GFRP DSCT 구조를 적용한 3MW급 풍력타워의 단면 설계

Section Design of 3MW Wind Turbine Tower Applied by GFRP DSCT Structure

홍혜민* · 김성원** · 한택희***

Hong, Hyemin*, Kim, Sungwon**, and Han, Taek Hee***

Abstract

In this study, cross-sections of GFRP DSCT (Glass Fiber Reinforced Polymer Double-Skinned Composite Tubular) column applicable to a 3 MW wind power tower were designed and performance evaluations of the designed sections were conducted. Forty sections, which satisfied the required axial load and bending moment, were designed according to the corresponding hollow ratio using the AutoDSCT program. Each section was analyzed using the CoWiTA program with consideration of the nonlinearity of the material, concrete confinement effect, and large displacement effect. Consequently, for a section with a diameter of 4.5 m, the requirement was satisfied when the hollow ratio was 70% to 85%, and for the diameters of 4.275 m, 4.05 m, and 3.825 m, sections with hollow ratios between 70% and 82%, 70% and 76%, and only 70%, respectively, satisfied the requirement respectively. Further, modularization was also carried out on the columns for convenience and ease of transport, and the performance of each section was verified by presenting sections of the module for each height.

Key words : GFRP, DSCT, Composite Material, Wind Power Tower, Section Design

요 지

본 연구에서는 3 MW급 해상풍력 타워에 적용 가능한 Glass Fiber Reinforced Polymer Double-Skinned Composite Tubular (GFRP DSCT) 기둥의 단면을 설계하고 단면의 성능을 확인하기 위하여 해석을 수행하였다. 설계단면은 AutoDSCT 프로그램을 이용하여 축강도 및 휨강도의 요구성능을 만족하는 40개의 단면을 산출하여 가장 경제적인 단면을 선정하였다. 해석 수행시, 재료에 대한 비선형성, 콘크리트 구속효과 및 상재 풍력터빈의 자중을 고려한 대변위 효과를 고려하였다. 해석 결과, 4.5 m 직경을 가진 단면의 경우, 중공비 70%~85%일 때, 요구성능을 만족하였으며, 직경 4.275 m, 4.05 m, 3.825 m의 경우, 중공비 70%~82%, 70%~76%, 70%를 가진 단면이 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 운반의 편리성 및 용이성을 위해 기둥에 대하여 모듈화를 수행하였으며, 각 높이에 따른 모듈의 단면을 제시하고 각 단면의 성능을 확인하였다.

핵심용어 : 풍력타워, DSCT, 복합재료, FRP, 단면설계

1. 서 론

최근 원자력 및 석탄화력 연료의 생산이 감소하고 신재생 에너지에 대한 사용이 증가하고 있으며, 그 중에서도 풍력에

너지에 대한 관심이 높아지고 있다(IRENA, 2020). 풍력에너지는 청정에너지임과 동시에 재생 가능한 무한한 에너지원으로 각광 받고 있으며, 전 세계적으로 이에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다. 해상풍력발전은 육상풍력

*정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 기술원(E-mail: hyeminhong@kiost.ac.kr)

Member, Research Specialist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 기술원(E-mail: swkim@kiost.ac.kr)

Member, Research Specialist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

***교신저자, 정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 책임연구원(Tel: +82-51-664-3529, E-mail: taekheehan@kiost.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

발전보다 비중이 매년 증가하고 있으며(U.K. Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2019), 2019년까지 전 세계 풍력발전의 누적 용량은 651 GW이다(WWEA, 2019). GWEC 보고서(GWEC, 2019)에 따르면, 2024년까지 매년 풍력발전이 71 GW씩 신규 설치되고 향후 4년 동안 355 GW를 추가로 설치할 것으로 예상하였으며, 연간 해상풍력 설치는 2024년까지 15 GW에 달해 전 세계 신규 풍력 발전의 20%를 차지할 것으로 예측하였다.

