이중관 충전콘크리트 구조의 해상풍력 타워 적용성 연구

Applicability of Double-Skinned Composite Tubular Member for Offshore Wind Turbine Tower

한택희* · 원덕희** · 김승준***

Han, Taek Hee · Won, Deokhee · Kim, Seungjun

Abstract

A double-skinned composite tubular(DSCT) offshore wind power tower was suggested and an automatic section design software was developed. The DSCT offshore wind tower has two types. One has steel tubes and the other has fiber reinforced polymer(FRP) tubes. The developed software adopted the nonlinear material model and the nonlinear column model which was proposed by Han *et al.*(2010, 2013). If an outer diameter, material properties and requested capacities are given for the DSCT wind power tower, the developed software performs axial force-bending moment interaction analyses for hundreds of sections of the tower and suggests ten optimized section designs. By using the developed software, example design processes were performed for a 5.0 MW turbine and a 3.6 MW turbine. The steel and FRP were considered as the material of inner and outer tubes. The designed section and analysis results showed that the developed suggested rational and satisfactory section designs. And they showed the possibility which a DSCT tower can be used as a offshore wind power tower.

Key words : Wind power, Tower, Design, Optimum, DSCT, Composite

요 지

강재 관과 섬유보강폴리머 관을 적용한 이중관 충전콘크리트 구조의 해상풍력 타워를 제안하고, 이의 자동설계 프로그램을 개발하였다. 자동설계 프로그램은 Han *et al.*(2010, 2013)이 제안한 DSCT 기둥의 재료비선형 모델과 비선형 기둥모델을 적용하여 작성하였으며, 외경과 요구성능인 축강도, 휨강도, 재료 물성치를 입력하면 자동으로 10개의 단면 설계안을 도출하고 각 설계안에 대한 축력-모멘트 상관관계 해석을 수행한다. 개발된 프로그램을 이용하여 기존의 강재 풍력타워 대비 직경이 감소된 DSCT 해상풍력 타워의 단면 설계를 수행하였다. 내 · 외부관으로 강재를 사용한 경우와 FRP를 사용한 경우, 3.6 MW 터빈과 5.0 MW 터빈, 그리고 강재타워와 동일 직경부터 강재타워의 40% 직경을 갖는 경우의 3가지에 대해 단면설계를 수행하였다. 도출된 설계안은 DSCT 구조가 해상풍력 타워로서 충분히 기능할 수 있다는 것을 보여주었으며, 기존 강재 타워에 비해 외경을 감소시켜 적용할 수 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 풍력발전, 타워, 설계, 최적, 이중관, 합성

1. 서 론

현재 전 세계적으로 화석연료의 고갈과 원자력에너지에 대한 불안감 등으로 인하여, 풍력, 조력, 조류, 지열, 태양광 등과 같은 신재생 에너지 개발을 위한 노력이 증가하고 있다. 신재생 에너지 중 발전효율이 높은 풍력에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 해상풍력발전의 발전단가가 작게 산정되어 충분한 경쟁력을 확보하고 있다고 판단되며, 향후

많은 해상풍력 발전 단지의 건설이 추진되고 있다. GWEC (Global Wind Energy Council) 자료에 따르면, 2012년까지 전 세계에 설치된 풍력발전기의 누적용량은 282,430 MW에 이르며, 1996년부터 2012년까지 16년간의 연평균 성장률은 27.7%, 2011년 한 해 동안의 성장률은 18.7%에 달하고 있다. 연간 설치용량은 2008년도에 26,721 MW에서 2009년에 38,708 MW로 44.8% 급성장하였으며, 이는 해상풍력발전의 성장에 기인한 것으로 판단된다(Sawyer, 2013).

*교신저자. 정회원. 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 선임연구원(Tel: +82-31-400-7735, Fax: +82-31-408-5823, E-mail: taekheehan@kiost.ac)
Corresponding Author. Member. Senior Research Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**정회원. 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 연수연구원

Member. Post Doctoral Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

***정회원. Texas A&M University 토목공학과 박사후 과정

Member. Postdoctoral Research Associate, Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University

Table 1. Top 10 EU Countries in Offshore Wind Power (Sawyer, 2013)

Country	No. of farms	No. of turbines	Capacity installed (MW)
UK	20	870	2,947.9
Denmark	12	416	921.0
Belgium	2	91	379.5
Germany	6	68	280.3
Netherlands	4	124	246.8
Sweden	6	75	163.7
Finland	2	9	26.3
Ireland	1	7	25.2
Norway	1	1	2.3
Portugal	1	1	2.0
Total	55	1,662	4,995

Table 2. Offshore Wind Farm Development Plan of Korea (Sung, 2012)

Plant	Capacity (MW)	Remark
Southwest Sea	2,500	Investigating wind condition
Jeonnam	4,000	Investigating wind condition
Sam-Mu	30	'12.7 (constructing)
Daejeong	200	Design process
Han-Lim	150	Investigating wind condition
Haengwon	60	Design process
Total	6,940	

