

운전하중 조건에서 소형 풍력 발전기용 사출 나선형 블레이드 구조특성 평가

길영욱*, 조영관*, 지호성**, 양형근***, 백준호***, 제덕근****, 정호승****.#, 박상후*****.#

*부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 초소형기계부품혁신센터, *** (주)에스코알티에스, **** (주)제산정공, *****부산대학교 기계공학부 BK21 플러스사업단, *****부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

Structural Characteristics Evaluation of the Injection Spiral Blade Used in Small Wind Turbines under Operating Conditions

Young-Uk Gil*, Young-Kwan Jo*, Ho-Seong Ji**, Hyoung-Keun Yang***, Joon-Ho Baek***, Duk-Geun Je****, Ho-Seung Jeong****.#, Sang-Hu Park*****.#

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, **MEMS Technology Centre, Pusan National University, ***Department of Engineering Research, ESCO RTS Co., Ltd., ****JESAN Co., *****School of Mechanical Engineering, BK21 Plus, Pusan National University, *****School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan Nat'l UNIV.

(Received 5 November 2019; received in revised form 2 December 2019; accepted 4 December 2019)

ABSTRACT

The purpose is to evaluate the structural characteristics of 750 mm diameter injection spiral blades under various operating conditions. A fiber-glass reinforced polypropylene material was employed to the injection blades, and mechanical tests on two kinds of glass-reinforced polypropylene were performed to evaluate the mechanical properties and to select a suitable candidate material. Also, three kinds of spiral blade geometries were studied to observe the influence of fixing rods between blades. For this, structural analyses were conducted to understand the role of fixing rods under a range of rotating speed. In addition, modal analysis was performed to confirm the resonance in the operating speed range. One-way fluid-structure interaction (FSI) analysis was carried out to know its mechanical integrity under dangerous wind speed conditions. Through this work, the structural characteristics of the proposed spiral blade geometries were studied under various operating conditions, and the requirements of mechanical properties of blades were determined.

Key Words : Structural analysis(구조해석), Spiral blade(나선형 블레이드), Injection material(사출소재), Wind turbine(풍력 발전기), Rotational velocity(회전 속도)

1. 서 론

화석연료에 의한 환경오염 및 지구 온난화로 인하여 신재생 에너지 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 신재생에너지 중 풍력은 상용화 측면에서 높은 경쟁력을 가지고 있는 실정이다. 대형 풍력발전기에 비해 소형 풍력발전기는 단순

Corresponding Author : sanghu@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-1011, Fax: +82-51-510-1973
Co-Corresponding Author : hoseungjeong@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-3140

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 구조, 간단한 설치 및 편리한 유지보수와 분산 발전을 위해 주택, 공원, 고층 건물 등에 주로 사용되고 있다^[5]. 소형풍력발전기는 회전축의 형태에 따라 수평축 발전방식과 수직축 발전방식으로 구분되며, 바람의 방향과 로터축의 방향이 수직인 수직축 발전방식에는 블레이드 형상에 따라 다리우스형, 자이로밀형, 사보니우스형 등이 있으며, 바람의 방향과 회전하는 로터축이 평행한 수평축 발전방식에는 블레이드 형상에 따라 프로펠러형과 나선형 등이 있다^[6]. 현재까지는 소형 풍력 발전시스템의 구조 안전성과 성능특성에 대한 많은 연구가 진행되어지고 있는 실정이다. 유체-고체 연성 해석 및 동적해석을 이용하여 운전속도와 극한 풍속조건에서 풍력터빈 블레이드 및 프레임 구조에 대하여 구조 안전성에 관한 연구가 수행되었으며,^[7-9] 유동장 변화와 운전속도에 따른 유동가시화 실험과 유동전산해석을 통해 나선형 풍력 블레이드의 공기역학적 성능에 관한 연구가 수행되었다^[10-11]. 기존 나선형 블레이드는 우수한 기계적 특성과 경량성을 가지고 있는 섬유강화 복합재료를 사용하여 제작을 하고 있다^[12-13]. 그러나, 나선형 블레이드는 섬유 등의 보강재와 레진을 이용하여 몰드에 덧씌우는 적층 작업 및 회전축에 덧붙임 형태로 접합하는 작업을 수작업으로 하고 있는 실정이다. 이로 인해 블레이드의 중량편차로 고속 회전시에 안전성 저하 문제가 있으며, 블레이드와 회전축에 대한 두께 변화와 부분 보강에 대한 제작상의 어려움이 있으며, 생산자의 숙련도 및 제작환경 등에 의해 품질과 제작시간 등이 의존하게 된다^[14]. 이러한 문제점을 개선하기 위해 120°로 균등 분할된 나선형상의 블레이드와 회전축을 사출성형공정을 통해 일체화된 제품을 제작하고 각각을 조립하는 공정을 통해 제작하고자 한다.

