

# 패브릭 블레이드를 적용한 100W급 수직축 풍력발전기 개발

허영근, 정원혁, 정종현\*  
(주) 디엔디이

## Development of 100 W Vertical Axis Wind Turbine with Fabric Blades

Young-Gun Heo, Won-Hyuk Jung, Jong-Hyun Jeong\*  
DNDE Inc.

**요약** 본 논문은 패브릭을 이용한 100 W급 사보니우스형 수직축 소형 풍력발전기의 개발에 대한 내용이다. 패브릭 소재를 적용하여 블레이드 파손에 의한 사고를 예방하고 저속회전이 가능한 사보니우스형태를 적용하여 로터 회전에 의한 위험감을 줄이고자 하였다. 기본 설계를 통하여 로터의 형상 치수를 결정하고 유동해석을 통하여 정격 조건에서의 정격 출력을 확인하였다. 그리고 구조적 안전성을 고려하기 위하여 정격 출력 조건과 극한 조건에 대한 구조해석을 수행하였으며 정격 풍속 조건에서의 안전율은 30.4 이상, 극한 풍속 조건에서의 안전율은 10.5로 구조적 안전성을 확인하였다. 유동해석 결과, 106.8 W의 출력을 확인하였으며 이를 토대로 풍력발전기 로터를 제작하였다. 풍동시험을 통하여 로터의 출력을 검증하였으며 개선된 로터의 풍동 시험 결과는 107.9 W가 나타남을 확인하였다.

**Abstract** This paper presents the development of a 100 W Savonius small VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) using fabric blades. The aims were to prevent accidents caused by blade damage using fabric material and enable low-speed rotation by adopting the Savonius-type rotor, reducing the hazards associated with rotor rotation. The dimensions of the rotor were determined through the basic design. Computational Fluid Dynamics (CFD) confirmed the rated power output under rated operating conditions. In addition, structural analysis was performed for both rated wind speed conditions and extreme wind speed conditions to assess the structural safety. The safety factors were 30.4 or higher at rated wind speed conditions and 10.5 at extreme wind speed conditions, confirming the structural integrity. The CFD results confirmed the power output of 106.8 W. The wind turbine rotor was manufactured based on the CFD results. Wind tunnel testing was conducted to validate the rotor performance, and the wind tunnel test results from the improved rotor achieved 107.9 W.

**Keywords** : VAWT(Vertical Axis Wind Turbine), Fabric, Savonius, CFD(Computational Fluid Dynamics), Wind Tunnel Test

### 1. 서론

탄소중립을 위한 노력으로 신재생에너지에 대한 연구는 활발히 진행 중이며 이중 풍력에너지를 이용하는 풍

력발전기는 세계적으로 많은 연구와 제품 개발이 진행되고 있다[1,2].

하지만 출력에 중점을 둔 풍력발전기 시장은 점점 대형화되고 있으며 인적이 드문 곳에서 단지를 이루어 많

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20203030020370)

\*Corresponding Author : Jong Hyun Jeong(DNDE Inc.)

email: jhjeong@dnde.co.kr

Received August 24, 2023

Accepted October 6, 2023

Revised October 5, 2023

Published October 31, 2023

은 면적을 차지하고 있다. 반면에 소형 풍력발전기는 도심 등에서 설치 가능하지만 고속 회전으로 인한 소음으로 위협감, 블레이드 파손에 의한 대인사고 등의 문제를 야기시켜 사회적 인식이 나빠지고 있다[3].

이를 위하여 패브릭을 풍력발전기 블레이드에 적용하여 블레이드 파손에 따른 사고 위험이 적고 저속회전이 가능한 사보니우스 형태의 로터를 적용하여 시각적 위협감이 없는 주민 친화적인 풍력발전기를 설계, 개발하고자 본 연구를 진행하였다.

