



복합재 풍력 블레이드 구조설계 자동화 통합 프레임워크(BladeFORGE) 개발 및 적용 연구

권대용 · 박세명 · 유 철*

BladeFORGE: An Integrated Framework for Automated Structural Design of Composite Wind Turbine Blades with a Case Study

Daeyong Kwon · Semyung Park · Cheol Yoo*

Received 23 July 2025 Revised 11 August 2025 Accepted 19 August 2025 Published online 17 September 2025

ABSTRACT As wind turbine blades increase in size and complexity, there is a growing demand for efficient and automated structural design methods. Conventional approaches often rely on manual tasks, such as geometry creation, mesh generation, composite layup modeling, and the preparation of inputs for finite element analysis, which can limit both design speed and consistency. This study presents BladeFORGE, an integrated automation platform that streamlines the structural modeling of composite wind turbine blades. It automates the entire design workflow, from 3D geometry generation and structured mesh creation to zone-based composite layup and the production of solver-ready inputs for ABAQUS and VABS. The platform was applied to the structural design of a 7.5 m composite blade, demonstrating its potential for real-world turbine applications. Multiple structural configurations were efficiently evaluated through automated modeling and optimization. The final design achieved enhanced flapwise and edgewise stiffness, while also reducing overall weight through targeted layup optimization. This study highlights the potential of automation-driven design to improve both structural performance and productivity. Future work will focus on experimental validation and the extension of digital-twin-based real-time performance prediction and optimization.

Key words Structural design automation(구조설계 자동화), Wind turbine blade(풍력 블레이드), Composite materials(복합재), Layup design(적층 설계), BladeFORGE(블레이드포지)

Subscript

LE : leading edge

TE : trailing edge

FEA : finite element analysis

FEM : finite element method

Senior Researcher, Wind Energy Research Team, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding author: c.yoo@kier.re.kr

1. 서론

정부의 전력 공급 계획에 따르면 풍력은 향후 주요한 전력원으로 확대될 예정이며,^[1] 이에 따라 풍력 블레이드의 대형화와 고성능화에 대한 기술 수요가 급증하고 있다. 특히 복합재 기반의 초대형 블레이드는 풍력터빈의 성능과 구조 안전성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 부품으로, 공력·구조적 요소 간의 복잡한 상호작용을 고려한 정밀한 최적화 설계가 요구된다.

풍력터빈의 성능 향상과 원가 절감을 위해 블레이드의

국산화와 설계 기술 내재화가 중요하며, 이를 뒷받침하기 위해서는 설계 자동화 기반 기술의 도입이 필수적이다. 그러나 기존의 블레이드 구조설계는 형상 정의, 격자 분할, 적층 입력, 유한요소 해석 조건 설정 등의 대부분 과정이 수작업으로 이루어지고 있어, 설계자의 경험에 의존하고 반복 설계에 비효율적이라는 한계가 있다. 일부 상용 소프트웨어가 설계 단계별 자동화를 지원하긴 하나, 형상부터 해석 입력까지 전 과정을 일관되게 통합 자동화한 사례는 매우 드물다. 또한 블레이드의 다양화 및 시장변화에 발맞춘 적극적인 블레이드 개발은 기존 설계 방법의 사용시 개발기간이 길어지고, 이에 시장에 진입하는 속도 또는 느려져서 시장경쟁력을 잃게 된다. 즉 개발시간의 단축을 위한 획기적인 블레이드 개발 플랫폼이 필요하다.

이에 본 연구에서는 풍력 블레이드 구조설계의 전 과정을 자동화하는 통합 설계 플랫폼을 개발하였다. 제안된 시스템은 형상 입력부터 구조 격자 생성, 적층 layup 설계, 해석 입력 파일 생성에 이르기까지 모든 단계를 자동으로 수행하며, 반복 설계 및 최적화 설계에도 유연하게 대응할 수 있도록 구성되었다. 본 논문에서는 해당 플랫폼의 설계 로직과 주요 구성 요소를 소개하고, 실제 복합재 블레이드 설계에 적용한 사례를 통해 그 실용성과 설계 효율성을 평가한다.

2. 설계 자동화 기법

2.1 기존 설계 방식의 한계

풍력 블레이드의 공력 형상 설계가 완료되면, 그 결과로부터 획득된 길이 방향상의 형상 정보(Chord, Twist, 단면 형상 좌표 등)를 기반으로 구조 설계가 수행된다. 그러나 현재까지 널리 사용되는 구조 설계 방식은 CAD 기반의 형상 모델링부터 격자 생성, 적층 정의, 해석 조건 설정까지 대부분이 수작업 중심으로 이루어지며, 해석 및 시각화를 위한 소프트웨어 간 연계 또한 제한적이다. 이로 인해 설계 작업은 반복성과 재현성이 떨어지고, 최적화 수행에 큰 제약이 따른다.

예를 들어, QBlade^[2]는 풍력 블레이드의 공력 해석 및 기초적인 구조 응답 해석 기능은 제공하지만, 복합재 구조

설계를 위한 적층 구성과 유한요소 해석 입력 파일 생성을 지원하지 않는다. Ansys ACP^[3]는 고급 복합재 적층 해석 기능을 포함하고 있으나, 3차원 형상 자동 생성이나 반복 설계 자동화 기능은 부족하다. 또한 NuMAD^[4]는 NREL에서 개발한 구조 전처리 툴로, 단면 형상 및 구조 입력 생성을 지원하나 사용자의 수작업 입력 비중이 높아 대형 블레이드 설계에는 적합하지 않다.

최근에는 DTU와 NREL을 중심으로 MDAO(Multidisciplinary Design Analysis and Optimization)^[5] 및 디지털 트윈 기반 풍력 시스템 설계 연구가 활발히 진행되고 있다. OpenMDAO, BeamDyn, AeroDyn 등 모듈을 연계한 시스템 수준의 최적화 프레임워크가 제안되고 있으나, 이는 블레이드의 상세 구조 설계보다는 터빈 전체 성능 분석과 제어 최적화에 초점을 두고 있다. 또한, 이러한 프레임워크는 대부분 GUI가 없거나 사용자 인터페이스가 제한적이기 때문에 실무에 바로 적용하기에는 어려움이 있다.