블레이드는 아르키메데스의 나선식 수차 원리를 이용한 원추형 형태이며, 바람에 의한 공력성능을 극대화 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 개발하고자하는 풍력발전기의 목표 정격출력은 100 W이며, 블레이드의 지름 750 mm, 두께 6 mm를 가지고 있으며, 유리섬유가 강화된 폴리프로필렌 사출소재를 사용하였다. 이는 기존의 폴리프로필렌에 비해 우수한 기계적 특성, 치수안정성, 내열특성을

가지고 있으며, 주로 자동차 스위치커버, 전동공구하우징 등 고강성과 고충격성이 요구되는 제품군들에 사용되고 있다^[15]. 그러나, 기존 섬유강화 복합재료에 비해 탄성계수 및 항복 강도 등 기계적 특성이 다르므로, 사출 소재에 대한 기계적 특성 파악과 넓은 회전속도 범위에서 운전 가능한 나선형 블레이드에 대한 형상과 구조특성 평가에 대한 연구가 요구된다.

본 연구의 목적은 회전속도와 위험속도에 따른 사출 나선형 블레이드에 대한 구조특성을 평가하는 것이다. 먼저, 나선형 블레이드의 사출 소재를 선정하기 위해서 두 가지 유리강화 폴리프로필렌 사출 소재의 기계적 특성을 평가하였다. 나선형 블레이드와 지지막대의 유무와 개수에 따른 구조특성을 관찰하기 위해 3가지 모델을 제시하였으며, 검토 모델에 대하여 회전 하중에 대한 구조특성을 평가하였다. 또한 공진에 의한 파손의 위험을 회피하고자 작동 운전속도에서 고유 주파수를 모드해석을 통해 수행하였으며, 위험풍속에서 정지된 블레이드의 변형거동을 관찰하기 위해 한 방향 (One-way) 유동-구조 연성해석을 수행하였다. 소재에 대한 기계적 특성 실험과 블레이드에 대한 구조해석 결과를 바탕으로 사출 나선형 블레이드 후보모델에 대한 안전운전속도 및 위험속도에 따른 구조특성을 검토하였다.

2. 사출소재의 기계적 특성

2.1 사출 소재

본 연구에서는 기존의 폴리프로필렌 (Polypropylene)에 유리섬유를 강화하여 결합시킨 열가소성 수지인 PP1340 (40 wt% long glass fiber)과 P730G45 (45 wt% short glass fiber) 소재를 사용하였다. 유리강화 폴리프로필렌의 기계적 특성을 측정하기 위한 규정된 시편은 사출을 통하여 얻었다. 사출조건은 소재온도는 230 °C, 몰드 온도 30 °C, 압력 6 MPa, 주입시간 2 sec로 하였다.

2.2 인장 및 굽힘실험

인장시험은 소재의 항복강도 (Yield strength), 인

장강도 (Tensile strength), 연신율 (Elongation)을 관찰하기 위해서, 상온에서 만능시험기 (Universal testing machine)를 이용하여 ASTM D638 규격에 따라 50 mm/min의 변위제어로 실험을 수행하였다. Fig. 2 (a)는 ASTM D638에서 제시된 인장시험편 규격이며, 소재별 5개씩을 실험하였다. 3점 굽힘시험은 소재의 굴곡강도 (Flexural strength)와 굴곡 탄성계수 (Flexural modulus)를 관찰하기 위해서, 상온에서 만능시험기를 이용하여 ASTM D790에 따라 10 mm/min의 변위제어로 실험을 수행하였다. Fig. 2 (b)는 ASTM D790에서 제시된 굽힘시험편 규격으로 소재별 5개씩을 실험하였다.

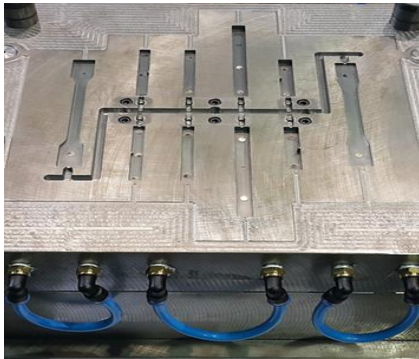


Fig. 1 Injection mold used to fabricate test specimens

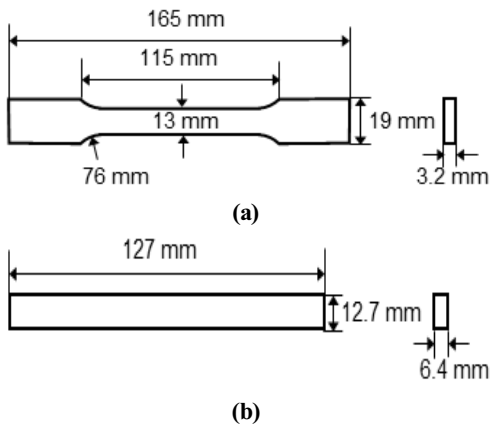


Fig. 2 (a) Dimensions and geometry of tensile specimen (ASTM D638) and (b) bending specimen (ASTM D790)