해상풍력은 육상에 비해 더 많은 풍력자원을 확보할 수 있으며, 최근 발전 효율성 증대 및 Levelised Cost of Energy (LCOE) 저감을 위해 풍력터빈의 크기가 커지고, 이로 인해 지지구조물의 세장비가 증가하고 있다. 이는 좌굴 파괴의 위험을 초래하고 지지구조물의 안전성 저하 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 고강도의 신형식 지지구조의 개발이 필요하다.

Shakir-Khalil and Illouli (1987)에 의해 제안된 DSCT 구조는 Figs. 1~3과 같이 콘크리트가 내측 및 외측 관 사이에 충전되어 완전한 3축 구속 상태로 존재하며, 강도 및 연성도 측면에서 유리하다. 또한, 이는 중공단면으로 인해 자중이 작아 재료에 대한 절감 효과가 있어 경제적이다. 현재 DSCT 구조를 적용한 범위가 확대되고 있으며, 그 중에서도 풍력타워에 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Han et al., 2015; Han et al., 2018; Han et al., 2016; Hong et al., 2016a, 2016b; Yi and Han, 2016; Hong et al., 2019).

해양구조물은 부식에 대한 문제로 인하여 시공 이후 상당한 유지보수비용이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 내구성 및 내부식의 기능을 향상시킨 복합소재개발에 대한 연구가 진행되고 있다(Hong et al., 2018; Hong et al., 2019). 본 연구에서는 Glass Fiber Reinforced Polymer Double Skinned-Composite Tubular (GFRP DSCT)구조를 3 MW급 풍력타워에 적용하여 타워의 단면을 설계하고 해석을 통하여

Fig. 1. Cross-Section of DSCT Column (Han et al., 2007)

Fig. 2. Triaxially Confined Concrete in DSCT Column (Han et al., 2007)

이에 대한 성능을 평가하였다.

2. DSCT 기둥 자동 단면 설계 프로그램

AutoDSCT 자동설계 프로그램은 Han et al. (2013)의 해석 모델을 이용하여 개발되었으며, Fig. 3의 프로세스로 단면 설계가 진행된다.

Fig. 3. Design Process in Developed Program (Han et al., 2013)

개발된 콘크리트 재료모델은 Mander et al. (1984)이 제시한 콘크리트 재료모델을 수정하여 유도되었으며(Han et al., 2007), Fig. 4의 방법으로 단면해석법을 적용하여 DSCT 기둥의 응력-변형률 관계를 정의하고 Fig. 5의 곡률-변위 관계를 정의하였다(Han et al., 2013). 또한, 콘크리트의 구속 효과가 고려된 비선형 재료 모델에서는 콘크리트에 발생하는 구속응력을 계산하기 위하여 Fig. 6의 자유물체도를 적용하였다(Han et al., 2013).

프로그램에서 기둥의 기본제원(외경 및 재료의 물성치)과 최소 요구성능(축력 및 모멘트) 입력 시, 자동적으로 중공비 (70%~97%)에 따라 단면을 변화시켜 해석을 수행하며, 각 단면에 대하여 Axial Load-Bending Moment (P-M) 상관관계를 해석하고 10개의 최적단면을 산출한다(Han et al., 2013).

Fig. 6. Confining Stress on Concrete in a DSCT Column (Han et al., 2010)

프로그램에서 외부관의 최소 요구 두께는 Eq. (1) (Timoshenko and Gere, 1963)와 Eq. (2) (Korea Concrete Institute, 2012)의 식을 적용하여 모두 만족하도록 계산하고 점진적으로 증가시켜 국부좌굴이 발생하지 않도록 한다(Han et al., 2015).