결과적으로, 형상 생성, 내부 구조 배치, 적층 정의, 해석 모델 구성에 이르는 전체 구조 설계 과정을 하나의 일관된 자동화 흐름으로 통합한 플랫폼은 아직 부족한 실정이다. 이는 설계 변경 발생 시 반복 작업 부담을 높이고, 최적화 및 인증 프로세스에도 지장을 초래하며, 실제 제작 단계에서의 오류 발생 가능성을 증가시키는 원인이 된다.

2.2 자동화 설계 프레임워크 구성

본 연구에서는 상기 문제점을 해결하고자 블레이드 구조 설계의 모든 단계를 자동화할 수 있는 통합 플랫폼 BladeFORGE¹⁾를 개발하였다. BladeFORGE는 구조 설계 프로세스의 각 단계를 체계적으로 정의하고, 입력 데이터로부터 형상 생성, 적층 설정, 격자 모델링, 해석 입력 생성까지 일관되게 자동 수행할 수 있도록 설계되었다.

사용자는 초기 형상 정보(Span 방향 위치, 단면 형상 좌표, Chord, Twist), 내부 보강재 배치 위치, 재료 종류 및 적층 규칙 등을 입력하면, 시스템은 이를 기반으로 3차원 형상을 보간하여 모델을 생성하고, 단면별 layup 정보를 정의하여 격자를 자동 구성한다. 이후 ABAQUS²⁾ 해석 입력 파일과 VABS³⁾(Variational Asymptotic Beam Section)

1) **Blade Fast&Optimal stRuctural desiGn Expertise** (BladeFORGE)

2) 복합재 구조 해석에 널리 사용되는 상용 유한요소 해석 SW

단면 분석 입력 파일을 자동으로 생성함으로써 구조 정적 해석과 단면 관성 및 강성 특성을 분석을 신속히 수행할 수 있다.

특히, 본 프레임워크는 설계자의 반복 설계를 지원하기 위한 데이터 기반 구조를 도입하여, 입력 조건만 수정하면 전체 모델이 자동 갱신되도록 구현되었다. 이로 인해 설계 변경 시마다 수작업으로 형상 및 격자를 다시 구성해야 하는 기존 문제를 극복할 수 있다. 해석 후에는 변위, 응력, 변형률, 강성분포 등 주요 응답을 자동 수집하고 시각화하는 후처리 기능도 포함되어 있어, 해석 결과에 기반한 신속한 설계 검토가 가능하다.

BladeFORGE의 주요 기능은 다음과 같다.

- (1) 단면 형상 보간, 내부 구조 구성, 적층 범위 자동화 등 기존 설계 단계의 반복 작업을 자동화 알고리즘으로 전환,
- (2) 표준화된 입력·출력 데이터 구조를 통해 설계-해석 간 정합성과 추적성을 확보,
- (3) 후처리 결과 자동 수집·정리 기능으로 설계 평가의 정량화 및 반복 설계 기반 최적화 지원.

이러한 기능은 하나의 통합 사용자 인터페이스에 구현되어 있어, 설계자는 복잡한 명령어 없이 시각적 인터페이스를 통해 블레이드 구조 설계를 효율적으로 수행할 수 있다. BladeFORGE는 구조 설계 자동화의 생산성 향상뿐 아니라, 향후 디지털 트윈 기반의 설계 고도화 및 인증 체계 통합에도 활용 가능한 기반 기술로 확장할 수 있다.

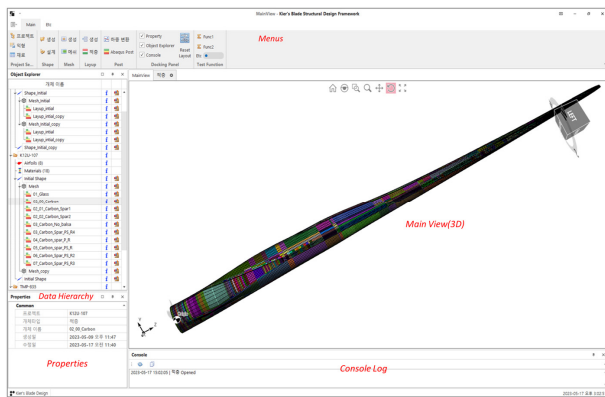


Fig. 1. BladeFORGE main GUI

3) 상용 복합재 빔 단면 해석용 유한요소 도구

3. 알고리즘 구성 및 설계로직

3.1 설계 알고리즘 개요

BladeFORGE 플랫폼은 풍력 블레이드 구조설계의 전 과정을 자동화된 설계 알고리즘으로 통합하였다. 공력 형상 및 설계 조건을 입력으로 하여, 3차원 형상 생성부터 구조 격자 분할, 적층 설계, 유한요소 해석 모델 생성 및 후처리까지 일관된 설계 흐름을 제공한다. 전체 알고리즘의 구성은 Fig. 2에 제시된 바와 같다.

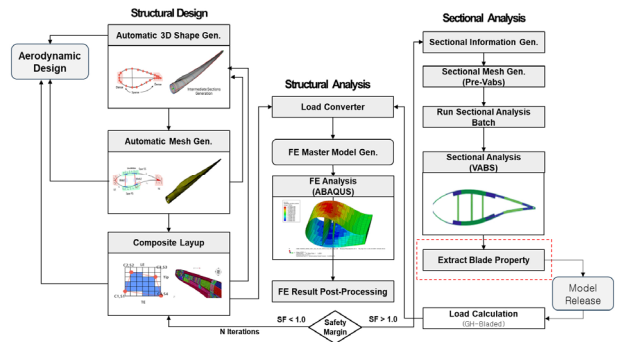


Fig. 2. BladeFORGE algorithm workflow

3.2 BladeFORGE 플랫폼 개발 구조

사용자 인터페이스는 C# 기반으로 구현되었으며, 연산 성능이 요구되는 핵심 알고리즘은 C++로 작성되었다. 일부 단면 처리 알고리즘은 MATLAB 연산 모듈을 내장하여 처리하였다. 데이터 관리를 위해 MariaDB 기반의 관계형 데이터베이스를 채택하였으며, 설계 이력 추적과 반복 설계를 지원한다.

