

論文

2 MW급 대형 수평축 풍력발전시스템을 위한 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 최적설계에 관한 연구

임성진*, 공창덕*+, 박현범**

A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2 MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems

Sung Jin Lim*, Changduk Kong*+, Hyunbum Park**

ABSTRACT

In this study, a specific structural design procedure for 2 MW class glass/epoxy composite wind turbine system towers is newly proposed through load case study, trade-off study, optimal structural design and structural analysis. Optimal tower design is very important because its cost is about 20% of the wind turbine system's cost. In the structural design of the tower, three kinds of loads such as wind load, blades, nacelle and tower weight and blade aerodynamic drag load should be considered. Initial structural design is carried out using the netting rule and the rule of mixture. Then the structural safety and stability are confirmed using a commercial finite element code, MSC NASTRAN/PATRAN. The finally proposed tower configuration meets the tower design requirements.

초 록

본 연구에서 유리섬유/에폭시 복합재를 이용한 2 MW 풍력터빈 시스템 타워에 대한 특정 구조설계 절차가 하중 분석, 단계적 설계 변경 통한 최적 구조설계 및 해석을 통해 새로이 제안되었다. 최적 타워 설계는 풍력터빈 시스템 단가의 20% 이상을 차지하는 중요한 구조물 이다. 타워 구조 설계 시, 풍하중, 블레이드, 나셀, 타워 등에 의한 자중, 블레이드 공기 역학적 항력 등의 3가지 하중이 고려된다. 초기의 복합재 구조설계는 단순 설계기법과 혼합설계기법을 병용 하였다. 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC.NASTRAN/PATRAN을 통하여 구조적 안전성을 검토 하였다. 최종 제안한 타워 형상은 모든 설계 요구조건을 충족함을 확인하였다.

Key Words : 풍력 터빈 타워 (wind turbine tower), 필라멘트와인딩(filamenting winding), 최적설계(optimal design)

1. 서 론

인류는 수천 년에 걸쳐 여러 가지 형태로 바람에너지를 이용하여 왔다. 이렇게 오랜 역사를 가진 풍력발전 기술은 현재까

지 가장 경제성이 있는 신·재생에너지 기술이지만 전적으로 바람에 의존함으로써 발전전력의 양과 시스템의 효율성은 다소 낮은 편이다. 하지만 최근 화석연료의 고갈로 인해 과거의 경험과 학문적 이론 및 신기술을 풍력발전 기술에 집중 투자

접수: 2012년 3월 13일, 수정: 2012년 4월 19일, 게재승인: 2012년 4월 20일

* 조선대학교 항공우주공학과

*+ 조선대학교 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:cdgong@mail.chosun.ac.kr)

** 호원대학교 국방기술학부

하여 소형발전 시스템부터 MW급의 대형 풍력발전 시스템에 이르기 까지 많은 연구가 수행되고 있다[1]. 풍력발전 시스템의 대형화에 따라 블레이드와 타워 역시 대형화 되고 있는 추세이다[2]. 블레이드의 경우 복합재를 적용한 경량화 방안의 연구가 활발히 이루어지고 있으나 타워에 대해서는 복합재를 적용한 연구가 미흡한 실정이다. 타워의 경우 다른 기계 요소에 비해 간단한 구조물이지만 전체 풍력발전 시스템 비용의 20~25% 정도를 차지할 정도로 단가 비용이 매우 높기 때문에 가격 경쟁력이 있는 타워의 개발이 중요하다. 복합재를 적용한 타워의 경우 기존의 금속재 타워에 비해 경량화 및 단순한 제조과정을 거치면서 기존의 금속재 타워와 비교했을 경우 생산 가격을 절감할 수 있고 이동과 설치의 간소화를 통해 기존의 타워보다 용이하게 설치가 가능하다.