Table 1 Summary of tensile and bending test results

Items [unit]	Material types	
	PP1340	P730G45
Tensile strength (MPa)	90.2	88.9
Yield strength (MPa)	77.9	73.0
Elongation (%)	1.15	0.96
Flexural strength (MPa)	114.9	103.4
Flexural modulus (GPa)	7.5	5.2

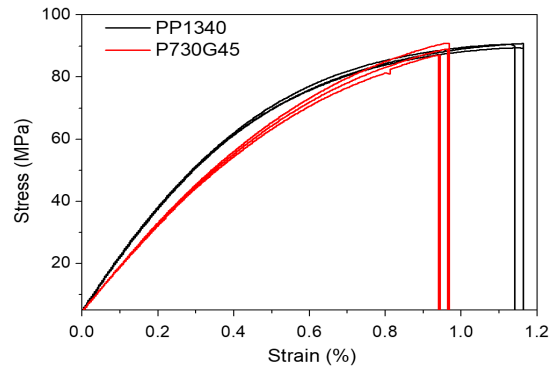


Fig. 3 Stress-strain curve from a tensile test

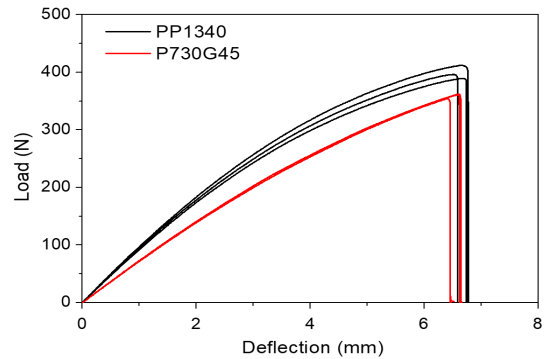


Fig. 4 Load-deflection curve from a bending test

2.3 실험 결과

Table 1은 소재별 항복강도, 인장강도, 연신율, 굴곡강도와 굴곡 탄성계수를 나타낸다. Fig. 3은 인장강도 시험으로부터 얻어진 응력-변형을 관계 곡선을 나타내며, PP1340 소재의 항복강도는 평균 77.9 MPa, 인장강도는 평균 90.2 MPa, 연신율은 평균 1.15 %이며, PP1340 소재는 P730G45 소재보다

항복강도가 +6.2 %, 인장강도가 +1.46 %, 연신율이 +19.8 % 우수함을 나타낸다.

Fig. 4는 굽힘시험 결과로부터 얻어진 하중-변위 관계곡선을 보여주고 있다. 이때 3점 굽곡강도와 굽곡 탄성계수는 ASTM D790에서 규정하는 아래 식에 의해 산출하였다.

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (1)$$

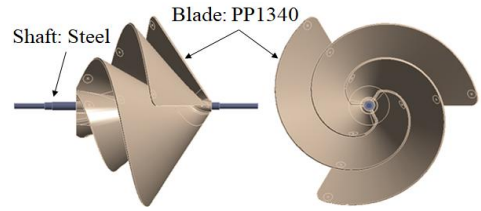
$$E_b = \frac{PL}{4bh^3\delta} \quad (2)$$

식(1)은 3점 굽곡 강도에 관한 관계식을 나타낸다. 여기서, σ_b : 굽곡 강도 (MPa), P_b : 최대 하중 (N), L : 지점간의 거리 (mm), b : 시험편 폭 (mm), h : 시험편 두께 (mm) 이다. 식 (2)는 3점 굽곡 탄성계수에 관한 관계식을 나타낸다. 여기서, E_b 는 굽곡탄성계수 (GPa), P/δ 는 하중-처짐 곡선의 직선부 경사 (N/mm), L 는 지점간의 거리 (mm), b 는 시험편 폭 (mm), h 는 시험편 두께 (mm)이다. PP1340 시편의 굽곡강도는 평균 114.9 MPa, 굽곡 탄성계수는 평균 7.51 GPa이며, PP1340 소재는 P730G45 소재보다 굽곡강도가 +10 %, 굽곡 탄성계수는 +44 % 우수함을 알 수 있었다.