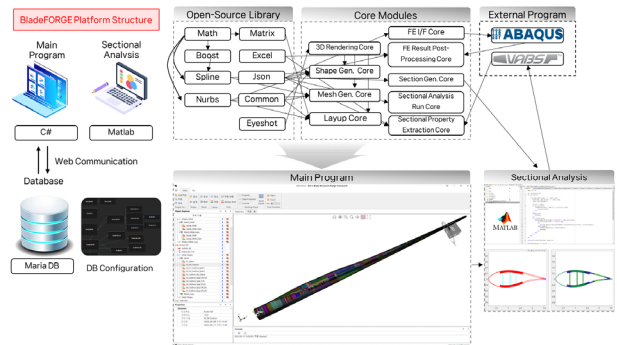


Fig. 3. BladeFORGE program structure

3.3 블레이드 3차원 형상 자동 생성 모듈

형상 생성 모듈은 공력 설계 결과로부터 도출된 무차원 단면 좌표와 길이 방향 파라미터(Chord, Twist 등)를 기반으로 블레이드 외형을 자동으로 모델링한다.

단면 좌표의 균일한 분포를 위해 Cosine Spacing 방식으로 x좌표를 재구성하고, 곡률 연속성을 확보하기 위해 PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)^[6] 보간 기법(1)을 적용하여 y좌표를 계산한다.

$$y(x) = h_{00}(t)y_i + h_{10}(t)hm_i + h_{01}(t)y_{i+1} + h_{11}(t)hm_{i+1} \quad (1)$$

where

- x : 보간위치
- x_i, x_{i+1} : 보간구간시작및 끝좌표
- y_i, y_{i+1} : 해당구간함수값
- m_i, m_{i+1} : 각구간의 접선기울기
- h : 구간길이, $x_{i+1} - x_i$
- t : 정규화된 위치, $(x - x_i)/h$
- $h_{00}, h_{10}, h_{01}, h_{11}$: Hermite basis funcion
- $h_{00}(t) = 2t^3 - 3t^2 + 1$
- $h_{10}(t) = t^3 - 2t^2 + t$
- $h_{01}(t) = -2t^3 + 3t^2$
- $h_{11}(t) = t^3 - t^2$

이후 Chord, Twist, Offset, 길이 방향 위치 정보를 바탕으로 스케일링(Scaling), 회전, 이동 변환(2)을 적용하여 단면 형상을 배치하며, 단면 간의 연속성을 유지하기 위해 중간 단면을 보간하여 3차원 외형을 구성한다.

$$p' = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot p \quad (2)$$

where

- p : Original Points
- p' : Transformed Points
- T_1 : Blade Traslation
- T_2 : Chord Scaling
- T_3 : Twist Rotation
- T_4 : Airfoil Local Offset

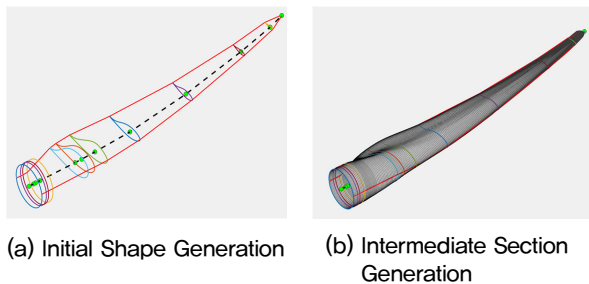


Fig. 4. 3D blade shape generation

마지막으로 Trailing Edge Bonding 두께를 반영하여 형상을 보정함으로써 실제 제작 조건 및 구조 적합성을 확보한다.

3.4 블레이드 구조 격자 자동 생성 모듈

본 모듈은 풍력 블레이드의 구조 해석을 위한 3차원 Shell 기반 격자를 자동으로 구성한다.

3차원 형상 모듈에서 생성된 각 단면은 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 곡선^[7]으로 정의하여, 주요 구조물의 절점은 해당 곡선상의 위치를 기준으로 자동 선정된다. LE/TE 구간 및 Spar Cap 폭은 곡선의 길이 정보를 기반으로 적분 방식으로 계산되며, 곡선 길이(L)는 다음과 같은 수치 근사 방식(3)으로 정의된다.

$$L \approx \sum_{i=1}^n || C(u_i) - C(u_{i-1}) || \quad (3)$$

where

$$u_i = \frac{i}{n}, i = 1, 2, 3, \dots, n$$

여기서, $C(u)$ 는 NURBS 곡선상의 점을 나타내며,

$u \in [0, 1]$ 범위를 n등분하여 직선 간 거리의 누적합으로 전체 곡선 길이를 근사한다.

Spar Cap Center와 Web의 위치는 블레이드 중심선을 기준으로 정의된 y 좌표를 NURBS 곡선에 수직 투영하여 추가 절점을 생성하며, 이때 유사한 방식이 적용되지만 y 방향 성분만을 고려한다.