기존의 타워 설계 연구 결과를 분석해 보면 Tongguang Wang은 블레이드의 회전에 의해 생기는 항력을 고려하여 금속재 타워의 거동을 분석 한 후 해석결과와 비교하는 연구를 수행 하였다[3]. P. J. Murtagh는 타워의 고유진동수를 분석하여 타워의 안전성을 분석하였다[4]. Dimos J. Polyzois는 8개의 다중 셸로 구성된 GFRP 복합재 타워에 대한 설계를 수행 한 후 실험과 해석을 통해 타당성을 검증하는 연구를 수행 하였다[5]. Jane E. Lundberg는 하중의 영향을 받고 있는 원형 강관에 대해 유리섬유만 적용된 원형강관과 콘크리트충전강관을 비교하고 이를 해석을 통해 안전성을 검토 하였다[6]. 홍혁수 등은 2MW급 대형 풍력발전 시스템 금속재 적용 타워의 셸 두께를 이론적 해석을 수행한 후 수치해석을 이용하여 셸의 두께의 변화에 따른 고유진동수, 강도, 피로, 좌굴 값의 변화율을 검토하여 타워 셸 두께의 최적설계 연구를 수행 하였다[7]. 김동만 등은 대형 풍력발전 시스템 금속재 적용 타워의 작용하는 풍하중과 지진하중의 영향을 고려하여 구조진동특성을 계산 하는 연구를 수행하였다[8]. 이와 같이 국내·외 연구 결과를 분석한 결과 금속재 적용 타워의 경우 연구가 활발하게 진행 되고 있다. 그러나 복합재를 적용한 타워의 경우 연구가 미비한 실정이다.

본 연구에서는 복합재를 적용한 대형급 풍력발전 시스템 타워의 설계 절차를 제안하고 최적설계를 수행 하였다. 본 연구에 적용된 재료의 시편 실험 자료와 제작 단가비교 자료는 (주)화이버텍의 도움으로 진행 되었다

본 연구에서 제안한 설계 절차는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

2. 타워 설계

본 연구에서 풍력 발전 시스템 타워에 작용하는 하중을 분석하여 필라멘트 와인딩 공법을 적용한 복합재 타워의 각 섹션별 두께 및 적층형태의 최적화 구조 설계를 수행 하였으며 상용유한요소 해석 프로그램을 이용하여 구조해석을 통해 안전성을 평가 하였다.

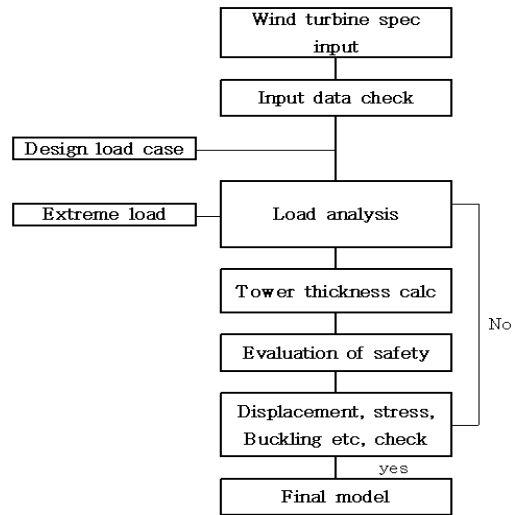


Fig. 1 Design procedure of wind turbine system tower.

2.1 구조 설계 개요

복합재를 적용한 타워 설계의 예는 많지 않다. 명확한 기준을 제시하기 위해 동일한 하중을 입력하여 먼저 금속재를 적용하여 설계를 수행한 후 복합재를 적용하여 경량화 설계를 수행하였다. 설계요구조건에 적합하고 구조적으로 안전한 설계를 위하여 유사구조형상, 재질, 제작 방법 등을 고려하여 구조적 개념 설계를 수행한다. 설계 하중은 각 하중 조건에 따른 하중해석을 수행하고 이를 분석하여 극한 하중을 고려하여 구조 설계를 수행한다. 구조설계가 완료되면 상용 유한요소 프로그램을 활용하여 구조 해석을 통해 구조 안전성을 검토하고 최종 설계를 확정한다.

본 연구에서 구조해석 유한요소 프로그램인 MSC PATRAN/NASTRAN을 이용하여 구조의 안전성을 확인하였다.

2MW 풍력터빈 시스템의 경우 80m 높이의 타워가 대부분 적용되어 사용 되고 있다[9]. 본 연구에서는 2MW 뿐만 아니라 추후 3~4 MW급의 대형 풍력발전시스템 까지 적용 가능하도록 높이를 100m로 결정 하였다. 동일한 조건을 만족하는 타워의 경우 타워의 최하단의 경우 내경이 4m, 최상단의 경우 3m로 전체적인 테이퍼진 형상을 하고 있다. 이에 본 연구에서는 이동 및 설치의 간소화를 위해 4개의 섹션으로 구분하였으며 중간 2개의 섹션은 외관상의 아름다움을 위해 3.4m, 3.7m로 결정 하였다[3]. 각 섹션은 원통의 형태를 하고 있으며 미관상 아름다움과 안전성을 고려하여 연결부위는 테이퍼진 형상을 적용 하였다. Table 1은 타워 형상을 보여준다.

2.2 타워에 작용하는 하중

풍력발전 시스템 타워를 설계하기 위하여 타워에 작용하는 구조 설계 하중을 분석하였다. 하중은 크게 3가지로 분류된다.