풍력발전기 성능을 검증하기 위한 기존 연구로는 컴퓨터 성능의 발전에 따른 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 많은 연구가 진행되어 왔으며 [4,5] 실험적으로 성능을 검증하기 위한 연구도 진행되어 왔다[6].

본 연구에서는 기존 해석적, 실험적 연구를 이용하여 패브릭 블레이드를 이용한 사보니우스형 수직축 풍력발전기를 설계하고 유동해석과 구조해석을 통한 공력특성 및 구조적 안정성을 평가하였으며 실제 제작된 로터를 이용한 풍동시험을 수행하여 풍력발전기 설계를 검증하였다.

## 2. 본론

### 2.1 100W 로터 설계

#### 2.1.1 기본 설계

패브릭 재질의 가공성을 이유로 로터의 형태는 사보니우스 형태로 결정하였다. 사보니우스 로터의 출력 계수는 Fig. 1과 같이 주속비 0.8~1 사이에서 최대로 나타난다.

설계 정격 풍속은 12 m/s로 결정하였으며 설계 정격 출력은 100 W로 정의한 후 사보니우스 로터 형상에 대한 치수 설계를 진행하였다.

$$P_t = \frac{1}{2} \times \rho \times A_w \times V_w^3 \times C_p \times \eta \quad (1)$$

Where  $A_w$  is the incoming flow area of the wind turbine,  $C_p$  is the power coefficient,  $P_t$  is the power output of the turbine,  $V_w$  is the design point of the wind turbine, and  $\eta$  denotes the efficiency of the power conversion.

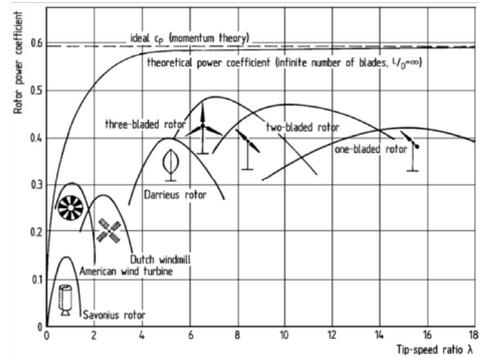


Fig. 1. A Power coefficient that depends on Tip-speed ratio and the type of wind turbine [7]

출력 계수  $C_p$ 는 0.15를 적용하였으며 공기밀도는 IEC 61400-2를 따라  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 을 Eq.(1)에 적용하였다.

Eq.(1)을 통하여 수평면적  $A_w$ 을 도출하였으며 Table 1에 초기 설계 사양을 나타내었다.

Table 1. Design specification of 100 W Savonius type vertical axis wind turbine

Item	Description
Rotor type	Savonius
Blade material	Fabric
Rated power	100 W
Rated wind speed	12 m/s
Rotor diameter	0.6 m
Rotor height	1.2 m

#### 2.1.2 유동해석을 통한 로터 출력 검토

Table 1의 사양을 통하여 3차원 로터 형상을 구현하였으며 이를 통한 3차원 유동해석을 수행하였다.

Fig. 2는 유동해석을 위한 유동장이며 로터 회전축을 기준으로 전방으로 로터직경의 8배, 후방으로는 로터직경의 20배, 폭으로는 로터 직경의 8배에 해당하는 유동영역을 형성하였다.

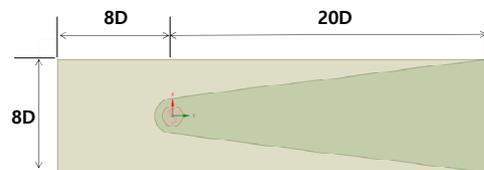


Fig. 2. 3-D model of rotor blade and flow field for the CFD analysis

Fig. 3은 유동해석에 사용된 격자계를 나타내고 있다. 회전체인 로터 주변에서는 바람의 영향에 의한 로터 벽면에서의 복잡한 유동현상을 잘 모사하기 위하여 보다 조밀한 격자계를 구성하였으며 후류영역에도 조밀한 격자계를 구성하였다.

