

수직축 풍력 발전 시스템의 유리/에폭시 복합재 블레이드 및 타워 구조 설계 연구

박현범[†]

Study on Structural Design of Glass/epoxy Composite Blade and Tower of Vertical Axis Wind Turbine System

Hyunbum Park[†]

ABSTRACT: This study is to propose the structural design and analysis procedure about composite blade and tower of vertical axis wind turbine technology. In this study, structural design of tower for vertical axis wind turbine was performed after vertical blade design and manufacturing. The structural design requirement and specification of blade and tower was investigated. After tower of structural design, the structural analysis of the tower was conducted by the finite element method. It was performed that the stress, deformation and natural frequency analysis at the applied loading. The design modification of tower configuration was proposed by structural analysis. It was confirmed that the final designed tower structure is safety through the structural analysis.

초 록: 본 연구에서 수직축 풍력 발전기의 복합재 블레이드 및 타워에 대한 구조 설계 및 해석 방안을 제시하였다. 본 연구에서 수직축 블레이드의 설계 및 제작 수행 후 풍력 발전기 타워의 구조 설계를 수행하였다. 먼저 블레이드와 타워의 설계 요구 조건 및 사양이 정립되었다. 타워 구조 설계 이후 유한 요소 해석을 통하여 타워의 구조 해석을 수행하였다. 적용된 하중에서 응력, 변형, 고유 진동수 해석이 수행되었다. 구조 해석을 통해 타워 형상의 개선 설계 방안을 제시하였다. 최종 설계된 타워 구조는 구조 해석을 통해 안전한 것으로 확인되었다.

Key Words: 풍력 발전 시스템(Wind turbine system), 블레이드(Blade), 타워(Tower), 구조 설계(Structural design), 구조 해석(Structural analysis)

1. 서 론

바람을 이용하여 동력을 발생시키는 풍차 형태의 구조물은 고대부터 꾸준히 이용되어 왔다. 풍차를 통해 곡식 가공이나 식수 획득에 활용되었으며, 범선과 같은 해양 운송 수단으로 바람이 이용되었다. 초기의 풍력 시스템은 전기 발전으로 활용되지는 않았고 19세기 후반부터 활용되기 시작했다. 최근 화석 연료가 고갈됨에 따라 대체 에너지 개발 연구가 활발히 진행되는 가운데 풍력 발전 시스템이 보다

다양하게 연구 개발되고 있다[1].

풍력 발전 시스템 연구는 크게 블레이드를 포함한 발전 시스템에 관한 연구와 발전기를 지지하는 타워 연구로 구분할 수 있다. 풍력 블레이드 및 발전기에 관한 연구는 국내에서도 활발하게 연구가 되고 있다. 국내에서는 공창덕 등이 블레이드에 복합재료를 적용하여 설계 및 제작을 수행한 연구를 다양하게 추진하였다[2,3]. 안형주 등은 블레이드의 스킨 부분에 작용하는 공기력과 구조 하중의 연계 해석 연구를 수행한 바 있다[4]. 황병선 등은 국산 중형 및

대형급 수평축 풍력 발전기 블레이드를 위한 복합재료 및 제조방법의 고찰에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 재료 및 제품 제작에 필요한 고려사항을 문헌을 통하여 분석하였고 이미 개발 경험이 있는 수직축 블레이드의 예를 들어 비교하였다[5].

풍력 발전기의 타워 지지 구조에 대한 연구는 국외를 중심으로 최근 다양한 연구가 추진되고 있다. 국외 연구 동향을 살펴보면, 2014년에 Yao Hsu 등이 풍력 터빈 타워의 신뢰성 해석에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 풍속과 관계된 타워의 하중을 분석하여 타워 모델을 제시하였다[6]. 정성문 등은 5MW급 풍력 발전 타워의 구조 모델링 연구를 수행하였다[7]. Xiong Liu 등은 해양 풍력 발전기의 타워에 작용하는 하중에 대한 해석 연구를 수행한 바 있다[8]. Xiong Liu 등은 해상 수평축 풍력 발전 시스템의 타워 하중에 대한 공력 댐핑의 효과에 대한 연구를 수행하였다[9]. Robert Fontecha 등은 풍동 시험을 통한 풍력 발전기 타워의 공력 특성을 연구하였다[10]. 국내에서는 대형급 풍력 발전기 지지 타워에 대한 설계 연구가 일부 진행되었다[11].

