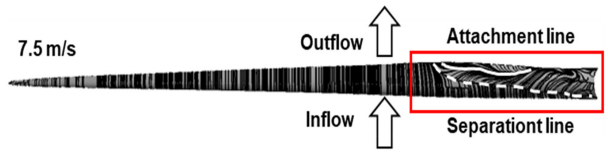
Fig. 8. Spanwise CFD force on each direction

4.4 블레이드 표면 유선 분포 비교 분석

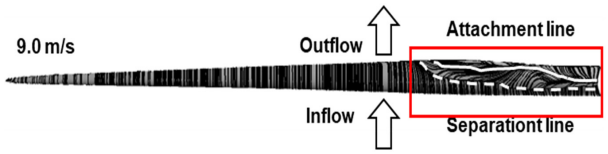
본 연구에서는 풍속 조건 5.5 m/s, 7.5 m/s, 9.0 m/s, 10.0 m/s에서 난류 모델을 활용하여 블레이드 윗면에서 형성되는 표면 유선 분포를 비교하였다. Fig. 9는 각 풍속 조건에서 블레이드 표면에 형성된 유선 패턴과 박리 영역의 분포를 보여준다. 분석 결과, root에서 tip 방향으로 약 span 비율 35.0%(약 19.3 m)에 해당하는 구간에서 초기 박리 영역이 형성되었으며, 이는 경계층 내 2차 유동에 의해 유도



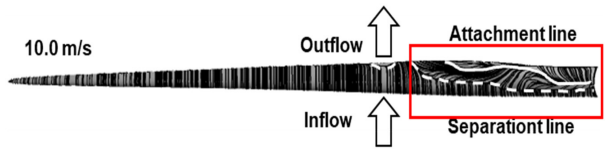
(a) 5.5 m/s streamline



(b) 7.5 m/s streamline



(c) 9.0 m/s streamline



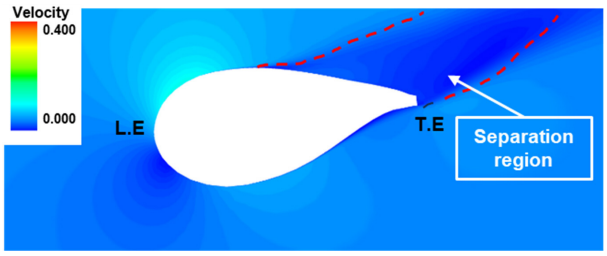
(d) 10.0 m/s streamline

Fig. 9. Blade surface streamline comparison

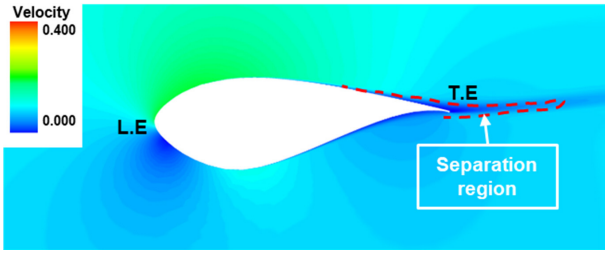
된 3차원 유동 구조의 영향으로 해석된다. 이러한 경계층 유동은 표면에 복잡한 유선 구조를 형성하는 주요 원인으로 작용하였다. 특히, 이러한 경계층 흐름은 span 방향으로 확장되며, 이는 박리 영역이 블레이드의 공력 성능 저하와 효율 감소에 주요 요인 중하나로 작용함을 시사한다. 또한, 풍속 7.5 m/s이상의 조건에서는 블레이드의 rpm이 일정하게 유지되는 조건에서 풍속이 증가함에 따라 블레이드 단면의 받음각이 증가한다. 받음각이 커질수록 경계층 내 압력 구배가 심화되어, 박리 영역이 확장되는 현상이 뚜렷하게 관찰되었다.[19] 풍속 9.0 m/s와 10.0 m/s의 조건에서는 박리 영역의 크기가 더욱 증가하였으며, 이는 고풍속 조건에서 블레이드 tip 부근에서 발생하는 공력적 손실이 증가함을 나타낸다. 결론적으로, 풍속 조건에 따른 블레이드 표면의 유동 특성 분석을 통해 박리 영역의 형성과 확장 경향을 확인할 수 있었다. 저풍속 조건에서는 박리 영역이 제한적으로 형성되었으나, 풍속이 증가할수록 박리 영역이 점진적으로 확대되는 경향을 보였다. 이는 블레이드 설계 시 경계층 유동과 박리 영역의 거동을 예측하고 이를 제어하기 위해 설계 변수를 반영해야 할 필요성을 시사한다. 본 연구 결과는 풍력 터빈의 공력 성능 최적화 및 구조 설계 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.[18,19]