그리고 로터 구조물 벽면에는 삼각기둥 형태의 격자층 레이어로 쌓아서 벽면에서 발생하는 점성효과를 모사할 수 있도록 하였다.

Table 2는 사용된 격자계의 정보를 나타내고 있다. 유동해석에 사용된 총격자수는 57,544,976개이다. 사용된 소프트웨어는 ANSYS CFX이다.

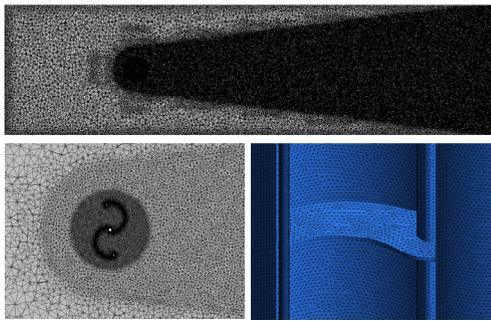


Fig. 3. Grid system of savonius type vertical axis wind turbine for the CFD analysis

Table 2. Grid information

	Number of nodes	Number of elements
Rotational region	13,309,321	40,740,097
Stationary Region	3,002,859	16,804,879
Total	16,312,180	57,544,976

Fig. 4는 유동해석의 경계조건을 간략하게 모사한 것이다. 유동해석은 과도해석 조건으로 수행하였으며 시간 간격은 회전각도 1°에 해당하는 시간을 적용하였다. 입구 유속은 정격 풍속인 12 m/s를 적용하였고 난류 모델은 RANS 계열의 Shear Stress Transport Model(SST-Model)을 사용하였다[8].

정상상태 유동해석을 수행한 후 이를 초기값으로 적용하여 과도해석을 수행하였으며 해석 결과는 로터의 회전이 10회전이 지난 이후 출력이 안정화된 시점에서 도출하였다.

유동해석에 사용된 소프트웨어는 ANSYS CFX 2022R1이다.

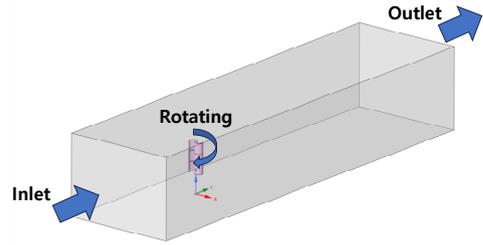


Fig. 4. Boundary conditions of the CFD analysis

Table 3. Detail information of the CFD analysis

Item	Description
Analysis type	Transient analysis
Time step size	Corresponding to 1° rotating angle
Inlet	12 m/s
Outlet	Atmospheric pressure
Blade surface	No-slip condition
Rotational speed	199.87 RPM
Turbulence model	SST model

Fig. 5는 로터 1회전에 대한 출력 변화를 나타내는 그래프이다. 평균 출력은 약 107 W이며 설계값인 100 W 보다 높은 출력을 보이는 것을 확인하였다.

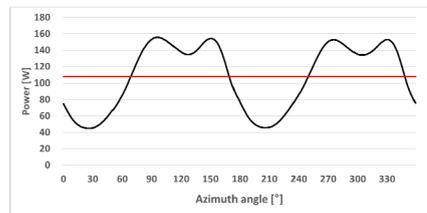


Fig. 5. Power output according to the azimuth angle

## 2.2 100W 로터 제작 및 시험

### 2.2.1 구조해석을 통한 안정성 검토

유동-구조 단방향 연성해석을 통하여 풍력발전기의 구조물 안정성 평가를 수행하였다.

Fig. 6은 100 W급 패브릭 풍력발전기의 구조물을 나타내고 있다. 풍력발전기 구조물은 회전체와 프레임으로 구분되며 회전체에는 축, 스트럿, 측면기둥으로 구성되어 있으며, 프레임에는 알루미늄 프로파일과, 브라켓, 커버 플레이트, 별전기 등으로 구성되어 있다.