Fig. 4. Section Analysis Using Strain Compatibility and Layer-by-layer Approach (Han et al., 2013)

Fig. 5. Curvature and Displacement Functions (Han et al., 2013)

Eqs. (1)과 (2)에서 f_{cr} 은 연직하중에 대한 외부관의 좌굴강도, f_y 는 항복강도, t 는 외부관의 두께, D 는 외부관의 직경, E 는 외부관의 탄성계수, E_t 는 외부관의 접선탄성계수, v 는 외부관의 포아송비이다.

$$f_{cr} = \frac{tE_t}{\frac{D}{2}\sqrt{3(1-v^2)}} \quad (1)$$

$$t > (D+t)\sqrt{\frac{f_y}{8E}} \quad (2)$$

외부관의 두께 결정 후, 10개 단면의 각 중공비에 대해 Eqs. (3)과 (4)를 동시에 만족하도록 내부관의 최소 두께를 계산하며(Han et al., 2010), 0.01 mm 간격으로 내부관의 두께를 점진적으로 증가 시켜 계산을 수행한다(Han et al., 2013). 내부관의 두께는 Han et al. (2010)이 제안한 설계방법 및 Eqs. (3)-(4)를 적용하여 항복파괴 및 좌굴파괴가 발생하지 않는 최소 두께를 계산한다(Han et al., 2015). 여기서, D_i 는 구속콘크리트의 내경을 나타내며, D 는 구속 콘크리트의 외경, f_{oty} 는 외부관의 항복강도, t_{ot} 는 외부관의 두께, f_y 는 내부관의 항복강도, E 는 내부관의 탄성계수를 나타낸다.

$$t_y > \frac{D_i \cdot f_{oty} \cdot t_{ot}}{D \cdot f_y} \quad (3)$$

$$t_{bk} > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 \cdot f_{oty} \cdot t_{ot}}{D \cdot E}} \quad (4)$$

3. GFRP DSCT 풍력타워 단면 설계

3 MW급 GFRP DSCT 풍력 타워의 초기단면은 Kriegers Flak Offshore Wind Farm에 설치된 3.6 MW급 해상풍력 강제타워(Table 1)의 하부 및 상부 직경인, 4,500 mm 및 3,600 mm를 적용하였으며(Ljij and Gravesen, 2008), 타워에 작용하는 축력 및 휨강도는 선행 연구의 보고서(KIOST, 2018)에 따라, Table 2에 제시된 상용화된 3 MW급 풍력 터빈의 사양을 90 m 타워에 적용하여 설계하였다. 먼저 타워의 기초 설계에 필요한 타워의 하중을 가정하기 위하여 직경 4,500 mm의 중공비 0.7을 가진 콘크리트 타워의 중량을 계산하고 GFRP 두께를 고려한 중량을 추가하였으며, 본 풍력타워는 상부로 갈수록 타워의 직경이 좁아지는 구조물이기 때문에 이를 고려하여 총 중량을 산출하였다.

3 MW급 터빈을 지지할 수 있는 GFRP DSCT 풍력타워의 하부 단면은 Table 3과 같이 기존 강제 풍력타워 하부 외경, 4,500 mm의 85%, 90%, 95%, 100%를 갖도록 설계하였다. 단면 설계에는 AutoDSCT 프로그램(KIOST, 2014)을 이용하였으며, 사용된 재료물성치의 입력값으로 GFRP 외부 및

내부 관의 항복강도 48.685 MPa과 극한강도 230.25 MPa을 적용하였으며, 콘크리트의 압축강도는 30 MPa을 적용하였다. Table 4는 단면에 작용하는 축력(기둥 및 터빈 중량의 합)과 3 MW급 콘크리트 타워에 작용하는 휨강도 값인 88,000 kN-m를(KIOST, 2018) 나타낸다. 휨강도는 상용화된 3 MW급 풍력터빈의 사양을 적용하여 출력, 추력 및 설계단면력을 산출하고 계산된 설계단면력에 거스트계수 및 부분안전계수를 각각 1.6 및 1.35로 적용하여 모멘트를 산정하였다.