정의된 주요 절점(Key Points)을 기준으로, 사용자가 입력한 Seed 값을 적용하여 구조 격자 분할이 수행되며, 해당 Seed에 따라 NURBS 곡선 상에서 추가적인 격자 점이

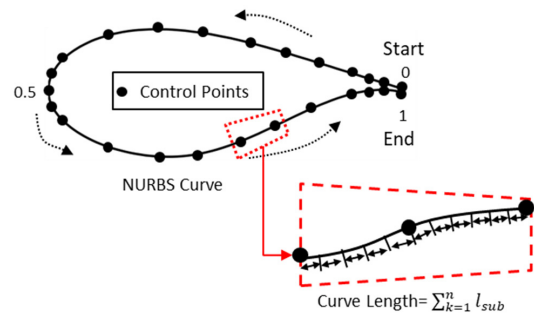


Fig. 5. NURBS curve generation and key point identification

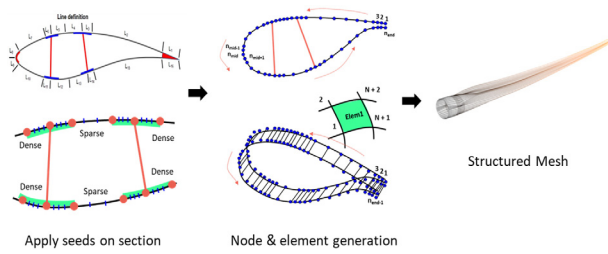


Fig. 6. Structured mesh generation process

균등하게 생성된다.

단면에 정의된 절점의 Node Numbering을 수행한 뒤, 해당 노드를 기반으로 정렬 구조 격자(Structured Mesh)를 생성한다. 이때 적층 방향을 고려하여 Element를 연결하고, 최종적으로 유한요소 해석에 적합한 형식으로 격자 정보를 출력한다.

3.5 복합재 적층 자동화 모듈

적층 설계 모듈은 구조 격자 위에 복합재 적층 정보를 자동으로 매핑하고, 해석 입력 형식으로 변환하는 기능을 수행한다.

적층 설계는 블레이드의 사전에 정의된 Zone(Pressure Side, Suction Side, Web(s), Trailing Edge)을 기반으로 정의된 적층 패턴 정보를 생성하는 것으로 시작된다. 구조 격자 생성 시 정의된 각 단면의 Element 순번 정보를 기반으로 적층 정보를 정의하며, 적층 재료, 두께, 반복 횟수, 적용 길이와 구간의 정보를 포함하여 입력된다.

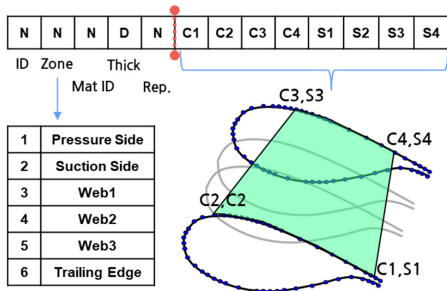


Fig. 7. Layup pattern definition

적층 설계는 2D 공간에서 정규화된 격자 정보와 적층 영역 간의 겹침(Overlap)을 기반으로 수행된다. 각 요소(Element)에 대해 전체 면적의 50% 이상이 적층 영역과 겹

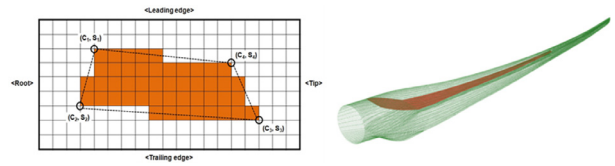


Fig. 8. Layup pattern projection on normalized grid

치는 경우, 해당 요소에 적층이 적용된 것으로 판단한다.

이후 동일한 적층 조건을 갖는 요소들은 그룹화되어 Element Set으로 정의되며, 이를 기반으로 Node, Element, Material 정보를 포함한 ASCII 형식의 해석 입력 파일이 생성된다.

또한 하중 부여를 위한 Control Node 정의와 파손 해석 적용이 가능하도록 설계되어, 전체 복합재 구조 해석이 일관되게 수행될 수 있도록 한다.

3.6 해석 모델 자동화 및 후처리 모듈

생성된 복합재 적층 정보와 격자 데이터는 유한요소 해석 도구에 적합한 형식으로 자동 변환된다. 전체 블레이드에 대한 구조 모델은 FEM 기반(ABAQUS)으로 구성되며, 단면 해석(VABS)^[8]을 위한 입력 파일도 자동으로 생성된다. 구조 해석 및 단면 해석은 배치 방식으로 수행되며, 해석이 완료되면 자동으로 결과를 후처리하여 응력 분포, 강성 특성, 파손 여부 등을 계산한다.

특히, 파손 여부는 재료 물성 및 하중 안전계수를 고려하여 최대 변형률(Strain)이 허용 범위를 초과하지 않는지 평가함으로써 판단한다.

이러한 연계 흐름을 통해 설계 변경이 발생하더라도 최소한의 입력만으로 전체 해석 모델을 신속히 재생성할 수 있으며, 반복 설계 및 최적화 과정에서 높은 효율성을 확보할 수 있다.

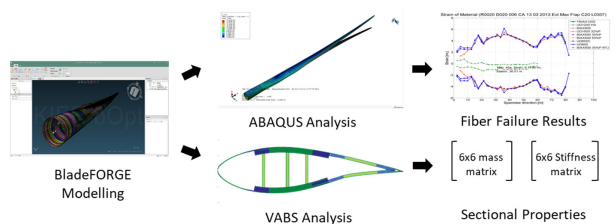


Fig. 9. Workflow of analysis and post-processing

4. BladeFORGE 적용 사례 및 설계 결과

4.1 블레이드 설계 개요

BladeFORGE 플랫폼의 설계 자동화 기능을 실무에 적용 가능한 수준으로 검증하기 위해, 본 연구에서는 국내 중소형 풍력 시스템 개발사의 30 kW급 블레이드 국산화 설계 사례를 대상으로 하였다. 해당 터빈은 기존에 외산 블레이드를 사용해왔으며, 일부 공력 성능 제원은 확보되어 있었으나, 블레이드 단면 형상 좌표나 내부 구조 구성 등 적층 설계 정보는 제공되지 않은 상황이었다. 이에 따라 본 연구에서는 제한된 설계 정보를 바탕으로 블레이드 전 과정을 자체적으로 설계하는 방식으로 접근하였으며, 이를 통해 BladeFORGE의 설계 유연성과 실무 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