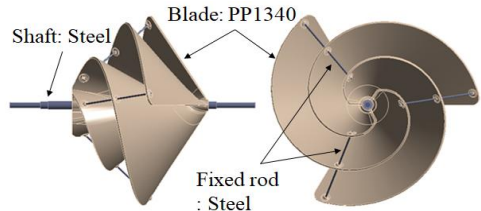
3. 운전회전속도에 따른 구조특성 평가

3.1 해석모델 및 경계조건

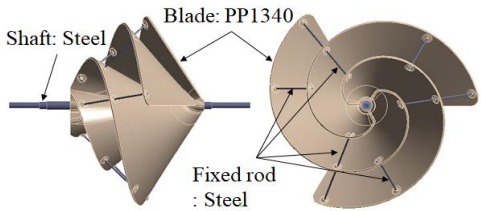
나선형 블레이드는 원심력에 의해 회전 반경방향으로 변형이 발생된다. 그러므로, 회전속도에 따른 변형 특성에 대한 관찰이 요구되어진다. 나선형 블레이드의 회전속도에 따른 구조특성을 평가하기 위해 구조해석을 수행하였다. Fig. 5 (a)는 일반적인 나선형 블레이드 형상 (Model-1)이며, Fig. 5 (b)는 나선형 블레이드의 입구측 우측 끝단의 변형을 방지하기 위해 고정막대들이 추가된 형상 (Model-2)을 보여주고 있다. Fig. 5 (c)는 Model-2에서 최대 변형이 발생하는 부위에 고정막대들이 추가된 형상을 보여준다.



(a) Spiral blade without fixed rod (Model-1)



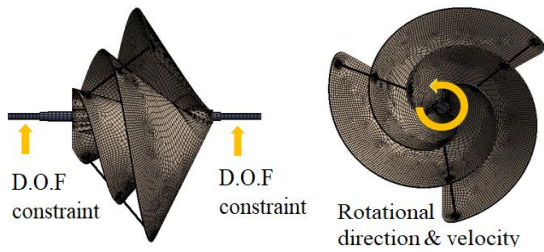
(b) Spiral blade with fixed rod (Model-2)



(c) Spiral blade with fixed rod (Model-3)

Fig. 5 3D geometries of PP1340 spiral blade used in FE model

Fig. 6은 하중과 변위 경계조건이 부여된 유한요소 모델을 보여주고 있다. 3차원 2차 (Quadratic) 솔리드 요소는 구조해석 모델에 사용되었으며, Model-2의 요소 수는 142,511개이며, 노드 수는 598,873개가 적용되었다. 회전 속도에 따른 구조특성을 평가하기 위해서 하중조건은 회전속도를 적용하였으며, 회전축의 앞단과 뒤단 부에는 반경, 길이, 회전방향에 대한 변위 구속조건을 적용하였다. 또한, 블레이드, 샤프트와 고정막대들의 서로 간의 접촉부위는 완전히 접촉되었다고 가정하였다. Table 2는 사출 블레이드 소재인 PP1340, 회전 샤프트와 지지봉의 소재인 일반강에 대한 소재 특성을 나타낸다. PP1340 소재의 탄성계수 7.51 GPa, 밀도 1200 kg/m³, 항복강도 77.9 MPa는 해석에서 사용되었다.



(a) D.O.F constraint conditions (b) Load conditions

Fig. 6 Spiral blade FE model and boundary conditions of D.O.F constraint and rotational velocity

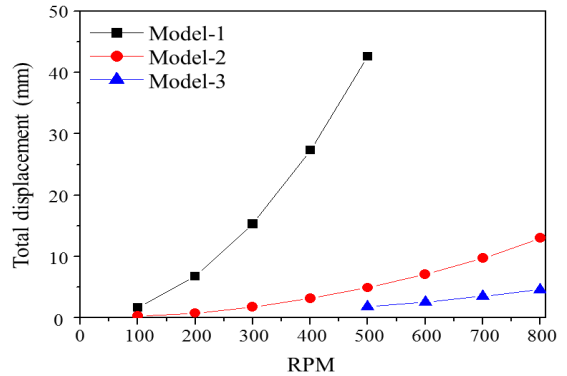
Table 2 Material properties of PP1340 and steel

Items [unit]	Material	
	Steel	PP1340
Young's modulus (GPa)	200	7.5
Poisson ratio	0.3	0.3
Density (kg/m ³)	7850	1200
Yield stress (MPa)	-	77.9