4.5 유동장 비교 분석

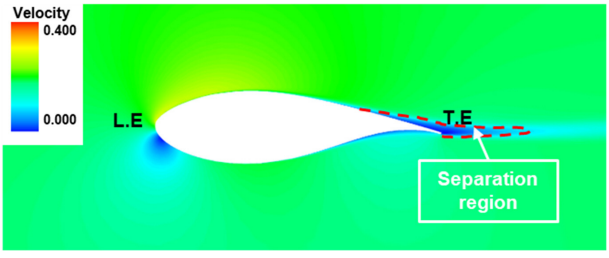
본 연구에서는 블레이드의 span 방향 위치에 따라 형성되는 속도장을 비교하기 위해, 각각 스팬 비율 25.5%, 46.7%, 84.9%, 100% 위치에서의 속도장 분포를 시각적으로 관찰하였다. Fig. 10는 해당 위치에서의 상대 속도 분포 및 박리 영역의 형태를 보여주며, 이를 바탕으로 위치별 유동 특성의 변화를 분석하였다. 분석 결과, 블레이드 tip 부근에 가까워질수록 블레이드의 흡입면과 압력면 간의 속도 차이가 점진적으로 확대되었다. 이는 스팬 방향의 위치에 따라 공기역학적 조건이 변화하며, 블레이드 tip 부근으로 갈수록 상대 유속 및 압력 차이가 커지기 때문이다. 특히 25.5%, 46.7% 지점에서는 흡입면에서 비교적 넓은 박리 영역이 관찰되었으며, 이는 root 부근에서 발생하는 경계층 내의 저에너지 유동이 우세해 박리가 쉽게 발생하는 현상으로 해석된다. 반면, tip 부근인 84.9%, 100%에서는 상대 유속이 증가함에 따라 흡입면에서의 경계층의 부착이 유지되며, 박리 영역이 상대적으로 작아지는 경향이 나타났다. 특히, 블레이드 tip 부근에서는 박리 발생이 거의 관찰되지 않으며, 이는 설계된 블레이드 형상이 고속 회전 조건에서도 우수한 공력적 안정성을 확보하고 있음을 시사한다.[15] 본 해석에 속도장은 음속, Mach speed를 기준으로 정규화하여 분석되었으며, Tip Speed 기준으로 비속도(v/c)는 약 145/343 = 0.4 로 계산되었다. 이 결과는 블레이드 끝단의 높은 유동 에너지가 형성되어 공력 성능 향상에 기여함을 시사한다. Fig. 10에 나타난 결과에 따르면, 박리 영역은 span 방



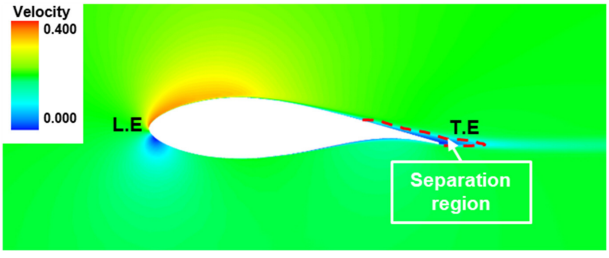
(a) Span of 25.5%



(b) Span of 46.7%



(c) Span of 84.9%



(d) Span of 100%

Fig. 10. Blade speed flow field comparison

향에 따라 주로 흡입면에 형성되었으며, 이는 span 방향 위치와 속도 분포의 상관관계가 존재함을 시사한다. 이는 블레이드 설계 시 박리 억제 및 유동 안정성을 확보하기 위해 형상 최적화의 필요성을 제시한다. 결론적으로, 본 연구에서는 블레이드 span 방향에 따른 속도장 및 박리 영역 분포의 변화를 분석하고, 풍속 및 span 위치가 공력 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 본 결과는 풍력발전시스템 블레이드의 설계 및 성능 최적화에 있어 기초 자료로 활용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Bladed 및 CFD를 활용하여 역설계된 2.3 MW 풍력 발전시스템의 공력 성능을 평가하고, 시뮬레이션 결과를 실험 데이터와 비교·검증함으로써 두 시뮬레이션 코드의 신뢰성과 유효성을 분석하였다.

1. Bladed 코드 기반 Shaft power 비교검증을 수행한 결과, 데이터와의 평균 오차율이 약 2.2%로, 두 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 이는 Bladed 코드가 풍력 터빈의 공력 성능을 정량적으로 평가하는 데 신뢰할 수 있는 분석 도구임을 시사한다.
2. Bladed 코드를 활용하여 Wind class에 따른 이용률을 분석한 결과 Wind class Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ에서 각각 41.89%, 40.13%, 36.91%의 이용률을 나타냄으로써 풍속 조건에 따른 Bladed 코드의 이용률 계산이 실제 풍력 발전시스템의 운전 특성을 적절히 반영함을 확인하였다.
3. Bladed 코드와 CFD 코드를 활용하여 shaft power 비교·검증을 수행한 결과 두 결과 간의 평균 오차율은 약 4.2%로 나타났으며, 이는 Bladed와 CFD가 상호 보완적으로 활용될 수 있음을 보여준다.
4. 특히 CFD 해석 결과는 실험 데이터와의 비교에서 평균 오차율 1.1%로 나타나 CFD 코드가 실제 풍력발전시스템의 성능을 매우 정밀하게 예측할 수 있는 도구임을 확인하였다.