선행 연구 분석 결과 풍력 발전 시스템의 블레이드 연구는 다양하게 수행되고 있으나, 소형급 블레이드가 개발되었을 때 이를 지지하는 타워의 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 유리/에폭시 복합재료를 적용하여 경량화 수직축 풍력 발전 시스템 블레이드 설계 및 제작 연구를 수행하였다[12]. 또한 설계된 풍력 발전 시스템을 지지하는 타워 구조의 구조 설계 연구를 함께 수행하였다. 대상 구조물은 소형 3kW급 수직축 풍력 발전시스템을 지지하는 타워이다. 블레이드의 회전 거동을 고려하여 타워 설계 요구 조건 정립 후 구조 설계를 수행하였다. 설계 결과는 구조 해석을 통해 안전성을 검토하였다.

2. 블레이드 설계

2.1 블레이드 설계 요구 조건

수직축 풍력 발전 시스템 블레이드 설계 방안은 선행 연구를 통해 제시하였다[12]. 본 연구 대상 풍력 발전 시스템의 사양은 3kW 급이며, 정격 풍속은 국내 지형에 알맞은 12 m/s이다. 적용된 블레이드 에어포일은 NACA0018을 채택하였다. 수직축 블레이드의 개수는 통상 3~4개를 적용하는데, 본 연구에서는 3개로 확정하였다. Table 1은 세부 설계 사양을 보여주고 있다.

공력 설계 요구 조건을 분석하여 형상 설계를 수행하였다. 공력 설계는 로터의 회전에 의해 형성되는 회전 체적을 검사체적으로 가정하고 높이 방향과 원주 방향으로 발생하는 바람 방향에 평행한 유관으로 이루어진 것으로 가정하는 방법인 다중 유관 이론을 바탕으로 설계를 수행하였다. 최종 공력 형상 설계 결과는 높이 4 m, 블레이드 회전 반지름 1.5 m, 블레이드 코드 200 mm로 설계되었다. Fig. 1에

Table 1. System specification

Type	Vertical axis wind turbine system
Rated power	3 kW
Working range	Rated wind speed: 12 m/s Cut-out wind speed: 25 m/s
Diameter of rotor	3 m
Number of blades	Three

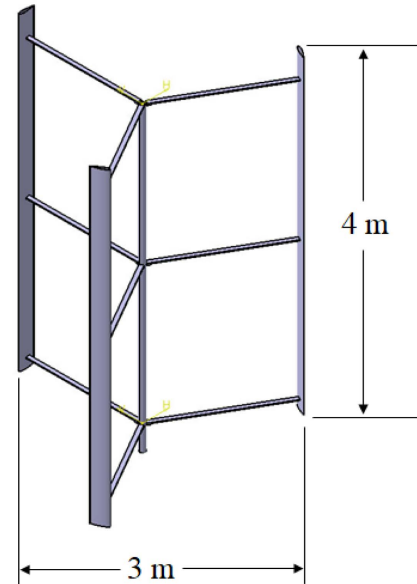


Fig. 1. Designed aerodynamic configuration of 3kW class vertical axis wind turbine blade

설계된 블레이드 형상을 제시하였다.

2.2 블레이드 구조 설계 및 해석

구조 설계를 위하여 공력 하중을 분석하여 구조 설계 하중으로 변경이 필요하다. 구조 설계 하중에서 중요한 하중은 풍력에 의한 공력 하중 및 회전에 의한 원심하중이다. 본 연구에서 구조 설계 하중은 총 3가지로 분류되었다. 첫 번째 하중은 정격 풍속에서 정상 작동 하중으로 풍력 12 m/s의 조건이다. 이때 회전수를 분석하면 300 rpm으로 산출된다. 두 번째 하중은 풍속이 높아져 블레이드 회전을 제한해야 하는 한계영역으로 풍속 25 m/s이며, 원심 하중을 위한 회전수 400 rpm에 해당한다. 세 번째 하중은 태풍 등의 최대 풍속 영역으로 55 m/s이며, 안전을 고려하여 블레이드는 회전이 되지 않도록 정지시켜 놓은 상태의 조건이다. Table 2에 세 가지 하중 상태를 명시하였다[12].