설계의 주요 목표는 외산 블레이드와 동일한 구조 하중 및 성능 조건을 만족하면서 전체 중량을 저감하는 데 있었으며, 반복 설계가 요구되는 구조 최적화 과정에서도

Table 1. Turbine specification

Design Conditions		Target Specifications
Turbine Capacity		30 kW – 50 kW
Blade Length		7,515 m
Power Coefficient (Cp)		$C_p \geq 0.46$
Blade Weight		≤ 150 kg
Spar System		Two-web spar
Root Connection		30 x M12 bolts
Extreme Moment	Flapwise	55.1 kNm @ Root (50 kW)
	Edgewise	45.2 kNm @ Root (50 kW)

Table 2. Material specification

Material	E11 (MPa)	E22 (MPa)	nu	G	Density [kg/m ³]
UD	41100	9340	0.27 (0.06)	2910	1900
2AX	10000	10000	0.65	9000	1931
3AX	30715	14082	0.52 (0.24)	6835	1931
FORM1	84	130	0.3	40	80
FORM2	105	73	0.3	28	192
Insert	89600	89600	0.33	33940	4500
Chopped	7000	7000	0.33	6300	1931
Adhesive	2300	2300	0.33	1	1200

BladeFORGE의 자동화 기능을 통해 설계 생산성을 극대화하는 것을 함께 검토하였다.

주요 설계 조건 및 설계 목표는 Table 1에 정리되어 있으며, 블레이드는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)를 주요 재료로 사용하여 복합재 적층 설계를 수행하였다(Table 2 참조).

본 설계는 단순한 대체를 넘어 성능 개선과 구조적 신뢰성 향상을 함께 목표로 하였으며, 이에 따라 설계 하중은 기존 30 kW급 운전 조건을 기준으로 하되, 향후 50 kW급 시스템까지 적용 가능하도록 상향 보정하여 정하중 시험 조건 기반의 정적 굽힘 하중으로 설정하였다.

4.2 공력 설계 요약

공력 설계에서는 기존 블레이드의 외형 특징을 최대한 유지하면서도, 동등한 성능을 확보하고 구조 설계를 위한 입력값을 확보하는 것을 목표로 하였다. 사용 가능한 상세 설계 도면이나 익형 정보가 부재한 상황에서, 외형 측정 결과와 실측 성능 데이터를 바탕으로 DU 및 NACA 계열의 익형을 조합하여 형상을 유추 및 재구성하였다.

설계 입력 조건으로는 최대 코드 길이 약 0.75 m, 루트 부 실린더 외경 약 0.42 m가 주어졌으며, 이를 기반으로

Table 3. Reference airfoil sections and locations

Loc. (m)	Chord (m)	Twist (deg)	Thickness (%)	Airfoil
0	0.42	0	100	Cylinder
0.1	0.42	5	100	Cylinder
1.6135	0.74	11.8	39.55	DU40
2.092	0.752	10.187	30	DU30
3.9	0.5091	4.55	21	NACA21
5.92	0.3576	1.494	18	NACA18
7.515	0.05	2.881	18	NACA18

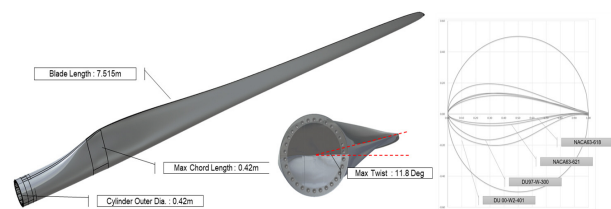


Fig. 10. Aerodynamic design concept

전체 블레이드 길이에 대해 총 41개 단면 위치에서 공력 설계 정보가 도출되었다(Table 3 참조).

공력 형상 설계 및 성능 분석에는 한국에너지기술연구원(KIER)에서 개발한 공력 설계 및 해석 도구인 KIER-AeroDA가 활용되었으며, 실제 운전 조건에 근접한 형상을 효율적으로 도출하는 데 기여하였다.

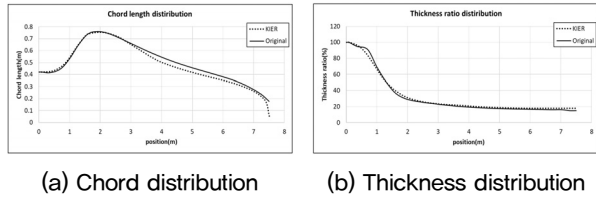


Fig. 11. Chord and thickness distribution

본 논문은 구조 설계를 주요 대상으로 하므로, 공력 설계에 대한 상세 절차는 생략하며 주요 결과만 기술하였다.

4.3 구조 설계 및 해석

BladeFORGE 기반 구조 설계 알고리즘을 통해 3차원 형상 생성, 구조 격자 분할, 복합재 적층 모델링 및 반복 설계 기반 적층 최적화를 수행하였다. 생성된 유한요소 모델에 대해 극한 하중 해석을 수행하여 구조 안전성과 설계의 타당성을 검토하였으며, 추가로 단면 구조 해석을 통해 블레이드 물성을 도출하고 최적화 결과를 정량적으로 평가하였다.

4.2.1 3차원 정밀 형상 생성

3차원 형상 생성은 길이 방향으로 정의된 41개의 공력 단면 정보를 기반으로 수행되었으며, PCHIP 보간을 통해 총 244개의 단면으로 확장하였다. 각 단면은 201개의 좌표점으로 구성되어 블레이드 전체 형상 모델을 완성하였다.