Fig. 7은 구조물 3차원 형상에 대한 유한요소모델을

나타내고 있다. SOLID185 요소를 사용하였으며 876,528개의 요소로 구성하였다. 사용된 소프트웨어는 ANSYS LS-DYNA이다.

만족하고 있으며 극한 풍속 조건(Case2)에서도 안전율 10.5로 기준을 만족하였다.

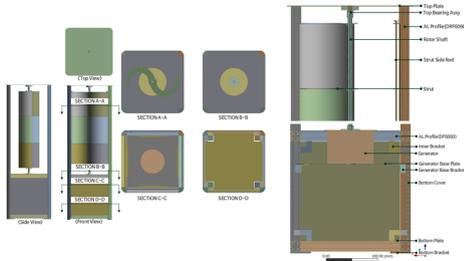


Fig. 6. Structure of wind turbine

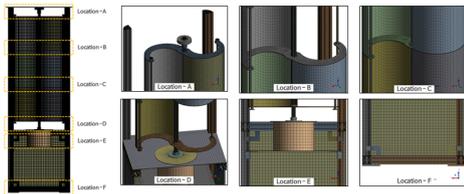


Fig. 7. FEA elements for the Mechanical analysis

Table 4. Detail information of the Mechanical analysis

	Gravity force	Wind speed	Rotor position
Case1-1	9.8 m/s <sup>2</sup>	12 m/s	0°
Case1-2			30°
Case1-3			60°
Case1-4			90°
Case1-5			120°
Case1-6			150°
Case2		25 m/s	0°

Table 4는 구조해석 조건에 대하여 나타내고 있다. 정격 풍속에서 정격 회전수로 회전하고 있는 상태에서의 구조해석(Case1-1 ~ Case1-6)과 극한풍속 조건에서의 구조해석(Case2)으로 구분하였다.

Fig. 8에서는 각 해석 케이스별 경계조건을 나타내고 있다. 회전체에 인가될 압력은 유동해석 결과를 기준으로 30° 간격으로 발생된 압력을 연성하였다. 프레임부에 인가되는 풍압은 풍속을 이용한 정압으로 일괄 적용하였다.

Table 5는 구조해석 결과이며 로터 회전축에서 최대 응력이 발생되었다. 정격 풍속 조건(Case1-1 ~ Case1-6)에서의 안전율은 30.4 이상으로 모두 KS 규격(KS C 8570)에 따른부분 안전율 최소평가 기준인 10 이상을