Table 2. Structural load case

Load case	Case 1	Case 2	Case 3
Wind speed	12 m/s	25 m/s	55 m/s
Rotational speed	300 rpm	400 rpm	stop

설계를 위한 공력 하중은 양력과 항력으로 분류할 수 있다. 따라서 공력 하중 계수(Aerodynamic Force Coefficient)는 양력계수인 C_l 과 항력계수 C_d 로 표현된다. 이는 일반적으로 받음각 i 와 레이놀즈 수의 함수로 정량화 된다. 따라서 수직축 형태인 다리우스 형태 풍력 블레이드의 성능에 관련되는 힘계수 C_n 과 C_t 로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_n = C_l \cos i + C_d \sin i \quad (1)$$

$$C_t = C_l \sin i - C_d \cos i \quad (2)$$

위의 식을 활용하여 회전 날개의 미소길이 ds 에 작용하는 미소 양력 dL 과 미소항력 dD 벡터의 합으로 로터의 회전방향인 미소 접선력 dT 와 미소 수직력 dN 으로 나눌 수 있고 동적 압력 q 를 적용하여 다음 식으로 양력, 항력을 표현할 수 있다. 미소 단면적 ds 에 작용하는 하중인 dN 과 dT 를 회전날개 전체에 발생하는 하중으로 구하기 위해 거리에 대해 적분하여 등분포 하중을 구하고 이를 구조 설계 하중으로 활용하였다[13].

$$dN = C_n q C \frac{dz}{\cos \delta} \quad (3)$$

$$dT = C_t q C \frac{dz}{\cos \delta} \quad (4)$$

구조 설계를 위해 적용된 재료는 유리섬유/에폭시 복합재료가 적용되었다. 본 연구에서는 선택된 유리 섬유와 에폭시 수지를 적용한 시편을 제작한 후 시편 시험을 통해 기계적 물성치를 획득하였다[14]. 시편 제작은 블레이드 제작과 동일한 조건을 유지하여 상온 경화 상태로 제작하여 총 5개의 시편을 획득한 후 인장, 압축, 전단 시험 등을 수행하였다. 최종 분석된 시편의 기계적 물성치를 활용하여 구조 설계를 수행하였다. Table 3은 시편 시험을 통해 획득된 기계적 물성치를 보여주고 있다.

블레이드 구조 형상은 항공기 날개의 스킨-스파 형상을 채택하였다[15]. 유리섬유가 스킨과 스파 플렌지에 해당하는 부위에 적용되었다. 내부는 폴리우레탄 폼이 적용되어 전체적으로 샌드위치 복합재 구조로 설계하였다. 블레이드는 총 3개가 적용되며, 타워와 연결부위는 3개의 스트러트(strut)로 지지되는 구조이다. 최종 설계된 블레이드의 적층수는 Table 4에 명시하였다.

구조 설계 결과에 대한 안전성 검증을 위해 유한 요소 해석 기법을 적용하여 구조 해석을 수행하였다. 초기 설계 결과에 대한 구조 해석을 수행하여 연결 부위 스트러트가 불안정한 구조인 것으로 검토되었다. 따라서 연결부위를 보강하여 구조 설계를 변경하였다. 2차 구조 해석을 통한 응력 해석 결과 블레이드 최대 응력은 43.8 MPa인 것으로 검토되었다. 스트러트의 최대 응력 분포는 74.9 MPa로 확인되었다. 블레이드는 얇은 구조 형태이므로 좌굴에 취약성

Table 3. Mechanical properties of glass/epoxy fabric composite

Longitudinal modulus	10,500 [MPa]
Transverse modulus	10,500 [MPa]
Shear modulus	1,450 [MPa]
Poisson ratio	0.27
Longitudinal tensile strength	283.9 [MPa]
Longitudinal compressive strength	184.6 [MPa]
Shear strength	15 [MPa]

Table 4. Stacking sequence of blade

Skin of Blade	[45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°]
Spar of Blade	[0°/90°/45°/-45°/0°/90°/0°/90°/0°/-45°/45°/90°/0°]