생성된 3차원 블레이드 데이터 정합성을 확인하기 위하여, 핵심 공력 정보인 Chord, Twist, Thickness 데이터를 기준으로 RMS 상대 오차(RMS Relative Error)를 계산하였다. 검토 결과, Chord는 0.04%, Twist는 0.29%, Thickness는 1.04%의 상대 오차를 보였다. 상기 항목 모두 차원화된 기하학적 좌표 기반으로 계산되기 때문에 TE 좌표 보정 및

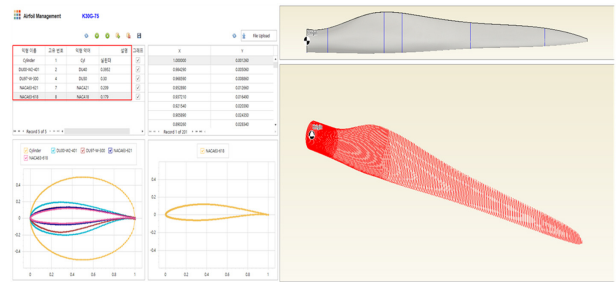


Fig. 12. 3D blade shape generation using BladeFORGE

미세한 정렬 오차에 따라 일부 차이가 발생할 수 있으나, 전체적으로 1% 내외의 정합도가 확보되어 설계 자동화 결과의 신뢰성을 충분히 확보한 것으로 판단된다.

4.3.2 구조 격자 생성

블레이드 내부 구조는 2 Web의 Spar System으로 구성하였으며, 소재 사용 및 설계 내용은 Table 4에 정리하였다.

단면은 14개 구간(15개 주요 절점)으로 정의되었으며, 구간별 적정 Seed를 부여하여 구조 격자 모델을 생성하였다. 총 21,435개 노드, 22,036개의 정렬 격자 요소가 생성되었다(Table 5 참조).

Table 4. Material & design summary for components

Component	Material	Applicability/Location
Spar Cap	UD	Width 150 mm, to ~6.75 m
Web	2AX, Form	Centerline ±60 mm, ~6.7 m
Skin	3AX	Applied over entire span
Root	2AX, Chopped	Included M12 Steel Insert
Internal filler	Form	All other regions

Table 5. Summary of mesh configuration

Category		Quantity
Section Division		14 sections (15 nodes)
Nodes	Total	21,435
	Shell	16,170
	2 Webs	5,264
	Tip	1
Elements (Structured mesh)	Total	22,036
	Shell	15,696
	2 Webs	5,904
	TE Bonding	436

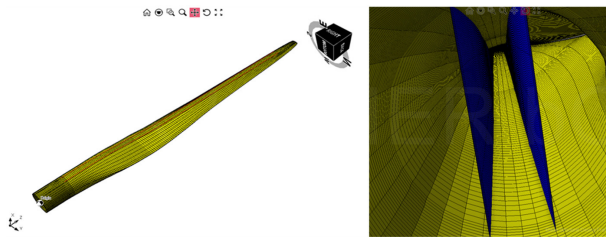


Fig. 13. Mesh generation using BladeFORGE

구조 격자는 평균 Aspect Ratio⁴⁾ 2.06, Skewness⁵⁾ 0.02로 대부분 양호한 품질을 확보하였으며, 일부 경계 영역에서 최대 Aspect Ratio가 5.17로 다소 높은 값을 보이지만 전체적으로 요소 형상이 적절하게 형성되어 해석 신뢰성에 는 문제가 없는 것으로 판단된다.

4.3.3 복합재 적층 모델링

복합재 적층 설계는 각 구조부의 요구 조건을 정밀하게 반영하여 수행되었다. Spar Cap에는 UD 소재가 중심선을 기준으로 폭 150 mm 범위에 적절히 배치되었고, Web 구간에는 2AX 및 Form 소재가 중심선 ±60 mm 범위에 정확히 적용되었다. Skin 영역은 전체 Span에 걸쳐 3AX 소재로 균일하게 구성되었으며, LE 및 TE 보강 구간과 Form 충전재 구간도 설계 기준에 따라 적층되었다. 루트부에는 40 mm 이상의 Chopped Fiber 소재가 적용되었으며, 최종적으로 Shell 구간에는 37개, 각 Web에는 7개의 적층 패턴이 반영되어 전체 블레이드의 하중 요구 조건을 만족하는 적층 설계가 완성되었다.

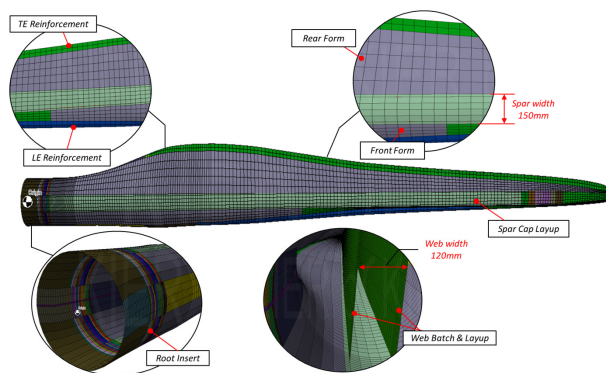


Fig. 14. Layup pattern visualization using BladeFORGE

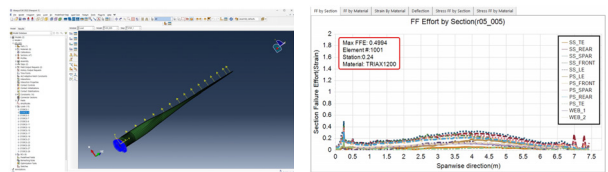
- 4) 요소의 길이/높이 비율 (1에 가까울수록 이상적, ≤ 5 권장)
- 5) 요소의 왜곡 정도 (0에 가까울수록 이상적, ≤ 0.5 권장)

4.3.4 유한요소 해석 및 최적화

복합재 적층 정보와 하중 조건을 바탕으로 ABAQUS 해석 모델이 자동 생성되며, 요소 구성부터 경계 조건까지 모든 입력이 자동화되어 생성된다. 이를 통해 반복 설계 및 최적화를 신속하고 효율적으로 수행하였으며, 설계 조건을 만족하는 최종 구조안을 도출할 수 있었다.