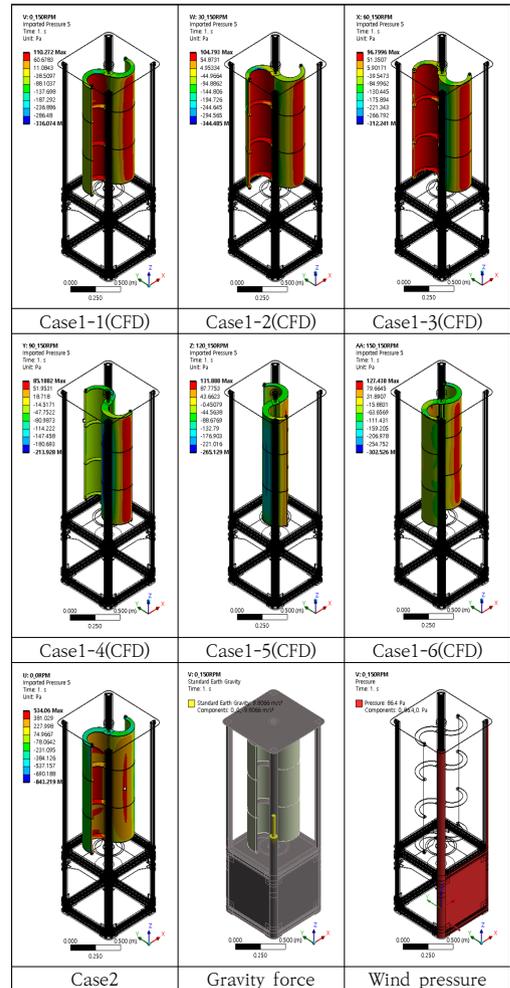


Fig. 8. Boundary conditions for FEA analysis

Table 5. FEA results

	Max. Displacement [mm]	Max. Equivalent Stress [MPa]	Min. Safety Factor
Case1-1	0.599	7.232	37.334
Case1-2	0.587	6.755	39.970
Case1-3	0.541	6.329	42.661
Case1-4	0.374	6.017	44.873
Case1-5	0.504	8.879	30.409
Case1-6	0.532	6.512	41.409
Case2	2.172	25.695	10.508

2.2.2 제작 로터의 풍동 시험

유동해석과 구조해석을 통하여 성능 및 안전성을 검토한 설계안을 토대로 패브릭을 이용한 사보니우스 수직축 풍력발전기 로터를 제작하였다.

Fig. 9는 패브릭 블레이드를 이용한 수직축 풍력발전기의 로터부를 나타내고 있다. 제작한 패브릭 풍력발전기 로터는 제주도에 위치한 한국에너지기술연구원에서 보유한 풍동시험기에서 출력 시험을 수행하였다.



Fig. 9. Proto-type Fabric rotor(Savonius type)

Fig. 9는 패브릭 블레이드를 이용한 수직축 풍력발전기의 로터부를 나타내고 있다. 제작한 패브릭 풍력발전기 로터는 제주도에 위치한 한국에너지기술연구원에서 보유한 풍동시험기에서 출력 시험을 수행하였다.



Fig. 10. Open-jet type wind tunnel facility and experimental setup

Fig. 10은 한국에너지기술연구원에서 보유한 풍동시험기를 나타내고 있다. 해당 풍동시험기는 개방형 풍동시험기이며 최대 풍속 20 m/s, 시험부의 크기는 1 m X 1.5 m이며 시험부 풍속 균일도는 ±1% 이다.

풍속 측정은 풍동 내부 시험부에 장착된 피토 튜브와 토출구에 장착된 열선 타입의 풍속계로 측정한다. 서보모터를 이용하여 로터 회전 속도를 제어하고 토크 센서를 통하여 토크, 회전수 및 방위각 신호를 수집한다.

Fig. 11은 풍동 시험 결과를 나타낸 그래프이다. 각

유속에서 회전수별 출력을 나타내었으며 설계 풍속인 12 m/s에서 설계 출력 100 W이상 나타나는 것을 확인하였다.

Table 6은 정격 풍속 12 m/s, 정격 회전수 199.87 rev/min에서의 해석 결과와 시험 결과를 비교한 것이다.

유동해석 결과 대비 약 15%정도 낮은 실험값을 보이고 있는데 이는 해석 상에서 고려하지 못한 기계적, 환경적 손실이 반영된 것으로 판단 할 수 있다.

설계 출력을 만족하기 위하여 로터의 상하부에 플레이트를 추가한 개선 모델로 시험을 수행하였으며 그 결과 107.9 W로 향상된 출력을 획득할 수 있었다.