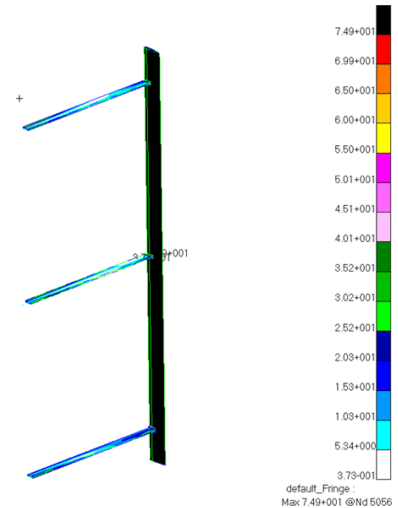


Fig. 2. Stress contour of blade structure [MPa]

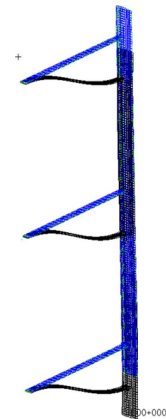


Fig. 3. Buckling analysis result of blade structure

을 검토해야 한다. 좌굴 해석 결과 하중배수 1 이상이면 좌굴에 안정한 것으로 확인되는데 1.1로서 좌굴 안정성이 분석되었다. 그러나 풍력 블레이드 설계 및 해석에 대한 국제

표준 규정 IEC 61400-2 규정에 의거하면, 극한 하중 해석 조건에서 최소 하중안전계수 1.1, 재료안전계수 1.35로 최소한 1.458의 안전율을 가지고 있어야 하므로, 설계 결과를 수정하여 좌굴 하중 배수 1.5를 만족하도록 설계하였다. Fig. 2는 블레이드 구조의 응력 분포를 보여주고 있다. Fig. 3은 좌굴 안정성 검토를 위한 좌굴 해석 결과를 보여주고 있다.

3. 타워 설계

3.1 타워 설계 요구 조건

본 연구에서 복합재 풍력 발전 블레이드 시스템을 지지하는 타워 구조 설계를 수행하였다. 풍력 발전 타워를 설계하기 위해서 타워에 작용하는 구조 설계 하중을 정의해야 한다. 작용하는 하중은 크게 3가지로 구분된다. 풍속에 의한 하중, 블레이드에 작용하는 공력 하중, 타워가 지지하는 블레이드 및 발전 시스템의 자중이다. 바람의 속도에 대한 영향으로 풍하중과 블레이드의 공력 하중은 변화하게 된다. 통상 블레이드 설계는 블레이드가 회전하는 최대 풍속을 중심으로 설계하지만, 타워는 폭풍시 블레이드 자체는 정지시켜 놓더라도 바람에 의한 풍하중이 강하기 때문에 폭풍시 조건이 극한 조건이 된다. Fig. 5는 타워에 작용하는 하중의 개념도를 보여주고 있다.

블레이드에 작용하는 하중과 연결 부위인 스트러트에 작용하는 하중은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$F_b = C_D q S_b \quad (5)$$

$$F_s = C_D q S_s \quad (6)$$

여기서, F_b 는 블레이드에 작용하는 하중, F_s 는 스트러트에

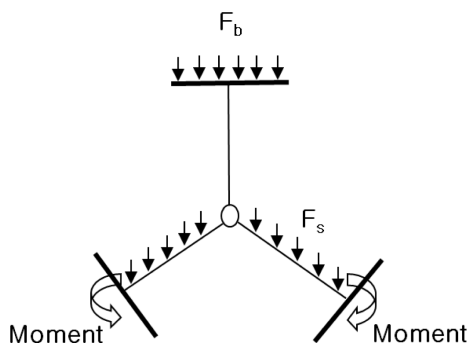


Fig. 4. Loading condition of tower

Table 5. Load analysis of tower

Load case	Normal condition	Storm condition
F_b	144 N	3,025 N
F_s	8 N	170 N
F_N	668 kg	

작용하는 하중, C_D 는 블레이드의 항력 계수, q 는 동압, S_b 는 블레이드 면적, S_s 는 스트러트 면적이다. 나셀과 발전기 및 블레이드의 무게에 의해 발생하는 총 무게는 F_N 으로 계산하였다. Table 5에 계산된 하중을 명시하였다.