해상풍력의 경우, 1980년대부터 풍력발전 단지개발이 집중적으로 이루어져 2008년 말 기준 전 세계적으로 122,158 MW 풍력 발전 설비가 보급되고, 여기서 25,413 TWh/year 이상의 전력이 생산되고 있으며, 2010년 기준 전 세계 해상풍력 설치 용량은 2,938 MW이다. 건설 중인 용량은 2,568 MW, 계획 승인된 용량은 23,593 MW, 준비 중인 용량은 23,593 MW에 이르고 있다. 해상풍력 발전 건설과 운영에 가장 앞서있는 유럽 국가 및 각국의 해상풍력 설치용량은 Table 1과 같으며, Table 2에서와 같이 우리나라에서도 서남해의 2.5 GW, 전남의 4 GW의 해상풍력단지 개발계획 등을 추진하고 있다 (Sung, 2012).

해상에서는 육상에 비교하여 동일 풍속 대비 낮은 고도에서 양질의 풍력을 얻을 수 있기 때문에, 해상풍력발전의 단지건설이 증가하고 있으며, 발전용량의 증대를 위해 발전 터빈, 블레이드 및 지지구조물의 크기가 대형화되는 추세이다. 하지만, 해상풍력의 대형화에 따라, 강제로 제작된 타워 구조물의 세장비 또한 크게 증가하며, Fig. 1과 같이 지지구조의 좌굴 파괴 위험성도 증가하고 있다. 따라서 이의 해결을 위한 경제적이고 안전한 고강도 신형식 지지구조의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 강재 풍력타워의 좌굴문제 해결과 모듈형 풍력타워 구조체의 개발을 위해 이중관 충전콘크리트(DSCT; Double-Skinned Concrete Filled Tube) 구조를 적용하고,

Fig. 1. Buckling Failure of Steel Tower

DSCT 풍력타워의 자동설계 프로그램을 개발하였다. 자동설계 프로그램은 에 기존의 연구자에 의해 제안된 비선형 재료 모델(Han *et al.*, 2010)과 비선형 기둥모델(Han *et al.*, 2013)을 적용하여 개발하였다. 개발된 자동설계 프로그램을 이용하여 기존의 강재풍력타워와 동일한 요구성능을 만족하는 DSCT 풍력타워에 대한 단면 설계와 성능 분석을 수행하였다.

2. DSCT 풍력 타워 자동 설계 프로그램

2.1 DSCT 기둥

DSCT 기둥은 Fig. 2와 같이 이중 관 구조 사이에 콘크리트를 충전하는 구조로서 1980년대 후반에 Shakir-Khalil과 Illouli(1987)에 의해 제시되었다.

이후, DSCT 기둥의 축강도에 대한 연구가 이루어져 왔으며(Wei *et al.*, 1995; Zhao & Grzebieta 2002; Tao *et al.*, 2004), DSCT 기둥의 축강도가 내부강관과 외부강관, 콘크리트 각각의 강도의 합보다 10~30% 정도 크다고 보고되었다(Wei *et al.*, 1995). 이후, 구형단면 DSCT 기둥의 축강도와 연성에 대한 연구도 수행되었으며(Zhao & Grzebieta 2002; Tao *et al.*, 2004), 최근에는 강도-중량 비와 내부식성이 우수한 섬유보강폴리머(FRP; Fiber Reinforced Polymer)관을 적용한 하이브리드 기둥에 대한 연구도 수행되었다(Teng *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2006). 구속효과를 고려한 DSCT 기둥의 비선형 재료모델과 휨거동에 대한 연구는 Han *et al.*(2010, 2013)에 의해 수행 되었으며, 그들은 DSCT 기둥의 파괴모드와 콘크리트의 재료모델을 제안하고(Han *et al.*, 2010), DSCT 기둥의 비선형 해석 모델을 제안하고 휨거동을 분석하였다(Han *et al.*, 2010).

본 연구에서는 Han *et al.*(2013)의 비선형 기둥 모델을 적용하고 FORTRAN을 이용하여, DSCT 타워의 자동설계 프로

Fig. 2. Cross Section of DSCT Column (Han *et al.*, 2010)

Fig. 3. Section Analysis Using Strain Compatibility and Layer-by-layer Approach (Han *et al.*, 2013)

Fig. 4. Curvature and Displacement Functions (Han *et al.*, 2013)

그림을 작성하여 DSCT 종력타워의 단면설계를 수행하였다. Han *et al.*(2013)은 DSCT 기둥에서 콘크리트의 구속효과를 고려한 비선형 해석 프로그램을 제시하였으며, Fig. 3과 같은 단면해석법을 이용하여 DSCT 기둥의 응력과 변형율의 관계를 정의하고 Fig. 4와 같은 방법으로 기둥의 곡률과 변위의 관계를 정의하였다.

Han *et al.*(2010)이 제안한 DSCT 부재에서, 콘크리트의 구속효과를 고려한 비선형 재료 모델에서는 Fig. 5와 같은 자유물체도를 이용하여 콘크리트에 작용하는 구속응력을 계산한다. 이 때, 내부관의 좌굴강도와 항복강도, 계산된 구속응력을 비교하여 내부관의 파괴 여부를 결정하며, 내부관과 외부관의 파괴 시점에 따라 3가지의 파괴 모드를 정의하였다.