Table 1 System specification of tower

Type	Stepped shell			
Target	2 MW			
Height	100m			
Diameter	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4
		3.0 m	3.4 m	3.7 m
Tower material	Glass/Epoxy composite			

Table 2 Load cases for tower design

Load case	Case I	Case II	Case III
Wind speed	8.0 m/s	20.0m/s	55.0 m/s

바람에 의한 풍하중, 블레이드 추력에 의한 항력, 타워가 지지하는 나셀(Nacelle), 블레이드 및 타워의 자중이 중요한 설계 하중이 된다. 바람의 속도에 따라 풍하중과 블레이드 추력에 의한 항력은 변화하게 된다. 일반적으로 풍력발전 블레이드 설계 시에는 돌풍(gust) 조건을 고려한 최대풍속조건(cut-out wind speed)를 기준으로 설계를 수행한다. 그러나 타워의 경우 최대풍속조건 을 넘어 폭풍조건(storm condition)의 풍하중에서도 견뎌야 한다. 따라서 본 연구에서는 가장 큰 하중이 작용하는 폭풍시를 기준으로 하여 설계를 수행 하였다. 본 연구에서 하중분석 시 Table 2과 같이 Case I(정격 풍속), Case II(최대풍속), Case III(폭풍시 풍속) 3가지 경우의 풍하중을 고려하였다.

이중 가장 큰 하중이 작용하는 Case III를 구조 설계하중의 경우로 결정하였다. 상기 Table 1에서 고려한 3가지 하중 조건인 풍하중은 다음과 같은 경험식을 바탕으로 하여 타워의 각 섹션별 작용하는 풍하중을 계산 하였다[2].

폭풍 시 블레이드는 정지 상태를 유지하게 되나 블레이드에는 항력이 발생하게 된다. 블레이드 항력은 아래와 같은 경험식을 이용하여 계산한다.[2]

$$\begin{aligned} P_a &= 0.4V^2 \\ F_a &= P_a \cdot S = 0.4V^2S \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 S 는 블레이드가 회전하면서 만드는 면적으로 $\pi d^2/4$ 이다. 타워의 최상단에는 나셀 및 블레이드가 장착되는데 블레이드에 의한 항력 외에도 동력 장치 및 타워에 의한 자중이 타워에 작용하게 된다[3]. 본 연구에서는 선행 연구를 통해 개발된 2MW급 블레이드, 기어, 축, 발전기, 나셀 등의 무게를 적용하였다. 블레이드의 무게는 각 15ton으로 3개가 장착되며 기어, 축, 발전기, 나셀 등의 무게는 180ton으로 확인 되었다. 타워가 받는 하중을 Fig. 2에 나타 내었다.

Fig. 2와 같이 타워의 높이가 높아질수록 풍하중의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 타워에 작용하는 풍하중은 일본 건축기준법 시행령에 따라 식 (2)를 통하여 구 할 수 있다[2].

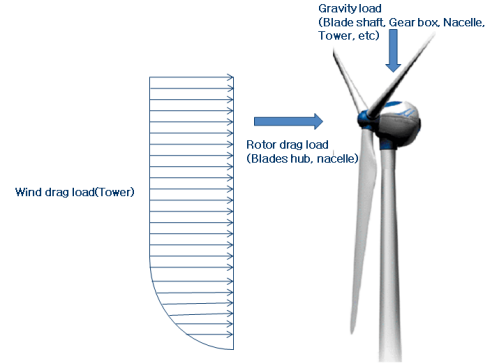


Fig. 2 Various applied loads on tower.

$$P = W \cdot A \quad (2)$$

A 는 바람의 투영면적으로 본 연구에서는 직사각형과 동일하다. W 는 풍압력을 나타낸다. 풍압력은 식 (3)을 통하여 얻을 수 있다.

$$W = q \cdot C_f \quad (3)$$

q 는 동압 [N/m^2], C_f 는 풍력계수로 본 연구에서는 상단 섹션부터 0.9, 0.84, 0.78, 0.60을 적용 하였다. 동압 q 는 식 (4)을 이용하여 구한다.

$$q = 0.6EV_0^2 \quad (4)$$

여기서 E 와 V_0 는 건축기준법 시행령에 제시한 계수와 풍속으로 E 는 상단 섹션부터 4.3, 4.0, 3.7, 3.4를 적용 하였으며, V_0 는 설계 기준 풍속인 55m/s를 적용 하였다. 위에서 제시한 식을 이용하여 구한 각 섹션별 하중을 Table 3에 나타내었다.