3.2 타워 구조 설계 및 해석

본 연구에서 타워의 구조 설계 하중을 분석하여 최종 설계된 타워는 제작성을 고려하여 2단으로 분리하여 상단부 2 m, 하단부 4 m로 설계 되었으며, 적용된 재료는 철강 구조물로 적용되었다.

구조 설계 결과에 대한 구조 안전성 평가를 위해 유한 요소 해석 모델링을 수행하였다. Fig. 5는 유한 요소 해석을 위한 타워의 모델링 형상이다. 총 요소수는 23,077개의 요소가 적용되었다. 타워 하단부에 고정 경계 조건을 적용하고, 블레이드 및 스트러트에 의해 발생하는 하중, 타워 전체 바람에 의한 분포 하중, 나셀 등의 무게가 적용되었다.

구조 설계 조건 1인 정상 작동 시 타워가 받는 하중 하에서 구조 해석 결과 응력은 14.1 MPa로 확인되었으며, 타워에서 발생하는 변위는 12.9 mm로 확인되었다. Fig. 6, 7에 응력 해석 결과와 변위 해석 결과를 명시하였다. 좌굴 해석 결과는 좌굴 하중 안전율 19로서 좌굴 하중에도 충분히 안전

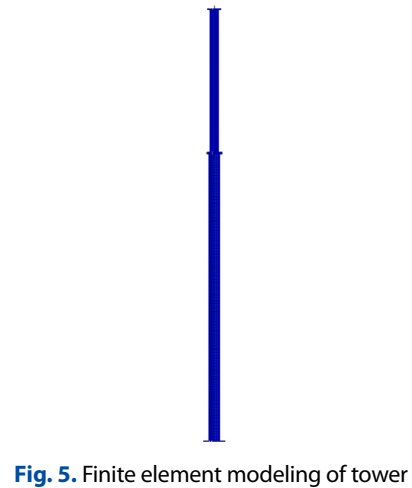


Fig. 5. Finite element modeling of tower

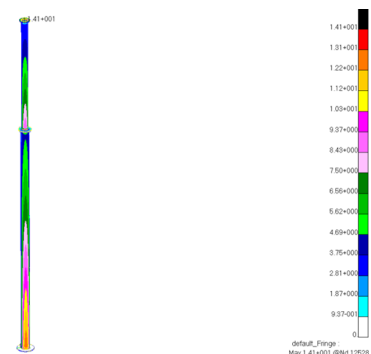


Fig. 6. Stress analysis result of load case 1 [MPa]

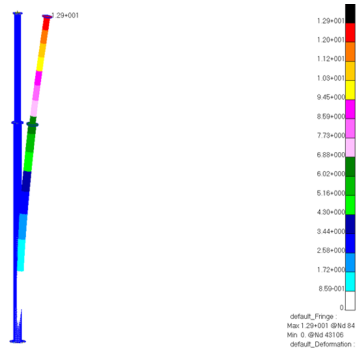


Fig. 7. Displacement analysis result of load case 1 [mm]