구조 해석을 위한 하중 조건은 극한 Flapwise 및 Edgewise 모멘트 분포를 shear distribution으로 변환하고, 안전계수(Safety Factor) 1.5를 적용하여 등가 분포 하중 형태로 환산하였다. 이러한 하중 조건은 ABAQUS^[9] 해석에 자동으로 연계되어 구조 응답을 평가하는 데 활용되었다.

최종 설계 모델은 22회에 걸친 반복 설계를 통해 중량과 안전 기준을 모두 만족하도록 최적화되었으며, 결과적으로 블레이드의 전체 중량은 약 142 kg, 무게중심(COG)은 2.17 m로 도출되었다. 최대 처짐은 Flapwise 극한 하중 조건에서 약 0.83 m로 분석되었으며, 섬유 파단 지수(Fiber Failure Effort)는 최대 0.4994로 나타나 1.0 미만의 기준을 만족하여 구조적 안정성을 확보한 것으로 판단된다.



(a) FEA using ABAQUS (b) FEA result post-processing

Fig. 15. FE Analysis & Post-processing

4.3.5 단면 해석 및 물성 도출

단면 해석은 구조 설계가 완료된 후 각 단면의 형상 및 적층 정보를 기반으로 수행되었으며, 이를 위해 VABS^[10] 해석용 입력 파일이 자동으로 생성되었다. 자동 생성 기능은 반복 설계 과정에서 빠른 물성 검토를 가능하게 하고, 수작업 입력 오류를 방지하는 데 효과적이다.

총 41개 단면에 대해 수행된 VABS 해석 결과는 Flapwise 및 Edgewise 방향의 강성 및 관성 특성을 정량적으로 도출하였으며, 이를 통해 설계된 블레이드의 구조 성능을 단면 수준에서 체계적으로 검증할 수 있었다. 특히, BladeFORGE 기반의 자동화 구조설계를 통해 단면 형상 및 적층 조건의 반복 최적화가 신속하게 이루어졌으며, 그 결과 전체 중량

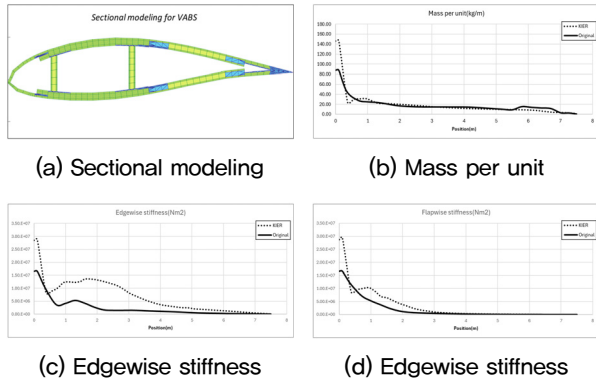


Fig. 16. Sectional modeling & structural property comparison

은 감소하고도 주요 방향의 강성은 오히려 증가하는 구조 효율성 개선을 빠르게 달성할 수 있었다.

4.3.6 구조 설계 및 해석 통합 수행 결과

전체 구조 설계 작업은 사전 데이터 준비부터 형상 정의, 적층 최적화, 유한요소 해석까지의 전 과정을 포함하여 10 일 이내에 완료되었다. 자동화된 설계 로직의 도입을 통해 반복 설계와 해석이 신속하게 이루어졌으며, 이를 통해 구조 설계의 생산성과 설계 대응 속도 측면에서 우수한 성과를 확인할 수 있었다.

4.4 실물 블레이드 제작

설계 블레이드는 자체 구축한 제작 설비를 이용해 제작되었으며, Infusion 공정을 적용하여 복합재 적층을 수행하였다. 이후 내부 보강 구조물의 설치 및 접합을 통해 블레이드를 완성하였다.

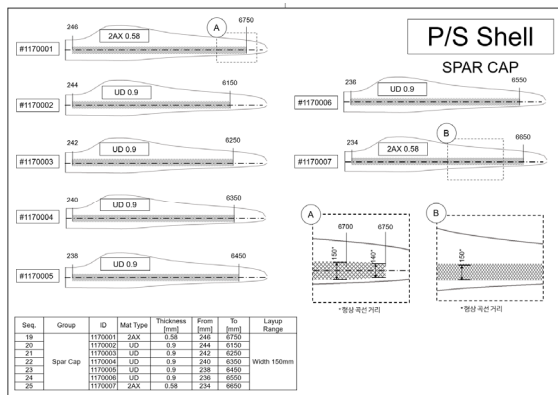


Fig. 17. Blade drawing for scap cap region

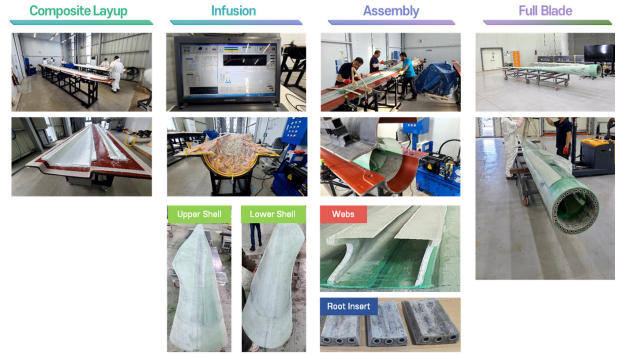


Fig. 18. Manufacturing process of 7.5 m blade

4.5 블레이드 시험 검증 수행

완성된 블레이드에 대해 중량 측정과 고유진동수 분석을 수행하였다. DNV 규정^[11]에 따라, 중량은 $\pm 3\%$, 고유진동수는 $\pm 5\%$ 이내일 때 설계 신뢰성을 확보할 수 있다. 특히 고유진동수는 블레이드의 전체 강성과 질량 분포를 반영하는 대표 지표로, 설계 특성의 유효성을 판단하는 데 중요한 기준이 된다.