위의 하중들을 바탕으로 굽힘하중을 구하고 이를 이용하여 다음과 같은 식을 이용하여 타워의 응력과 변위를 계산하고 타워의 두께를 결정 하였다[7].

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sqrt{\sigma_d^2 + \sqrt{3}\tau_{xy}^2} \\ \sigma_d &= \frac{\sqrt{(M_y \cos\theta)^2 + (M_z \sin\theta)^2}}{I \cdot 2/d} + \frac{F_x}{A} \\ \tau_{xy} &= \sqrt{\left(\frac{F_y}{A} + \frac{M_x \sin\theta}{J \cdot 2/d}\right)^2 + \left(\frac{F_z}{A} + \frac{M_x \cos\theta}{J \cdot 2/d}\right)^2} \\ I &\approx \frac{\pi d^3 t}{8}, \quad J \approx \frac{\pi d^3 t}{4}, \quad A \approx \pi dt \\ \sigma_v &\propto \frac{1}{t} \end{aligned} \quad (5)$$

Table 3 Estimation of wind load on each tower section

Section	W[N/m ²]	A[m ²]	P[N]
1(top)	3812.46	100	381246
2	5361.53	185	991883
3	6305.59	255	1607925
4	7074.59	300	2122200

Table 4 Tower design result using steel

Section	Diameter[mm]	Height[mm]	Thickness	Mass[ton]
1(top)	3,000	25,000	25	480
2	3,400	25,000	35	
3	3,700	25,000	45	
4	4,000	25,000	55	

Table 5 Technical data for given 2MW towers

HAWT	Rated pwer	Height[mm]	Diameter[mm] (top/bottom)	Mass[ton]
MM92	2 MW	80,000	2,955/4,300	620
PMSG	2 MW	76,900	3,000/4,200	730
KBP-2000M U88	2 MW	80,000	3,000/4,200	740

식 (5)에서 보여지는 바와 같이 응력 값이 타워 쉘의 두께에 반비례함을 보여준다. M_x, M_y, M_z 는 섹션에 작용하는 모멘트를 나타낸다. A 는 타워의 단면적, θ 는 바람이 타워에 작용하는 각도를 나타낸다. 따라서, 초기 설계에서 계산된 응력값을 적용하여 극한 강도에 대하여 안전율 1을 만족하는 쉘의 두께는 식 (6)을 적용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_v^0 \frac{t^0}{t^1} = \sigma_y \tag{6}$$

$$t^1 = t^0 \frac{\sigma_v^0}{\sigma_y}$$

여기서 σ_v^0 는 초기 설계에서 계산된 응력 값을 나타내고, t^0, t^1 는 각각 초기 설계 두께와 안전율 1을 만족하는 두께를 나타낸다. 식 (7)은 타워에 작용하는 변위를 보여준다.

$$\delta_t = \delta_{F_a} + \delta_Q \tag{7}$$

δ_{F_a} 는 집중하중을 받는 보의 변위로서 $\delta_{F_a} = \frac{F_a L^3}{3EI}$ 로부터 구할 수 있다. F_a 는 블레이드에 의해 발생하는 추력, L 은 타워 높이, E 는 탄성계수, I 는 관성모멘트를 나타낸다. δ_Q 는 분포하중을 받는 보의 변위로 $\delta_Q = \frac{QL^4}{8EI}$ 로부터 구하게 된다.

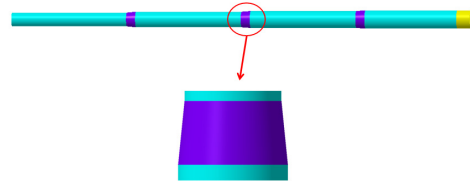


Fig. 3 Proposed conceptual tower configuration.

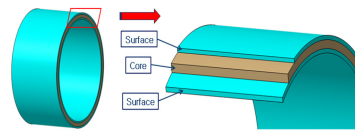


Fig. 4 Primarily section design model for tower structure.

금속재(Steel)를 적용하여 설계를 수행한 결과 Table 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 타워의 자중은 상용 유한 요소 프로그램인 MSC.NASTRAN을 이용하여 검토하였다. 타워의 섹션별 두께나 자중이 기존의 동급 제품들과 유사한 것으로 확인되었다[9]. 설계된 전체 타워 형상은 Fig. 3과 같다. 타워는 총 4개의 섹션으로 제작의 용이성을 위하여 각 섹션의 단면은 직사각형의 형상을 보여주고 있다. 연결부위의 경우 외관상의 아름다움을 고려하여 테이퍼진 형상을 적용 하였다.