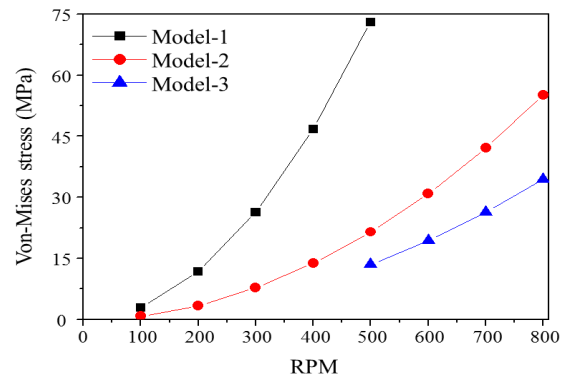
3.2 회전하중에 따른 구조특성

고정막대의 유무에 따른 3가지 후보 모델에 대하여 나선형 블레이드의 회전에 따른 구조특성을 관찰하기 위해 구조해석을 수행하였다. 하중조건인 회전 속도는 100에서 800 rpm 범위에서 수행하였다. Fig. 7은 회전 속도에 따른 구조해석 결과인 나선형 블레이드에서 발생된 변위와 응력에 대한 그래프를 나타낸다. 회전 속도에 따른 변위 및 응력은 선형적인 곡선이 아닌 2차 다항식 곡선의 형태로 증가함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8-9는 회전속도 500 rpm 조건에서 나선형 블레이드의 변위와 응력 분포를 나타낸다. 원심력에 의해 회전반경 방향으로 블레이드의 입구 측 끝단부에서 처짐이 관찰되었으며, 이러한 처짐 현상에 의해 블레이드의 출구 측 끝단부 내부 표면에서 최대 인장응력이 발생됨을 관찰할 수 있었다. Model-1인 경우, 최대 변위는 입구 측 끝단부에서 관찰되었으며, 최대 응력은 블레이드의 출구 측 회전축 근처에서 관찰되었다. Model-2인 경우, 최대 변위는 고정막대와 만나는 입구 측 끝단부에서부터 회전방향 30도 부위에서 관찰되었으며, 최대 응력은 블레이드의 출구 측 회전축 근처에서 관찰되었다.



(a) RPM versus displacement curve



(b) RPM versus von-Mises stress curve

Fig. 7 Displacement and von-Mises stress curve according to rpm

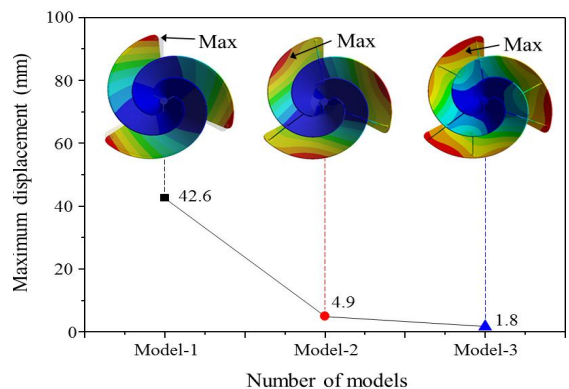


Fig. 8 Maximum displacement of model-1 to 3 (at 500 rpm condition)

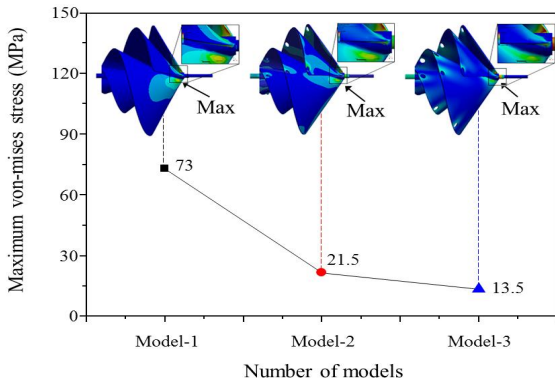


Fig. 9 Maximum von-mises stress of model-1 to 3 (at 500 rpm condition)

Model-3인 경우, 최대 변위는 고정막대와 만나는 입구 측 끝단부에서부터 회전방향 10도 부위에서 관찰되었으며, 최대 응력은 블레이드의 출구 측 회전축 근처에서 관찰되었다. Model-3의 최대 응력은 Model-1에 비해 5.4배, Model-2에 비해 1.6배 적게 발생됨을 관찰할 수 있었다. 이를 통해, 회전하중조건에서 고정막대는 블레이드에 발생하는 최대응력을 감소시키는 것을 확인하였다.

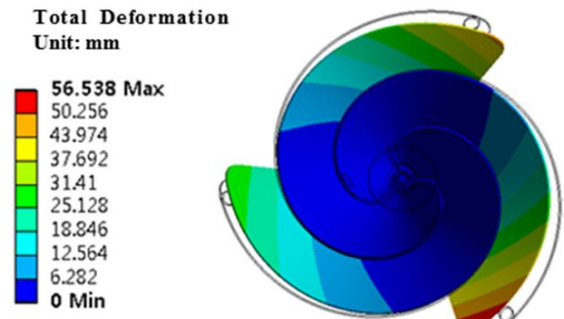
3.3 진동 특성

작동 주파수 범위 내에 고유주파수가 존재한다면, 블레이드는 작동 중에 공진에 의해 파손의 위험성이 존재하게 되므로, 사출 나선형 블레이드의 고유주파수를 관찰하기 위해 모드해석을 수행하였다. Fig. 10은 모델들의 고유주파수와 변형모드를 나타낸다. Model-1의 1차 공진 주파수는 18.7 Hz이며, 블레이드는 회전축 반경방향으로 변형되는 모드가 관찰되었으며, Model-2와 Model-3의 1차 모드의 공진 주파수는 각각 39.26 Hz와 49.49 Hz이며, 고정막대의 영향에 의해 블레이드는 회전 방향으로 변형되는 모드가 관찰되었다. 식 (3)은 작동 회전속도를 주파수로 변환하는 식이다. 여기서 Ω 는 운전 조건 회전수이고, ζ 는 작동 주파수를 나타낸다.