Table 1. Referenced Steel Tower (Ljij and Gravesen, 2008)

Capacity	3.6 MW
Rotor Diameter	106 m
Foundation-tower Interface Level Acc. MSL*	3.5 m
Hub Height above Foundation Interface	72.5 m
Nacelle Mass Incl. Rotor	220 tons
Tower Top Diameter/Wall Thickness	3.5 m/15 mm
Tower Bottom Diameter/Wall Thickness	4.5 m/30 mm
Tower Mass	220 tons

* MSL: Mean Sea Level

Table 2. Information of 3 MW Turbine

Capacity	3 MW
Rotor Diameter	100 m
Rotor Speed	14.2 rpm
Cut-In Wind Speed	4 m/s
Cut-Out Wind Speed	25 m/s
Generator Speed	700 - 1,300 rpm 50 Hz / 840 - 1,560 rpm 60 Hz

Table 3. Section Design Case of DSCT Wind Power Tower

Diameter Ratio*	Diameter	Design Case**
1.00	4,500 mm	3F100
0.95	4,275 mm	3F95
0.90	4,050 mm	3F90
0.85	3,825 mm	3F85

* (Diameter of DSCT Wind Tower) / (Diameter of Reference Steel Wind Tower)

** tFd (eg, 3F95, 5F80), t=turbine capacity, F= FRP tube, d=diameter ratio ($\times 10^{-2}$)

Table 4. Minimum Requirement of Strength

Cases	Axial load (kN)	Required moment (kN-m)
3F100	11,709.4	88,000
3F95	11,120.6	
3F90	10,561.9	
3F85	10,033.5	

AutoDSCT 프로그램 상에서 각각의 외경을 갖는 DSCT 타워의 단면을 70%~97%의 중공비 범위에서, 3% 간격으로 변화시켜 Table 5와 같이 최소 요구성능의 축강도 및 휨강도를 모두 만족하는 총 40개의 단면을 산출하였다.

Table 5에 나타난 설계 케이스 표기에서 앞의 숫자는 터빈의 용량, 뒤의 숫자는 참고한 강재타워 대비 직경비, 가운데 알파벳은 내부 및 외부관의 사용 재료를 나타내며, 마지막 ‘/’ 다음에 표기된 숫자는 단면의 중공비를 나타낸다. 여기서, D' 는 외부관의 외경, D_i 는 내부관의 외경, t_{ot} 는 외부관의 두께, t_i 는 내부관의 두께를 나타낸다.

Figs. 7~10은 설계된 GFRP DSCT 풍력타워 단면에 대한 축력-모멘트 상관도(P-M 상관도)를 나타내며, 요구성능인

축력 및 모멘트를 만족하는 단면을 확인 할 수 있다. 기존 강재타워 대비 100%의 외경을 갖는 경우, 중공비 91%~97%를 갖는 단면은 축강도는 만족하지만 모멘트 강도는 만족하지 못한 것으로 나타났으며, 중공비 70%~88%를 가진 단면은 모든 요구성능을 만족하였다. 기존 강재타워 대비 95% 및 90%의 외경을 갖는 경우, 각각 중공비 70%~82%, 70%~76%를 갖는 단면에서 모든 요구성능을 만족하였으며, 각 설계 케이스의 중공비가 감소할수록 축강도 및 모멘트 강도가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 기존 강재타워 대비 85%의 외경을 갖는 경우, 70%의 중공비를 갖는 1개의 단면만이 모든 요구성능을 만족하였다.

Table 5. Designed Section of FRP DSCT Wind Turbine Tower (3MW)