본 연구의 비교대상인 기존의 2MW급 풍력 발전 시스템에 사용되는 타워의 경우 Table 5에 나타내었다[2]. Table 4와 같이 본 연구에서 제안한 타워의 중량이 Table 5에 나타내어진 기존 타워들 보다 훨씬 경량임을 알 수 있다.

2.3 복합재 적용 타워 재설계

본 연구에서 타워의 재질은 유리섬유/에폭시(glass/epoxy)를 사용하였으며 제작방법은 필라멘트 와인딩공법(filament winding method)을 적용 하였다. 필라멘트 와인딩 공법은 압력용기나 파이프 같은 복합재 쉘 구조물의 제작에 일반적으로 사용되는 공법이다. 이 공법은 자동제어기를 이용 모든 제작과정을 자동적으로 수행할 수 있어 노동력 절감뿐만 아니라, 제작 시간 단축, 대형 복합재 구조물의 대량 생산에 매우 적합하며, 프리프레그를 사용하는 것보다 저렴하게 제작이 가능하다[10]. 대형 풍력발전 시스템 타워의 경우 높이가 매우 높기 때문에 이동 및 설치의 용이성을 위하여 타워를 4개의 섹션으로 나누어 설계를 수행 하였다. 타워의 하부 3m는 지면과의 고정 및 타워내의 이동통로와 출입구를 만들기 위해 금속 재질을 적용하였다. 단순 유리섬유만을 적용하여 타워를 제작할 경우 높은 제조비용이 소요 되므로 유리섬유를 내외면에 적용하고 내부에는 모래와 에폭시가 섞인 형태로 채워지는 형식의 샌드위치 구조를 선택하였다. 본 연구에서 제안된 타워 단면 구조 형상은 Fig. 4와 같다. 또한 타워의 각 섹션 간

Table 6 Structural analysis results according to various lay-up sequence

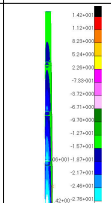
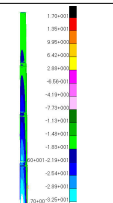
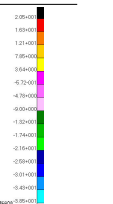
Lay-up sequence	[0/90] _{50S}	[45/90] _{50S}	[0/90/45] _{50S}
Compressive stress(max)	30.6[MPa]	36.0[MPa]	42.7[MPa]
Tensile stress(max)	14.2[MPa]	17.0[MPa]	20.5[MPa]
Analysis result			

Table 7 Mechanical properties of used materials

Material Property	Glass/Polyester UD	Polyester Sand
E1 [N/mm ²]	17000	5600
E2 [N/mm ²]	500	5300
G12 [N/mm ²]	6500	1930
ν	0.3	0.37
Xt [N/mm ²]	233	96.5
Xc [N/mm ²]	128	54.6
Yt [N/mm ²]	215	83.8
Yc [N/mm ²]	108	53.8
Density	2000E-9 kg/mm ³	1700E-9 kg/mm ³
Ply thickness [mm]	0.38	



Fig. 5 Max stresses (tensile and compressive) and top deflection versus lay-up ratio (w/o core).

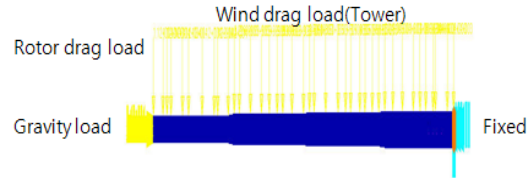


Fig. 6 Load and boundary condition of the tower FEM.

Table 8 Structural analysis results according to various lay-up ratio

Case	Lay-up ratio(±35 to 90)	Compressive stress(max) [MPa]	Tensile stress(max) [MPa]	Deflection (max) [mm]
1	10% 90%	568	631	6.71×10 ⁴
2	20% 80%	307	193	3.98×10 ⁴
3	30% 70%	219	143	2.93×10 ⁴
4	40% 60%	269	248	2.44×10 ⁴
5	50% 50%	355	320	2.13×10 ⁴
6	60% 40%	230	89	1.90×10 ⁴
7	70% 30%	469	365	1.88×10 ⁴
8	80% 20%	435	323	1.83×10 ⁴

연결 부위는 체결의 용이성과 수려한 외관과 공기 저항 감소를 위해 내면 쪽에 볼트 체결 부위를 설치하고 외면은 테이퍼진 형상을 채택하였다. 만일 섹션별 연결부위에 프랜지 형태의 볼트 연결 부위 없이 연결 하는 경우 좌굴에 대한 불안전성과 응력 집중 현상이 나타나는 것으로 확인 되었다.