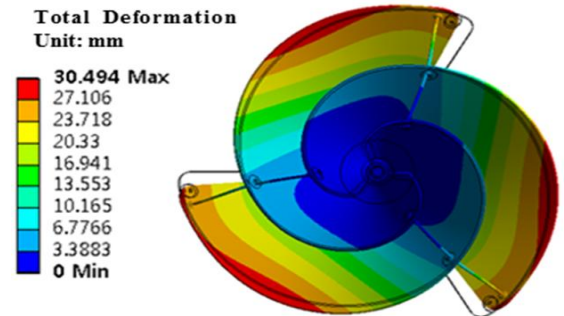
$$(\Omega \text{ rpm}) / (60 \text{ sec}) = \zeta \text{ Hz} \quad (3)$$

소형 나선형 블레이드 풍력발전기의 작동 회전속

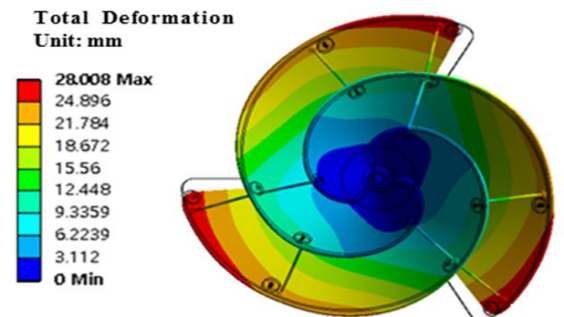
도 범위를 0 ~ 600 rpm으로 가정한다면 0 ~ 10 Hz로 작동 주파수 영역이 정해진다. 후보모델들의 1차 공진 주파수는 작동 주파수 범위에서 벗어나 있는 것을 확인하였으며, 고정막대는 블레이드에 발생하는 고유주파수를 증가시키는 것으로 확인되었다.



(a) Model-1 (Frequency: 18.70Hz)



(b) Model-2 (Frequency: 39.26Hz)



(c) Model-3 (Frequency: 49.49Hz)

Fig. 10 1st mode shapes of spiral blade

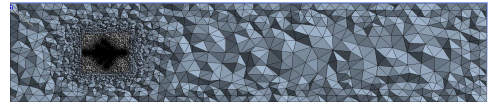
4. 극한풍속 조건 연성해석

풍력 발전기의 나선형 블레이드는 바람에 의해 회전이 되며, 회전에 의해 동력을 발생시킨다. 하지만, 규정 풍속 이상에서는 안전을 위해 나선형 블레이드는 정지하게 된다. 정지되어진 나선형 블레이드는 바람에 의해 압력하중을 받게 되며, 이로 인해 나선형 블레이드는 극한 풍속조건에서 블레이드의 구조특성에 대한 관찰이 요구되어진다. 여기서, 극한 풍속은 35 m/s를 적용하였다. 극한 풍속조건에서 정지된 블레이드의 구조특성을 관찰하기 위해 유동-구조 연성해석을 수행하였다. 먼저, 바람에 의해 정지되어진 블레이드에 작용하는 압력하중을 구하기 위해 전산 유동해석을 수행하였으며, 전산 유동해석으로부터 얻어진 압력하중이 적용된 블레이드의 변형 및 응력을 관찰하기 위해 구조해석을 수행하였다.

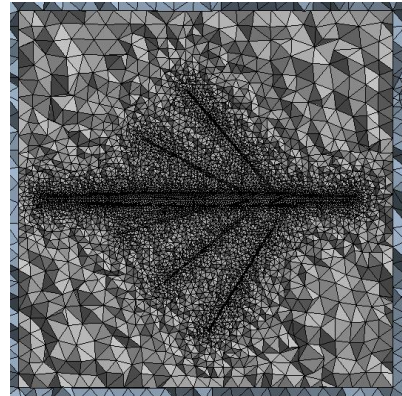
Fig. 11은 전산유체 해석을 위한 모델의 격자에 대한 단면부를 보여주고 있다. 격자 모델은 직육면체 모양의 외부영역과 나선형 블레이드가 위치해 있는 원통 모양의 내부 영역으로 생성하였으며, 특히, 외부 영역의 폭은 블레이드 최대 직경의 3.3배, 길이는 블레이드 길이의 12배를 적용하여 바람의 흐름에 대한 영향을 고려하여 생성하였다. 나선형 블레이드가 있는 원통모양의 내부 영역은 격자를 매우 조밀하게 격자를 생성하였으며, 내부 영역의 격자수는 77만개이며, 총 격자수는 91만개이다.