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6	Section 7	Section 8	Section 9	Section 10
Design Case for 3F100	3F100/97	3F100/94	3F100/91	3F100/88	3F100/85	3F100/82	3F100/79	3F100/76	3F100/73	3F100/70
D' (mm)	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
D_i (mm)	4,365	4,230	4,095	3,960	3,825	3,690	3,555	3,420	3,285	3,150
D_i/D'	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.7
t_{ot} (mm)	31	19.5	13	12	12	12	12	12	12	12
t_i (mm)	36.386	27.966	22.105	20.538	19.838	19.138	18.437	17.737	17.037	16.337
Design Case for 3F95	3F95/97	3F95/94	3F95/91	3F95/88	3F95/85	3F95/82	3F95/79	3F95/76	3F95/73	3F95/70
D' (mm)	4,275	4,275	4,275	4,275	4,275	4,275	4,275	4,275	4,275	4,275
D_i (mm)	4,146.75	4,018.5	3,890.25	3,762	3,633.75	3,505.5	3,377.25	3,249	3,120.75	2,992.5
D_i/D'	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.7
t_{ot} (mm)	36	24	17	13	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	12
t_i (mm)	38.412	30.240	24.638	20.835	18.928	18.26	17.592	16.924	16.256	15.923
Design Case for 3F90	3F90/97	3F90/94	3F90/91	3F90/88	3F90/85	3F90/82	3F90/79	3F90/76	3F90/73	3F90/70
D' (mm)	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050
D_i (mm)	3,928.5	3,807	3,685.5	3,564	3,442.5	3,321	3,199.5	3,078	2,956.5	2,835
D_i/D'	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.7
t_{ot} (mm)	40	30	22	17.5	15	13.5	13	13	13.5	14
t_i (mm)	42.680	32.907	27.281	23.529	21.041	19.257	18.205	17.514	17.143	16.740
Design Case for 3F85	3F85/97	3F85/94	3F85/91	3F85/88	3F85/85	3F85/82	3F85/79	3F85/76	3F85/73	3F85/70
D' (mm)	3,825	3,825	3,825	3,825	3,825	3,825	3,825	3,825	3,825	3,825
D_i (mm)	3,710.3	3,595.5	3,480.8	3,366	3,251.3	3,136.5	3,021.3	2,907	2,792.3	2,677.5
D_i/D'	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.7
t_{ot} (mm)	44.5	35.5	28.5	23	19.5	17.5	17	16.5	16.5	17.5
t_i (mm)	47.482	36.707	30.176	26.214	23.315	21.307	20.232	19.176	18.419	18.189

D' = Outer diameter, D_i = Inner diameter, t_{ot} = thickness of outer tube, t_i = thickness of inner tube

Fig. 7. P-M Interaction Curve of Designed DSCT Wind Power Tower (3F100)

Fig. 8. P-M Interaction Curve of Designed DSCT Wind Power Tower (3F95)

Fig. 9. P-M Interaction Curve of Designed DSCT Wind Power Tower (3F90)

Fig. 10. P-M Interaction Curve of Designed DSCT Wind Power Tower (3F85)

4. 대변위 효과를 고려한 풍력타워 거동 분석

풍하중 및 추력에 의한 횡력은 풍력타워에 작용하는 가장 지배적인 하중이지만, 연직하중으로 작용하는 나셀, 허브 및 로터의 중량 또한 타워에 큰 영향을 미치며, 이는 횡변위 발생시, 타워에 추가적인 모멘트를 발생시킨다. 따라서 큰 세장비를 가진 구조물은 터빈의 자중으로부터 발생하는 대변위 효과가 반드시 고려되어야 한다(Han et al., 2015). 본 연구에서는 자동 단면 설계 프로그램인 AutoDSCT에서 산출된 요구성능에 만족하는 16개의 단면에 대하여 추가 발생 모멘트에 대한 해석을 수행하였다.

KIOST (2014)가 개발한 기둥단면해석 프로그램인 CoWITA (KIOST, 2017)는 DSCT 기둥뿐만 아니라 ICH RC, RC 등의 합성 및 복합 기둥 단면 해석에 사용될 수 있다. 프로그램의 검증은 기존에 수행된 기둥의 실험 결과와 해석결과를 비교 하여 이루어졌으며, 한국선급으로부터 이에 대한 신뢰성이 인정되었다(Kim et al., 2020).