4.5.1 중량 측정 시험

블레이드 중량 측정은 정밀도 ± 0.1 kg 중량저울을 활용하여 측정하였으며, 단품 상태 및 완성품 상태에서 측정하여 비교하였다. 최종 제작된 블레이드는 전체 중량에서 약 0.9%의 오차 범위를 보여 설계가 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었으며, 다만 Bonding 부위의 중량에 대해서는 비교적 큰 오차가 발생한 것으로 나타났다(Table 6 참조).

Table 6. Summary of mass

Component	Design [kg]	Measured [kg]	Deviation [%]
Shell	91.4	93.5	2.3
2 Webs	21.7	22.6	4.1
Root Insert	20.4	20	-2.0
Adhesive	8.9	7.6	-14.6
Total	142.4	143.7	0.9

4.5.2 고유진동수 시험

자체 구축한 정적 시험 설비를 활용하여 본 시험을 수행하였다. 고정 스탠드에 블레이드를 설치하고 가속도 센서를 부착하여 고유진동수를 측정하였다. 1차, 2차 Flapwise,

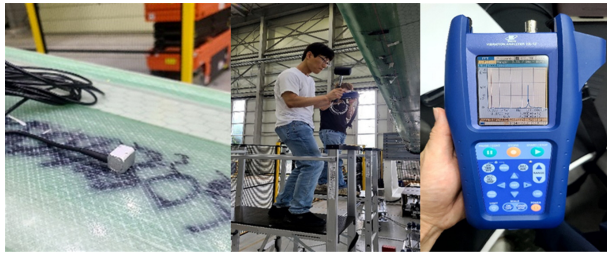


Fig. 19. Natural frequency measurement

Table 7. Summary of natural frequency

Natural Frequency	Design [Hz]	Measured [Hz]	Deviation [%]
1 st Flapwise	3,984	3,875	-2.7
1 st Edgewise	6,396	6,375	-0.3
2 nd Flapwise	13,28	12,7	-4.4

1차 Edgewise 고유진동수를 비교 분석하였으며 모든 항목에서 ±5% 이내의 오차(Table 7 참조)를 확인하였다.

4.5.3 시험 결과 분석

시험에서 측정된 중량 및 고유진동수의 결과를 해석 결과와 비교하여 설계의 정확도를 평가하였다. 분석 결과, 자동화된 구조 설계 모델은 실제 측정값과의 오차가 국제 기준 허용 범위 이내에 있음을 확인하였으며, 이를 통해 구조 해석 기반 설계의 신뢰성이 실험적으로 검증되었다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재 블레이드 구조설계 자동화 플랫폼 BladeFORGE를 개발하고, 이를 국내 30 kW급 풍력 블레이드 국산화 설계 사례에 적용하여 실무 활용 가능성과 구조 성능 개선 효과를 검증하였다. 플랫폼은 형상 정의, 격자 분할, 적층 설계, 해석 입력 생성, 구조 해석 및 단면 물성 산출까지 전 과정을 자동화함으로써 반복 설계에서의 정확도 확보와 생산성을 크게 향상시켰다.

제한된 공력 정보와 설계 조건에도 불구하고, 본 플랫폼을 통해 설계 중량을 감소시키는 동시에 Flapwise 및 Edgewise 강성은 향상되는 결과를 얻었다. 이는 구조 재료 배분과 적층 패턴 최적화를 통해 최소의 재료로 최대의 구조 성능을

달성했음을 의미한다.

또한, 실제 제작된 블레이드를 대상으로 중량 및 고유진동수에 대한 측정 실험을 수행한 결과, 해석 결과와의 정량적 비교를 통해 설계 정확성과 구조 해석 기반 프로세스의 신뢰성을 실험적으로 검증하였다.

향후에는 실험 데이터를 바탕으로 알고리즘을 지속적으로 고도화하고, 설계-제작-시험-운영 전 주기 데이터를 연계한 디지털 트윈 기반 구조 성능 예측 및 실시간 최적 설계 시스템으로의 확장을 추진할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(RS-2025-02413491 국내 환경을 고려한 20 MW+급 해상풍력 터빈 핵심부품 기본설계).

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), “The 11th Electric Power Supply Basic Plan, Republic of Korea” Announcement No.2025-238, <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLc01b2801b/70152/view>.
- [2] Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.O., and Paschereit, C.O., 2013, “QBlade: An open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines”, *Int. J. Emerg. Tech. Adv. Eng.*, vol. 3(3), 264-269.
- [3] Ansys Inc., “Ansys Composite PrepPost (ACP) for developers”, Accessed 11 Aug 2025, <https://developer.ansys.com/docs/acp>.
- [4] Sandia National Laboratories, “Numerical Manufacturing And Design (NuMAD) Tool for Wind Turbine Blades”, Accessed 10 Aug 2025, <https://numad.readthedocs.io/en/latest/>.
- [5] Pavese, C., Tibaldi, C., Zahl, F., and Kim, T., 2017, “Aeroelastic multidisciplinary design optimization of a swept wind turbine blade”, *Wind Energy*, 20(12), 1941-

- 1953, <https://doi.org/10.1002/we.2131>.
- [6] Fritsch, F.N., and Carlson, R.E., 1980, “Monotone Piecewise Cubic Interpolation”, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **17**(2), 238-246.
- [7] Herrema, A.J., Kiendl, J., and Hsu, M.C., 2019, “A framework for isogeometric-analysis-based optimization of wind turbine blade structures”, *Wind Energy*, **22**(2), 153-170, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.2276>.
- [8] Yu, W., Hodges, D.H., and Ho, J.C., 2012, “Variational asymptotic beam sectional analysis – An updated version”, *Int. J. Eng. Sci.*, **59**, 40-64.
- [9] Dassault Systèmes, ABAQUS, Version 2022, SIMULIA.
- [10] AnalySwift LLC., VABS, Version 4.0.
- [11] DNVGL, “Rotor blades for wind turbines”, DNVGL-ST-0376, <https://arc.global/articles/docs/rotor-blades-DNVGL-ST-0376.pdf>.