Table 3은 유동해석에서 적용된 경계조건 정보를 나타내고 있다. 입구 측에는 유속 35 m/s 조건을 부여하였으며, 출구 측에는 상대압력 0 atm 압력조건을 적용하였다. 블레이드와 공기는 점착조건 (No slip)을 적용하였으며, 외부 영역의 벽에는 슬립조건을 적용하였다. 난류모델은 유체기계 해석에서 비교적 정확한 값을 가지는 $k-\omega$ 기반의 SST (Shear stress transport)모델을 사용하였다.

유동해석의 결과인 블레이드 표면의 압력분포를 구조해석 모델에 압력분포 하중으로 적용하였다. Fig. 12는 블레이드에 적용된 압력분포를 나타내고 있다. 나선형 블레이드의 입구 측 끝부분에서 상대적으로 큰 압력이 발생함을 알 수 있었다.



(a) Grid shape generated in the entire flow field with the spiral blade



(b) Detailed grid shape generated around the spiral blade

Fig. 11 Sectional views of CFD grid model for a spiral blade

Table 3 Boundary conditions of pressure, velocity and slip

Item	Conditions
Fluid Material	Air at 25°C
Reference Pressure	1 atm
Inlet side	Normal Speed, 35 m/s
Outlet side	0 atm
Outside wall	Free Slip Wall
Blade	No Slip Wall

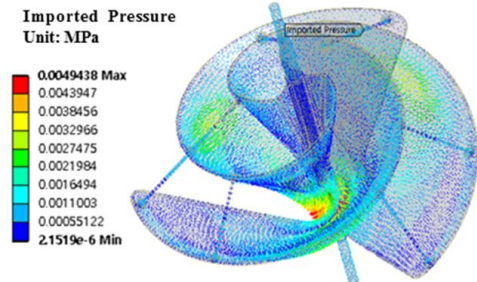


Fig. 12 Mapped pressure distribution obtained from the CFD analysis results

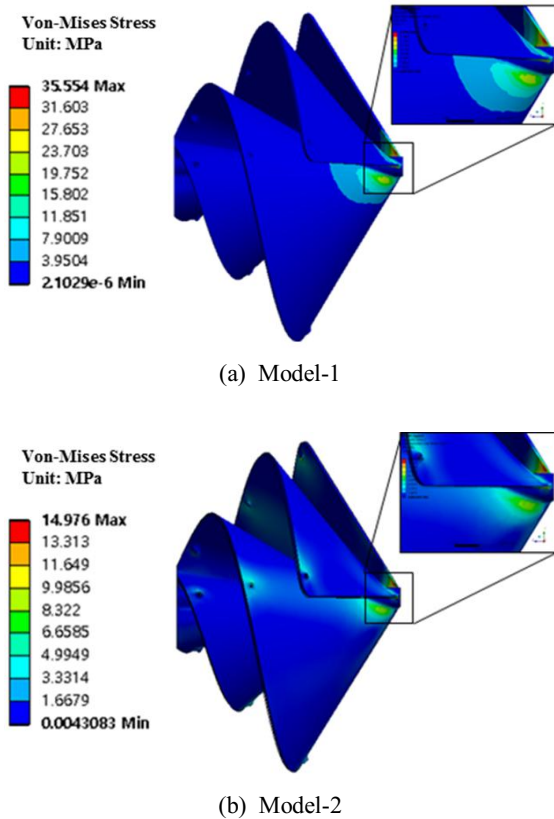


Fig. 13 Stress distribution of spiral blade (at 35m/s)

변위 구속조건은 축의 앞단과 뒷단에서 모든 방향의 자유도를 구속하였다.

Fig. 13은 블레이드에서의 응력분포를 보여준다. 최대 응력은 블레이드 출구 측 회전축 부근에서 관찰되었으며, Model-1, Model-2와 Model-3의 블레이드에서의 응력은 각각 35.55, 14.97, 11.66 MPa로 관찰되었으며, 이는 회전하중에 의해 발생된 최대 응력 위치와 동일하였다. 최대 변위는 블레이드 입구 측 끝단에서 발생하는 것을 확인하였다. 후보 모델별로 최대 변위와 최대 응력에 대하여 검토하였으며, 정지 상태에서 바람에 의해 발생된 응력은 최대 회전하중에 의해 발생된 응력보다는 상대적으로 낮게 발생됨을 관찰할 수 있었다. 고정막대는 바람의 위험속도조건에서 블레이드에 발생하는 응력을 저하시키는 것으로 확인되었다.

5. 결론

기계적 실험을 통해 사출 소재의 특성을 검토하였으며, 전산해석을 통해 사출 나선형 블레이드의 고정막대의 유무와 개수에 따른 구조 및 진동특성을 관찰하였으며, 하중조건에 따른 구조 안전성을 검토하였다.