본 연구는 정상상태 및 강체 조건을 기반으로 한 해석 결과를 통해 터빈 공력 성능을 정량적으로 평가하였으며, 이는 설계 초기 단계의 기준점으로 활용 가능함을 확인하였다. 그러나 실제 운전 조건에서는 블레이드의 탄성 변형이나 비정상 유동이 공력 특성에 유의미한 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 블레이드의 탄성 변형은 유입 유동과의 상호작용을 통해 실시간으로 받음각을 변화시키며, 이는 양력과 항력 계수에 직접적인 영향을 준다. 또한, 돌풍이나 급격한 풍속 변화와 같은 비정상 유동 조건에서는 블레이드 표면의 박리 및 재부착 현상이 발생할 수 있어, 순간적인 출력 저하나 하중 진동을 유발할 수 있다. 이러한 비선형적이고 시간 의존적인 현상은 정상상태 및 강체 조건 하에서는 정확히 반영되기 어렵기 때문에, 향후에는 유체–구조 연성 및 비정상 유동을 고려한 해석으로 연구를 확장할 계획이다.

감사의 글

This work was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Korea government(MOLIT)(RS-2024-00401101, Development of Marine Bridges Operation using Green Energy).

This work was supported by the Human Resources Development of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea (No. RS-2024-00401705).

References

[1] Hostert, D., 2024, “New Energy Outlook 2024”, BloombergNEF.

[2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2024, “The 11th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand”, MOTIE, https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLc01b2801b/70152/view.

[3] Martin, H. R., 2011, “Development of a Scale Model Wind Turbine for Testing of Offshore Floating Wind Turbine Systems”, M.S. thesis, University of Massachusetts

Amherst, pp.6-33.

[4] Kang, H.G., Kim, B.H., Kim, H.J., Yang, C.J., and Jeong, H.C., 2024, “Prospects of cumulative installed power capacity of domestic offshore wind projects for K-RE100”, New. Renew. Energy, **20**(2), 44-54.

[5] UNISON, “2MW Platform”, Accessed March 4, 2024, https://www.unison.co.kr/product/2MW_Platform_U113.

[6] Choi, S.Y., Jeong, J.H., Yook, R.H., Ha, K.T., and Jeong, J.H., 2022, “Wind turbine blade design using PROPID code and comparative analysis of aerodynamic properties based on CFD”, J. Wind Energy, **13**(3), 5-12.

[7] IEC, 2019, “Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements”, IEC 61400-1, Edition 4.0.

[8] Ledoux, J., Riffo, S., and Salomon, J., 2021, “Analysis of the Blade Element Momentum Theory”, SIAM J. Appl. Math., **81**(6), 2596-2621.

[9] Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., 2010, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”, 2nd ed., Wiley, Chichester.

[10] Al-Khayat, M., and Al-Rasheedi, M., 2024, “A new method for estimating the annual energy production of wind turbines in hot environments”, Renew. Sustain. Energy Rev., **195,** 114343.

[11] Arslan, T., Bulut, Y.M., and Yavuz, A.A., 2014, “Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential”, Renew. Sustain. Energy Rev., **40**, 820-825.

[12] Moon, H.-G., Park, S., Ha, K., and Jeong, J.-H., 2021, “CFD-based in-depth investigation of the effects of the shape and layout of a vortex generator on the aerodynamic performance of a multi-MW wind turbine”, Appl. Sci., **11**(22), 10764.

[13] Park, S.-C., Ha, K., and Jeong, J.-H., 2023, “Study on Aerodynamic Performance Characteristics for SMART BLADE according to Turbulence Model”, J. Korean Soc. Fluid Mach., **26**(5), 118-126.

[14] Hansen, M.O.L, 2008, “Aerodynamics of Wind Turbines”, 2nd ed., Earthscan, London.

[15] Kang, T.-J., Lee, S.-W., Cho, J.-S., and Kyung, N.-H., 2008, “Aerodynamic Analysis of NREL Phase VI Rotor”, J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci., **36**(4), 315-320.

[16] Tao, Y.-X., Scott, R., and Tu, P. 1997, “Phenomenological Models for Post-stall Airfoil Characteristics of Horizontal Axis Wind Turbines”, Renew. Energy, **10**(2-3), 259-263.

[17] Kim, B.S., 2014, “Multi-MW Class Wind Turbine Blade Design Part I: Aero-Structure Design and Integrated Load Analysis”, T. Kor. Soc. Mec. Eng. B, **38**(4), 289-303.

[18] Jeong, J.H., and Kim, S.-H., 2018, “Optimization of thick wind turbine airfoils using a genetic algorithm”, J. Mech. Sci. Tech., **32**(7), 3191-3199.

[19] Jeong, J.H., and Kim, S.-H., 2018, “CFD investigation on the flatback airfoil effect of 10 MW wind turbine blade”, J. Mech. Sci. Tech., **32**(5), 2089-2097.