프로그램에서 필요한 제원 및 물성치를 입력하고 해석을 수행하게 되면, 축력-모멘트 상관도, 모멘트-곡률 및 축력-변위에 대한 그래프 등의 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트에 대한 재료비선형성 적용, 콘크리트 구속효과 및 대변위 효과를 고려하였으며, GFRP 내부 및 외부관 두께의 경우, 향후 제작 편의성을 고려하여 35 mm로 적용하였다.

Figs. 11~14는 해석 결과를 나타내며, 요구 모멘트(88,000 kN)를 만족하는 케이스를 확인 할 수 있다. 단면의 직경 4,500 mm인 타워는 대변위 효과 고려시, Table 5의 Section 5~10까지 요구 모멘트 이상의 성능을 발휘하였으며, 직경 4,275 mm의 타워는 Section 6~10까지 5개의 단면이 요구 성능을 만족하였다. 직경 4,050 mm의 단면은 Section 8~10, 직경 3,825 mm 단면은 Section 10이 요구성능을 각각 만족하는 것을 확인 할 수 있었다. 대부분의 경우, 요구 휨강도에 만족하는 것으로 나타났지만, 각 직경에 따라 중공비가 큰 설계 단면은 요구성능을 만족하지 못하는 것을 확인하였다.

Fig. 11. Moment-Curvature Curves with Diameter of 4,500 mm

Fig. 12. Moment-Curvature Curves with Diameter of 4,275 mm

Fig. 13. Moment-Curvature Curves with Diameter of 4,050 mm

Fig. 14. Moment-Curvature Curves with Diameter of 3,825 mm

5. DSCT 풍력타워 높이에 따른 단면설계

하부 및 상부의 직경이 동일한 풍력타워는 경제적이지 않으며, 과도한 설계로 이어질 수 있다. 또한, 타워 운송의 용이성 및 편리성을 위하여 제안된 타워를 Fig. 15와 같이 7개의 모듈로 나누어 설계하였으며, 각 모듈에 대한 단면설계를 수행하였다. 앞서 산출된 요구성능을 만족하는 최적의 단면(3F100/85, 3F95/82, 3F90/76, 3F80/70)을 가진 타워를 모듈화하여 각 단면에 대하여 대변위 효과를 고려한 결과와 고려하지 않은 결과를 비교하였다.

Figs. 16-17은 타워 높이에 따른 모멘트의 결과를 보여주며, 대변위 고려시에도 설계된 단면이 3 MW급 터빈에 대해 충분한 성능을 발휘하는 것을 확인하였다. Table 6은 각 타워의 모듈에 따른 단면의 직경과 모듈의 질량을 나타내며, Fig.

18은 직경 4,500 mm의 타워에 대한 모듈별 단면을 보여준다.