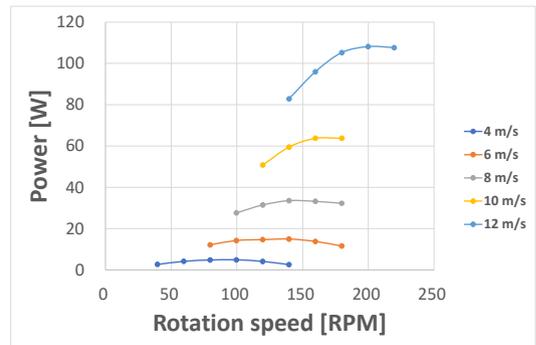


Fig. 11. Graph of power output according to each wind velocity

Table 6. Comparison between wind tunnel results and CFD results

	Rotation Speed [RPM]	Wind Velocity [m/s]	Power output [W]
CFD			106.8
Experiment	199.87	12	90.8
Improvement			107.9

3. 결론

본 논문에서는 패브릭 블레이드를 이용한 100 W급 사보니우스형 수직축 풍력발전기를 설계하였으며 성능 및 구조 안전성을 검토하기 위하여 유동해석과 구조해석을 수행하였다.

유동해석 결과 정격풍속 12 m/s, 정격 회전수 199.87 rpm에서 106.8 W를 확인하였으며 구조해석 결과 KS 규격(KS C 8570)에 따른부분 안전을 최소평가 기준인 10 이상을 만족하는 안전율을 확인하였다.

제작된 풍력발전기 로터에 대하여 풍동시험을 수행하

였으며 정격 조건에서 90.8 W의 출력을 확인하였다. 이는 유동해석 결과 대비 15 % 낮은 출력이며 이러한 이유는 부차 손실 및 에너지 변환 효율을 감안한다면 충분한 타당성을 보인다.

사보니우스형 로터의 상하부 플레이트를 추가로 설치하여 개선한 모델을 이용한 풍동 시험에서는 107.9 W을 출력을 확인하였으며 설계 출력을 만족하는 결과이다.

향후, 페브리크 소재에 따른 풍력 발전기 성능 변화에 대한 연구를 진행할 예정이며 최종적으로 사회적으로 문제되고 있는 폐현수막 등의 소재를 재활용할 수 있는 방안으로 확대 적용하고자 합니다.

## References

- [1] K. C. Tong, "Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 74-76, pp. 399-410, 1998.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00036-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00036-1)
- [2] A. S. Ahmed Shata and R. Hanitsch, "Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of mediterranean sea in Egypt," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 8, pp. 1183-1202, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.015>
- [3] B. Greening and A. Azapagic, "Environmental impacts of micro-wind turbines and their potential to contribute to UK climate change targets," *Energy*, vol. 59, pp. 454-466, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.037>
- [4] T. J. Carrigan, B. H. Dennis, Z. X. han, and B. P. Wang, "Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution," *ISRN Renewable Energy*, vol. 2012, Article ID 528418, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/528418>
- [5] J. A. Ekaterinaris and M. F. Platzer, "Computational prediction of airfoil dynamic stall," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 33, no. 11-12, pp. 759-846, 1998.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0376-0421\(97\)00012-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0376-0421(97)00012-2)
- [6] R. E. Sheldahl, "Comparison of field and wind tunnel darrieus wind turbine data," *Journal of Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 254-256, 1981.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/3.48036>
- [7] Lubosny, Z. *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-10944-1>
- [8] F.R. Menter, ZONAL TWO EQUATION  $k-\omega$  TURBULENCE MODELS FOR AERODYNAMIC FLOWS, AIAA Fluid Dynamics Conference, 1993  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1993-2906>

허 영 근(Young-Gun Heo)

[정회원]



- 2011년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 부산대학교 일반대학원 에너지시스템공학과 (공학박사)
- 2010년 12월 ~ 현재 : ㈜디엔디이 재직중

<관심분야>

기계공학, 소형 풍력 발전, CFD

정 원 혁(Won-Hyuk Jung)

[정회원]



- 2012년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 1월 ~ 현재 : ㈜디엔디이 재직중

<관심분야>

기계공학, 소형 풍력 발전, CFD

정 증 현(Jong-Hyun Jeong)

[정회원]



- 2002년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 2월 ~ 현재 : ㈜디엔디이 재직중

<관심분야>

기계공학, 소형 풍력 발전, CFD