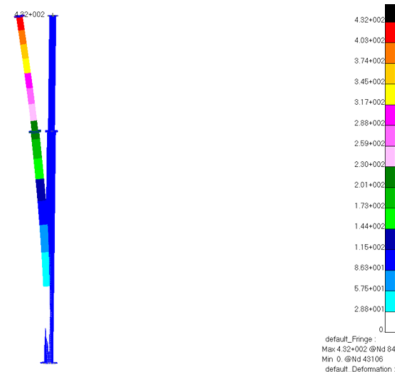


Fig. 10. Displacement analysis result of load case 2



Fig. 8. Buckling analysis result of load case 1

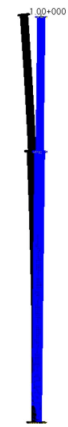


Fig. 11. Buckling analysis result of load case 2

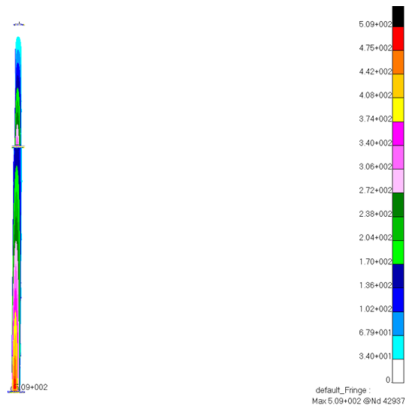


Fig. 9. Stress analysis result of load case 2

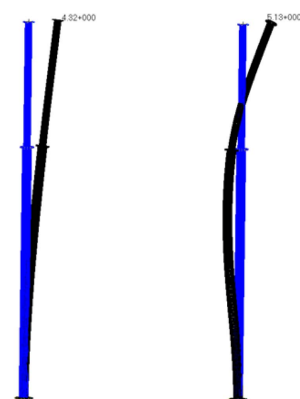


Fig. 12. Natural frequency analysis result (Mode 1, 2)

한 것으로 확인되었다. Fig. 8은 좌굴 하중에 대한 구조 해석 결과이다.

구조 설계 조건 2인 폭풍시 정지하였을 때 타워가 받는 하중 하에서 구조 해석 결과 응력은 50.9 MPa로 확인되었으며, 타워에서 발생하는 변위는 43 mm로 확인되었다. Fig. 9, 10에 응력 해석 결과와 변위 해석 결과를 명시하였다. 좌굴 해석 결과는 좌굴 하중 안전율 9로서 충분히 안전한 것으로 확인되었다. Fig. 11에 좌굴 해석 결과를 명시하였다.

타워 구조물은 긴 원통형 구조 형상이며 장착된 블레이

드는 회전하는 구조물이므로 회전에 의한 공진 가능성을 검토해야 한다. 이를 위해 타워의 고유 진동수 해석을 수행하였다. 고유 진동수 해석 결과 주요 모드인 1차부터 3차까지 진동수를 분석하였다. 1차 고유 진동수는 2.8 Hz, 2차 고유 진동수는 14.3 Hz로 분석되었다. 블레이드의 주요 회전수에서 회전에 의한 공진 가능성을 검토하기 위해 Campbell 선도를 통해 결과를 분석하였다. 대표적인 rpm인 300 rpm에서 충분히 공진 가능성에 대해 안전한 것으로 확인하였

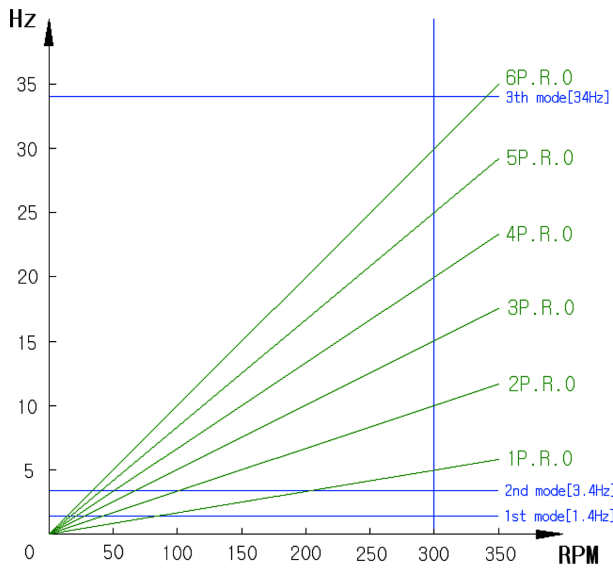


Fig. 13. Campbell diagram of tower

다. 운용 rpm은 Fig. 13의 300~400 rpm에 해당하며, 400 rpm은 한계 영역의 풍속이므로 실제 정격 운용 rpm은 300rpm이다. Fig. 12, 13에 고유 진동수 분석 결과를 제시하였다.

본 연구에서 수직축 풍력 발전 시스템 지지 타워에 대한 구조 해석 결과 구조 설계 하중 기준 2가지 경우 모두 안전한 것으로 확인되어, 설계 결과가 충분히 타당한 것으로 검토되었다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 유리섬유/에폭시 복합재료를 적용하여 수직축 풍력 발전 시스템 블레이드 구조 설계를 수행하였다. 또한 수직축 풍력 발전 시스템의 타워 지지 구조에 대한 구조 설계 연구를 수행하였다.