2.4 단계적 설계 변경을 통한 최적 설계

본 연구에서 단계적 설계 변경을 통하여 적절한 안전율, 타워 상부의 처짐, 중량 등을 고려하여 와인딩 적층 형태와 두께를 결정 하였다. Table 7는 적용한 재료의 기계적 물성치를 보여준다. Table 8는 구조해석을 통한 적층 형태 결정의 과정을 보여 주고 있다. 복합재의 경우 해석을 수행한 결과 0°, 90°로 적층을 하였을 경우 응력 및 변위에 있어서 가장 안전함을 보여준다. 해석 결과를 Table 6에 나타내었다.

제조를 의뢰한 (주)화이버텍의 필라멘트 와인딩 기계의 경우 최대 적층각이 35°로 확인 되었다. 이에 본 연구에서는 0°에 가장 가까운 35°를 적용하여 설계 후 해석을 수행한 결과 35°와 90°를 적층한 경우 가장 안전한 것으로 확인 하였다. Table 7은 위에서 결정한 두 각의 적층 비율에 따른 압축, 인장 응력과 변위를 보여준다. Case 3의 경우 가장 낮은 압축응력을 보이고 있다. 하지만 Case 6에 비해 인장응력과 변위가 큰 것을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 Case 6의 경우를 최종 적층 형태로 결정 하였다. Fig. 5는 각 Case 별 최대 압축, 인장응력 및 변위의 변화를 보여준다.

Fig. 7는 Case 6에 대한 상세 구조 해석 결과로서 타워의 응력 분포 및 변형 형상을 나타내었다. 유한요소 해석시 타워의 하단 부분의 노드들의 모든 병진 및 회전 자유도를 구속하였다. 그리고 타워에 작용하는 하중들을 분석하여 적용 하였다. 타워의 경계조건 및 하중에 대한 내용을 Fig. 6에 나타내었다.

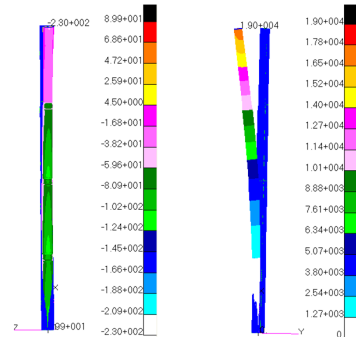


Fig. 7 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the tower using case 6 design result.

위의 결과를 보게 되면 타워 상부의 변위가 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 변위 감소와 좌굴 등의 안정성을 확보하기 위하여 core 를 삽입하여 샌드위치 구조로 만들고 이에 일정한 두께 증가를 통하여 최적 두께를 결정 하였다. 두께의 증가는 프로그램을 통해 단계적으로 변화를 주고 구조해석을 통해 안전성을 확인하여 최적의 두께를 결정하는 방법을 사용하였다. 전체적인 적층 형태는 각 섹션별 두께에 $[\pm 35]$, $[90]$, $[\text{core}]$ 를 각각 30%, 20%, 50%를 적용 하였으며 적층순서를 포함한 복합재 타워의 최종 설계 결과 값을 Table 9에 나타내었다.

Table 9 Design result of composite tower using sandwich structure

Section	Diameter[mm]	Height[mm]	Thickness	Mass [ton]
1(top)	3,000	25,000	84.24 [[$(\pm 35)_{32}/(90)_{22}/\text{core}]_S$	270
2	3,400	25,000	93.6 [[$(\pm 35)_{36}/(90)_{24}/\text{core}]_S$	
3	3,700	25,000	106.08 [[$(\pm 35)_{40}/(90)_{27}/\text{core}]_S$	
4	4,000	25,000	115.44 [[$(\pm 35)_{43}/(90)_{29}/\text{core}]_S$	

Table 10 Design cases of each section thickness

Section Case	1st section thickness [mm]	2nd section thickness [mm]	3rd section thickness [mm]	4th section thickness [mm]
1	28.08	37.44	46.8	59.28
2	31.2	43.68	53.04	62.4
3	37.44	46.8	59.28	68.87
4	62.4	74.88	84.24	93.6
5	84.24	90.48	93.6	106.8
6	84.24	93.6	99.84	109.2
7	84.24	93.6	102.96	110.6
8	84.24	93.6	106.08	112.4
9	84.24	93.6	106.08	113.8
10	84.24	93.6	106.08	115.44

Table 11 Structural analysis results including maximum stresses and top deflection of each design case