1. 인장 및 굽힘시험을 통해 PP1340과 P730G45 두 종류의 사출 블레이드 소재에 대한 기계적 특성을 평가하였으며, PP1340 소재가 P730G45보다 기계적 특성이 상대적으로 우수함을 확인하였다.
2. 나선형 블레이드와 지지막대의 유무와 개수에 따른 3가지 후보모델에 대하여 회전하중에 대한 구조특성을 평가하기 위해 구조해석을 수행하였다. 후보 모델별 최대 변형과 최대 응력을 관찰하였으며, 고정막대에 의해 블레이드에서 발생하는 응력이 저하되는 것을 확인하였다. 이를 통해 구조 안전성 관점에서 후보 모델에 따른 작동 회전속도를 제안할 수 있었다.
3. 사출 나선형 블레이드의 고유주파수 관찰을 위해 모드해석을 수행하였다. 후보모델들의 1차 공진 주파수는 작동 주파수 범위에서 벗어나 있는 것을 확인하였으며, 고정막대에 의해 고유진동수가 증가되는 것을 확인하였다.
4. 단방향 유동-구조 연성해석을 이용하여 극한 풍속조건 35 m/s에서 정지된 블레이드의 구조특성을 평가하였다. 후보 모델별로 최대 변위와 최대 응력에 대하여 검토하였으며, 정지 상태에서 바람에 의해 발생된 응력은 최대 회전하중에 의해 발생된 응력보다는 상대적으로 낮게 발생되었으며, 고정막대에 의해 블레이드에서 발생하는 응력이 저하되는 것을 확인하였다.

후 기

“본 연구는 2018년도 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구결과(No.20183030029120)이며, 부분적으로 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20173030041340)입니다.”

REFERENCES

1. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., "Wind Energy Handbook," John Wiley & Sons, Ltd, New York, pp. 40-65, 2001.
2. Park, J. C. and Kyung, N. H., "A Study on the Application of Small Wind Power System in Apartment Housing," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 23, No. 2, pp. 21-34, 2003.
3. Park, Y. H., Park, J. H., Park, J. C., and Rhee, E. K., "A Study on the Application of Small Wind Turbine System in Super High-Rise Building," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers, Vol. 25, No. 4, pp. 187-193, 2013.
4. Sung, C. M. and Han, M. C., "Design and Performance Evaluation of Hinge Type Pitch Control System in Small-Size Wind Turbine," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 335-341, 2016.
5. Tabrizi, A. B., Whale, J., Lyons, T., and Urmece, T., "Performance and Safety of Rooftop Wind Turbines: Use of CFD to Gain Insight into Inflow Conditions," Renewable Energy, Vol. 67, pp. 242-251, 2014.
6. Dalley, S., and Oleson, J. P., "Sennacherib, Archimedes, and the Water Screw: The Context of Invention in the Ancient World," Technology and Culture Vol. 44, No. 1, 2003.
7. Cho1, W. S., Choi, Y. D. and Kim, H. S., "Fluid-structure interaction analysis on a low speed 200 W-class gyromill type vertical axis wind turbine rotor blade," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 344~350, 2013.
8. Ku, H. K., Lee, H. U. and Kim, J. M., "A Study on the Cuf-off Speed of Small-scale Wind Power System for Battery Charging," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 4, pp. 484~489, 2014.
9. Hwang, I. S., Min, S. Y., Jeong, I. O., Lee, C. H., Lee, Y. H., and Kim, S. J., "Aerodynamic Analysis and Rotor Control of Efficient Vertical Axis Wind Turbine using the Individual Blade Pitch Control System," Proceedings of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, pp. 119-122, 2006.
10. Li, Q., Kim, H. D., Ji, H. S. and Kim, K. C., "Flow Characteristics around Archimedes Wind Turbine according to the Change of Angle of Attack," The Korean Society Of Visualization, Vol. 11, No. 1, pp. 28-33, 2013.
11. Lee, J. C., Park, H. J., Ji, H. S., Kim, K. C. and Park, S. H., "Evaluation on the spiral type wind turbine blade for estimation of mechanical integrity using fluid-structure interaction," Proceedings of the Korean Society for Precision, Engineering, pp. 745-765, 2012.
12. Choi, H. K., Nam, K. W. and Ahn S. H., "Strength Characteristics of FRP Composite Materials for Ship Structure," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 4, pp. 45-54, 2013.
13. Kang, D. H., Oh, S. S. and Kim, H. I., "Improvement of Physical Properties of Polypropylene Chemical Foam by Glass Fiber Reinforcement," Polymer(Korea), Vol. 43, No. 4, pp. 589-594, 2019.
14. Yang, S. M., Shim, D. S., Ji, H. S., Baek, J. H., Kim, B. S., Ahn, S. Y., and Park, S. H., "Process Design of Conical Roll-Shaping for Fabrication of Variable Curvature Spiral Blade," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 33, No. 11, pp. 911-918, 2016.
15. Choi, H. K., Nam, K. W. and Ahn, S. H., "Strength Characteristics of FRP Composite Materials for Ship Structure," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 4, pp. 45-54, 2013.