풍력 블레이드는 공력 설계 결과를 분석하여 구조 설계 하중을 산출하였으며, 스킨-스파-폼 샌드위치 복합재 구조를 채택하여 설계하였다. 최종 구조 설계 결과는 유한 요소 구조 해석을 수행하여 구조 안전성을 검토한 결과 충분히 안전한 구조 설계 결과인 것으로 분석되었다.

타워는 바람 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 블레이드를 받쳐주고 지지해 충분하게 바람 에너지를 받을 수 있게 해주는 역할을 한다. 운용 중에 타워가 받는 하중은 블레이드의 회전에 의해 발생하는 공기력과 바람에 의한 공기력을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 타워의 다양한 하중을 분석한 후 구조 설계를 진행하였다. 구조 설계 결과는 구조 해석을 수행하여 안전성을 평가하였다. 최종 타워의 구조 설계 결과에 대한 구조 해석을 통해 운용 중 구조 안전성 여부를 검토한 결과 충분히 만족함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07043553).

REFERENCES

1. Tony, B., David, S., Nick J., and Ervin B., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, UK, 2001.
2. Kong, C.D., Kim, M.W., and Park, H.B., "A Study on Structural Design and Analysis of Large Scale and High Efficiency Blades for Wind Turbine System," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 6, No. 4, 2012, pp. 7-11.
3. Kong, C.D., Choi, S.H., and Park, H.B., "Investigation on Structural Design and Impact Damage for A Small Wind Turbine Blade," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 2, No. 2, 2008, pp. 1-7.
4. Ahn, H.J., Bae, J.S., and Hwang, J.H., "Static Fluid Structure Interaction Analysis of Wind Turbine Blade Skin Fabric," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 10, No. 4, 2016, pp. 1-10.
5. Hwang, B.S., Kim, J.W., Kim, J.S., and Ryu, J.W., "Materials and Fabrication of Composite Mid or Large Wind Turbine Blades for Korean Version," *Composites Research*, Vol. 11, No. 2, 1998, pp. 84-95.
6. Hsu, Y., Wu, W.F., and Chang, Y.C., "Reliability Analysis of Wind Turbine Towers," *Procedia Engineering*, Vol. 79, 2014, pp. 218-224.
7. Jung, S.M., Kim, S.R., Patil, A., and Hung, L.C., "Effect of Monopile Foundation Modeling on the Structural Response of A 5-MW Offshore Wind Turbine Tower," *Ocean Engineering*, Vol. 109, 2015, pp. 479-488.
8. Liu, X., Lu, C., Li, G., Godbole, A., and Chen, Y., "Tower Load Analysis of Offshore Wind Turbines and The Effects of Aerodynamic Damping," *Energy Procedia*, Vol. 105, 2017, pp. 373-378.
9. Liu, X., Lu, C., Li, G., Godbole, A., and Chen, Y., "Effects of Aerodynamic Damping on the Tower Load of Offshore Horizontal Axis Wind Turbines," *Applied Energy*, Vol. 204, 2017, pp. 1101-1114.
10. Fontecha, R., Henneke, B., Kemper, F., and Feldmann, M., "Aerodynamic Properties of Wind Turbine Towers Based on Wind Tunnel Experiments," *Procedia Engineering*, Vol. 199, 2017, pp. 3121-3126.
11. Lim, S.J., Kong, C.D., and Park, H.B., "A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems," *International Journal of Composite Materials*, Vol. 3, 2013, pp. 15-23.
12. Park, H.B., "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, 2018, pp. 58-63.

13. Lee, H.S., *A Study on Design of Small Vertical Axis Wind Turbine System With High Efficiency and Low Noise*, MSC. Thesis, Chosun University, Rep. of Korea, 2011.
14. Bang, J.H., *Strength of Mechanically Fastened Composite Joint* A Study on Design and Analysis of Small Wind Turbine System for High Efficiency and Light Weight, Ph.D Thesis, Chosun University, Rep. of Korea, 2004.
15. Kong, C.D., Park, H.B., and Kang, K.J., "Structural Design and Analysis for Carbon/epoxy Composite Wing of A Small Scale WIG Vehicle", *Composites Research*, Vol. 19, No. 5, 2006, pp. 12-19.