Case	Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)
1	580[MPa]	516[MPa]	67100[mm]
2	573[MPa]	450[MPa]	41100[mm]
3	480[MPa]	397[MPa]	32100[mm]
4	350[MPa]	300[MPa]	11563[mm]
5	240[MPa]	222[MPa]	10023[mm]
6	227[MPa]	120[MPa]	9412[mm]
7	130[MPa]	115[MPa]	6555[mm]
8	119[MPa]	103[MPa]	3526[mm]
9	106[MPa]	71[MPa]	1860[mm]
10	88.8[MPa]	57.6[MPa]	1530[mm]

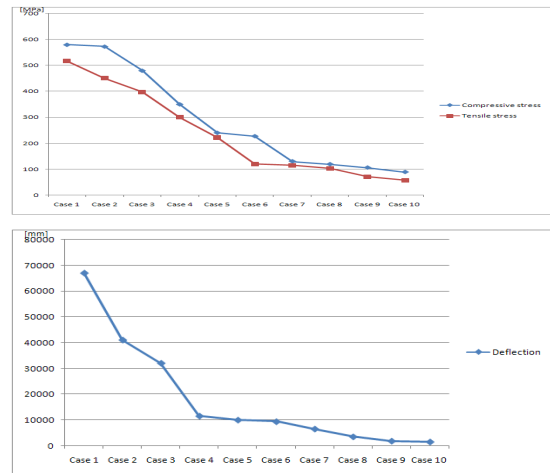


Fig. 8 Max stresses (tensile and compressive) and top deflection versus thickness(w core).

Table 10, 11은 Table 8에서 각 섹션에 두께 변화를 주었을 때 응력 및 타워 상단의 변위를 보여준다. 이 결과로부터 재료의 허용응력 강도를 만족하는 응력과 타워의 길이에 비례하여 안전한 범위 내의 변위를 모두 만족하는 두께를 최종 형상인 case 10의 각 섹션의 두께를 결정 하였다[2]. case 10의 경우 본 연구의 목적에 맞는 최적두께 결정 과정이므로 만족하는 최적두께로 결정 하였다. Fig. 8은 각 Case별 응력과 변위의 변화를 보여준다.

본 연구를 통해 설계된 타워는 전체 높이 100m로서 중량은 270ton으로 확인 되었다. 기존에 개발된 높이 80m 급속재 타워가 중량이 450~700ton 으로 복합재 타워가 20m 더 높음에도 불구하고 충분히 경량화 된 것으로 검토되었다[10]. 최적 두께와 최적 적층 형상을 적용하여 좌굴해석을 수행한 결과 좌굴하중 배수가 1 이상으로 구조 안정성이 확인되었다. 최종 설계 형상에 대한 타워 외부 표면에서의 축방향 응력분포와 타워 변형 해석 결과는 Fig. 9와 같다.

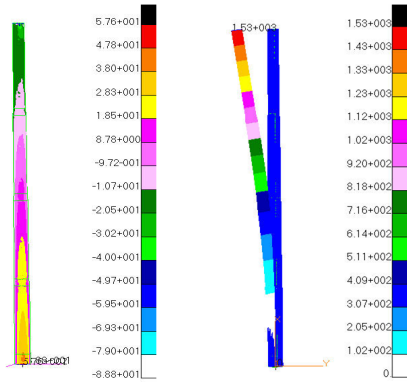


Fig. 9 Spanwise stress distribution on outer skin and deformation of composite tower.

Fig. 10은 타워의 좌굴 모드와 좌굴하중배수를 나타내며 Fig. 11은 타워의 고유 진동수 해석을 수행한 후 풍력터빈 블레이드 회전속도 20rpm에서 공진 가능성을 확인하기 위한 Campbell 선도를 나타낸다. 여기서 고유진동수의 경우 일반적인 대형풍력 발전 시스템에서 사용되고 있는 운용 rpm을 분석 후 적용하여 구하였으며, 본 논문에서는 대표적인 20rpm에 대한 Campbell 선도만을 나타내었다.

본 연구를 통하여 경량화 구조 설계 기법의 타당성을 검토하기 위하여 기존의 동일한 100m 높이의 금속재 타워의 제작단가와 복합재를 적용하여 제작하였을 경우의 단가 비교를 Table 12에 나타내었다. Table 12의 결과는 복합재 타워 제작사인 화이버텍에 의뢰하여 각각의 재료 단가와 타워 제작에 투입되는 인건비를 비롯하여 총 비용을 고려하여 산출을 의뢰한 결과이다. 원자재 금액을 kg당 원으로 계산하여 기존의 타워에 적용된 타워 두께를 산출하여 인건비를 포함한 제작단가를 계산 하였다.