Fig. 15. Tower Modules

Fig. 16. Tower Height-bending Moment Curves without Large Displacement Effect

Fig. 17. Tower Height-bending Moment Curves with Large Displacement Effect

Table 6. Module Mass of Tower

			3F100/85			3F95/82			3F90/76			3F85/70		
Moduler No.		Section No.	D' (mm)	D_i (mm)	Total Mass (ton)	D' (mm)	D_i (mm)	Total Mass (ton)	D' (mm)	D_i (mm)	Total Mass (ton)	D' (mm)	D_i (mm)	Total Mass (ton)
module1	bottom	section1	4,500	3,825	55.2	4,275.0	3,505.5	58.7	4,050	3,078.0	43.0	4,800.0	3,936.0	72.2
	top	section2	4,450	3,782.5		4,237.5	3,474.8		4,025	3,059.0		4,727.3	3,876.4	
module2	bottom	section3	4,450	3,782.5	54.1	4,237.5	3,474.8	52.7	4,025	3,059.0	65.7	4,727.3	3,876.4	71.7
	top	section4	4,400	3,740		4,200.0	3,444.0		4,000	3,040.0		4,654.6	3,816.7	
module3	bottom	section5	4,400	3,740	155.3	4,200.0	3,444.0	167.4	4,000	3,040.0	192.5	4,654.6	3,816.7	212.4
	top	section6	4,250	3,612.5		4,087.5	3,351.8		3,925	2,983.0		4,480.0	3,673.6	
module4	bottom	section7	4,250	3,612.5	145.2	4,087.5	3,351.8	158.9	3,925	2,983.0	185.5	4,480.0	3,673.6	208.4
	top	section8	4,100	3,485		3,975.0	3,259.5		3,850	2,926.0		4,269.1	3,500.7	
module5	bottom	section9	4,100	3,485	144.1	3,975.0	3,259.5	160.3	3,850	2,926.0	190.3	4,269.1	3,500.7	217.8
	top	section10	3,940	3,349		3,855.0	3,161.1		3,770	2,865.2		4,050.9	3,321.8	
module6	bottom	section11	3,940	3,349	133.4	3,855.0	3,161.1	151.0	3,770	2,865.2	182.7	4,050.9	3,321.8	213.3
	top	section12	3,780	3,213		3,735.0	3,062.7		3,690	2,804.4		3,832.7	3,142.8	
module7	bottom	section13	3,780	3,213	137.9	3,735.0	3,062.7	159.2	3,690	2,804.4	196.6	3,832.7	3,142.8	234.6
	top	section14	3,600	3,060		3,600.0	2,952.0		3,600	2,736.0		3,600.0	2,952.0	
Total Mass					825.2			908.2			1,056.3			1,230.4

6. 결 론

본 연구에서는 3 MW급 풍력 터빈을 지지할 수 있는 GFRP DSCT 구조를 적용한 풍력타워의 단면을 설계하고 이에 대한 성능 평가를 수행하였다. P-M 상관도에서 기존 강재타워 대비 100%의 외경을 갖는 경우, 중공비 91%~97%를 갖는 단면은 축력에서 만족하지만 모멘트는 만족하지 못한 것으로 나타났으며, 중공비 70%~88%를 가진 단면은 축력 및 모멘트의 요구성능을 모두 만족하였다. 그 이외의 기존 강재타워 대비 95%, 90% 및 85%의 외경을 갖는 경우, 각각 중공비 70%~82%, 70%~76% 그리고 70%를 갖는 단면에서 모든 요구성능을 만족하였다. 각각 다른 외경을 가진 단면에 대하여 축강도 및 휨강도를 만족하는 최적의 단면을 산출하였다.

산출된 단면에 대하여 대변위 효과에 대한 영향 분석을 수행한 결과, 몇 개의 단면에서 휨 강도를 만족하지 못하였지만, 기존 강재타워와 동일한 직경의 단면은 중공비 85% 이하로 설계하는 경우 모든 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다. 나머지 단면의 외경(강재 타워 대비 95%, 90% 및 85%)의 경우, 각각의 중공비 82% 이하, 76% 이하 및 70%로 설계할 때에 하중조건을 만족하는 것으로 나타났다.

과다한 단면설계는 비경제적이며, 본 연구에서는 풍력 타워의 높이에 따라 단면의 직경을 변화시켜 3 MW급 터빈을 지지할 수 있는 최적의 단면을 제안하였다. 요구성능을 만족하는 가장 큰 중공비를 가진 경제적인 단면을 선택하고 대변위 효과를 고려하여 성능 평가를 수행한 결과, 모듈의 각 높이에서 휨강도를 만족하는 것으로

Fig. 18. Designed Sections for Outer Diameter of 4,500 mm

나타났다.

설계된 GFRP DSCT 구조는 기존의 강재 타워를 대신하여 풍력타워에 적용 가능한 것으로 나타났으며, 복합재료의 사용으로 부식에 대한 문제점을 보완 할 수 있을 것으로 보인다.