Table 12 Comparison of manufacturing cost between composite and teel towers(provided FIBRETECH.CO.LTD)

Material	Manufacturing Cost per each (won)
Composite	262,000,000
Steel	350,000,000

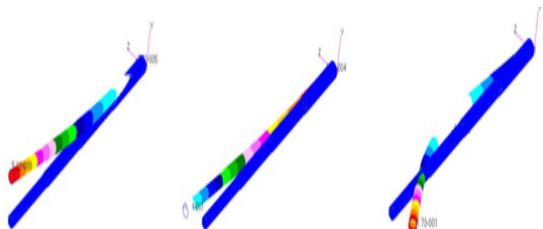


Fig. 10 Tower buckling mode shapes and its load factors.

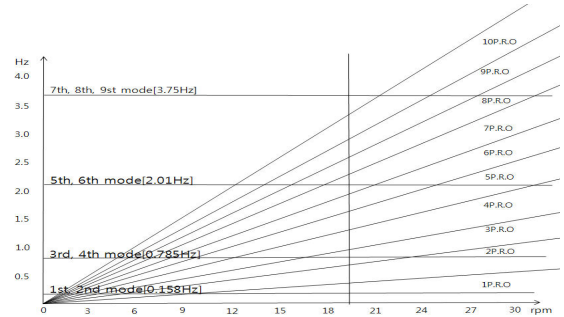


Fig. 11 Campbell diagram of tower.

3. 결 론

본 연구에서는 대형 풍력발전용 타워에 대한 연구로서, 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 복합재 타워를 새롭게 제안하였고 다음과 같은 방법을 통해 설계하였다.

첫째, 제조단가를 고려하여 유리섬유/에폭시 스킨, 모래/에폭시 코어를 적용한 샌드위치 구조형상을 제안하여 최적 설계를 수행하였다. 구조 안전성을 확보하면서 중량을 최소화 하여 기존의 강철 타워보다 경량화를 기하였다.

둘째, 필라멘트 와인딩 각도에 따라 복합재의 강도가 달라지게 되는데 적층 와인딩 각도가 타워 길이방향으로 0°에 가까울수록 강도는 증가하게 되나 제작 가능한 최대와인딩 각이 ±35°로 제한되어 이를 기준으로 설계를 진행하였으며 이에 90° 적층 와인딩각을 적절히 조합하여 응력, 변위, 중량을 감소시키는 방향으로 설계하였다.

셋째, 최종 설계 결과를 구조해석을 통해 변위, 응력, 좌굴강도, 공진가능성을 확인한 결과 안전한 구조임을 확인하였으며, 기존 금속재 타워보다도 40%정도 경량화 되었음을 검토 하였다.

추후 설계된 복합재 타워의 시제품을 (prototype) 제작하여 구조 시험을 통해 설계 타당성을 확인 할 예정이다.

후 기

본 논문은 (주)화이버텍에서 제공한 시편 물성치 및 제공 자료를 바탕으로 수행된 연구임. 본 논문은 호원대학교 교내 학술연구비 지원을 받아 수행됨.

참고문헌

- 1) Kong, C., Bang, J., Sugiyama, Y., "Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load

- case and fatigue life,” *Journal of Energy*, Vol. 30, 2005, pp. 2101-2114.
- 2) Desire LE GOURIERES, “Wind power plants theory and design,” PERGAMON PRESS, UK, 1998.
 - 3) Tongguang Wang., et al., “A high resolution tower shadow model for downwind wind turbine,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 2001, pp. 873-892.
 - 4) Murtagh, P.J., et al., “Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading,” *Engineering Structures* 27, 2005, pp. 1209-1219
 - 5) Dimos, J., Polyzois., et al., “Static and dynamic characteristics of multi-cell jointed GFRP wind turbine towers,” *Composite Structures*, 2009, pp. 34-42
 - 6) Jane, E.Lundberg, Theodore, V.Galambos, “Load and resistance factor design of composite columns,” *Structural Safety*, Vol. 18, No. 2/3, pp. 169-177.
 - 7) Uys., P.E. et al., “Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure,” *Engineering Structure* 29, 2007, pp. 1337-1342.
 - 8) Gutierrez., E., et al., “A wind turbine tower design based on the use of fibre-reinforced composites,” *European Laboratory for Structural Assessment(ELSA)*, 2003.
 - 9) Spera., D.A, “Wind turbine technology,” *ASME Press*, 1994, pp.139-194
 - 10) Hani, M.Negm., et al., “Structural design optimization of wind turbine towers,” *Computers and Structures* 74, 2000, pp. 649-666.