향후, 설계된 타워에 대한 공진해석 및 동적효과가 반영된 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST)의 “해양에너지 및 항만 해양구조물 실용화 기술개발(PE99831)” 및 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호 12기술혁신E09)으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Global Wind Energy Council (GWEC). (2019). *Global Wind Report 2019*.
- Han, T.H., Hong, H.M., and Lee, S.H. (2018). Experimental comparison for flexural behavior of concrete filled tubular and double-skinned composite tubular columns. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 233-241.
- Han, T.H., Kim, S.N., and Kang, Y.J. (2007). Evaluation of seismic performance for an internally confined hollow CFT column. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 19, No. 1, pp. 53-65.
- Han, T.H., Lee, S., Won, D., and Kim, J.J. (2016). Performance evaluation of joint connectors for modular DSCT wind turbine tower. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 5, pp. 209-220.
- Han, T.H., Park, Y.H., Won, D., and Lee, J.H. (2015). Design feasibility of double-skinned composite tubular wind turbine tower. *Wind and Structures*, Vol. 21, No. 6, pp. 727-753.
- Han, T.H., Stallings, J.M., and Kang, Y.J. (2010). Nonlinear concrete model for double-skinned composite tubular columns. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 24, No. 12, pp. 2542-2553.
- Han, T.H., Won, D., and Kim, S. (2013). Applicability of double-skinned composite tubular member for offshore wind turbine tower. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 55-65.
- Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2016a). Section design of DSCT tower supporting wind and tidal power turbines. *OCEANS 2016 MTS/IEEE*, Monterey, USA. doi:10.1109/OCEANS.2016.7761106
- Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2016b). Standard section design of FRP DSCT tower supporting 3MW wind turbine. *Proceedings of 3rd Australasia and South East Asia Conference in Structural Engineering and Construction (ASEA-SEC-3)*, Kuching, Malaysia. doi:10.14455/ISEC.res.2016.151
- Hong, H., Kim, S., Kim, J.J., and Han, T.H. (2019). Experimental study on the bending behavior of GFRP DSCT Beam. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 167-175.
- Hong, H., Kim, S., Yoon, G.L., Oh, M.H., and Han, T.H. (2018). Experimental bending strength evaluation of modular FRP DSCT column. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 323-332.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Renewable capacity highlights*.
- Kim, S., Han, T.H., and Hong, H. (2020). The nonlinear structural analysis program CoWiTA considering concrete confining effect. *The Magazine of the KSCE*, Vol. 68, No. 7, pp. 56-59.
- Korea Concrete Institute (KCI). (2012). *Structural concrete design code*. Seoul: KCI.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST). (2014). *AutoDSCT, Automatic designer for DSCT columns & wind towers Version 1.1*.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST). (2017). *CoWiTA manual Version 2.15*.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST). (2018). *Development of design technology for 10MW steel and 3MW composite wind towers*. Final Report, The Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) of the Korea Government.
- Ljij, L.B.J., and Gravesen, H. (2008). *Kriegers flak offshore wind farm - Design basis foundations*. Vattenfall Vindkraft AB.
- Mander, J.B., Priestly, M.J.N., and Park, R. (1984). *Seismic design of bridge piers*. Research Report No.84-2, Univ. of Canterbury, New Zealand, pp. 47-95.
- Shakir-Khalil, H., and Illouli, S. (1987). Composite columns of concentric steel tubes. *Proceedings of Conference on the Design and Construction of Non-Conventional Structures*, pp. 73-82.
- Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (1963). *Theory of elastic stability* (2nd ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- U.K. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. (2019). *Renewables account for record share of UK electricity in Q3 2019*. UK Energy Statistics, Q3 2019.

- World Wind Energy Association (WWEA). (2019). *Global wind installations - Total installed capacity*. Retrieved from <https://library.wwindea.org/global-statistics/>
- Yi, J.H., and Han, T.H. (2016). Reliability analysis on wind turbine tower structures with composite section. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 185-194.

<i>Received</i>	September 2, 2020
<i>Revised</i>	September 3, 2020
<i>Accepted</i>	September 18, 2020