Fig. 5. Confining Stress on Concrete in a DSCT Column (Han *et al.*, 2010)

내부관의 항복 파괴가 발생하지 않을 최소 두께(t_{iy})와 좌굴 파괴가 발생하지 않을 최소 두께(t_{ibk}) 중, 작은 값을 t_{lim} 라 정의하면 내측부관의 두께(t_i)에 의한 부재의 파괴 형태는 Eq. 1과 같이 표시된다.

$$t_i < t_{lim} : \text{파괴 형태 1} \quad (1a)$$

$$t_i > t_{lim} : \text{파괴 형태 2} \quad (1b)$$

$$t_i = t_{lim} : \text{파괴 형태 3} \quad (1c)$$

2.2 자동설계 프로그램

본 연구에서 개발한 자동설계 프로그램은 Fig. 6 같이 설계자가 원하는 원형 DSCT 타워의 외경, 각 재료의 물성치, 그리고 타워의 최소 요구성능을 입력하면, 자동으로 단면을 단계적으로 변화시켜 해석을 수행한다. 요구성능은 설계 축력과 설계 모멘트를 입력하며, 해석시에는 Han *et al.*(2013)의 해석모델을 이용하여 단면 변화에 따른 DSCT 타워의 Axial Load-Bending Moment(P-M) 상관관계 해석을 수행하고 최종적으로 요구성능을 만족하는 10개의 최적 단면 설계안을 제시한다.

프로그램에서 외부관은 국부좌굴이 발생하지 않도록 Eq. 2

Fig. 6. Design Process in Developed Program

(Timoshenko & Gere, 1963)와 Eq. 3(Korea Concrete Institute, 2012)를 모두 만족하도록 외부관의 최소 요구 두께를 계산하고 점진적으로 증가시킨다. Eq. 2와 Eq. 3에서 f_{cr} 은 연직하중에 대한 외부관의 좌굴강도, f_y 는 항복강도, t 는 외부관의 두께, D 는 외부관의 직경, E 는 외부관의 탄성계수, E_c 는 외부관의 접선탄성계수, ν 는 외부관의 Poisson's ratio이다.

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

$$t > (D+t)\sqrt{\frac{f_y}{8E}} \quad (3)$$

$$t_i > \frac{Df_y t}{Df_{iy}} \quad (4)$$

$$t_i > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 f_y t}{DE_i}} \quad (5)$$

프로그램에서 외부관의 두께 결정 후, 각 단계별로 중공비를 50%~95%까지 10단계에 걸쳐 변화 시키고, 각 중공비에 대해 Eq. 4와 Eq. 5를 동시에 만족하도록 내부관의 최소 두께를 계산하고(Han *et al.*, 2010), 내부관의 두께를 0.01 mm 간격으로 점진적으로 증가 시켜 계산을 수행한다. 여기서, t_i 는 내부관의 두께, D_i 는 내부관의 직경, E_i 는 내부관의 탄성계수이다. 각 단면에 대한 해석은 Fig. 6과 같은 순서에 의해 P-M 상관관계 해석을 수행하며, 최종적으로 요구조건을 충족하는 최적의 설계안 10개를 제시한다. 여기서 프로그램은 각 단계에서 가장 작은 단면적을 갖는 단면을 최적의 단면으로 판단한다. 따라서 설계자는 이중 설계자의 목적에 맞는 안을 선택하여 설계에 적용할 수 있다. Fig. 6에서 나타난 자동설계 프로그램의 5번째 단계인 타워의 거동 해석에서는 Han *et al.*(2013)의 해석 모델이 적용된다.

3. DSCT 풍력 타워 자동 설계

본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 Kriegers Flak Offshore

Fig. 7. Map of the western Baltic Sea south of Sweden and the site: Kriegers Flak II (Ljij & Gravesen, 2008)

Table 3. Reference Turbines (Ljij & Gravesen, 2008)

Turbine size	3.6 MW	5 MW
Output power	3.6 MW	5.0 MW
Rotor diameter	106 m	126 m
Foundation-tower interface level acc. MSL*	3.5 m	3.5 m
Hub height above foundation interface	72.5 m	82.5 m
Nacelle mass incl. Rotor	220 tons	410 tons
Tower top diameter/wall thickness	3.5 m/15 mm	4.5 m/20 mm
Tower bottom diameter/wall thickness	4.5 m/30 mm	6.0 m/35 mm
Tower mass	220 tons	300 tons

*MSL: Mean Sea Level

Wind Farm에 건설된 강제 해상풍력 타워 설계 자료(Ljij & Gravesen, 2008)를 참조하였으며, 기존의 강제 해상풍력 타워에 작용하는 설계 축력과 모멘트를 만족하는 동시에 외경이

Table 4. Turbine Loads (Ljij & Gravesen, 2008)

Turbine Design loads		Vertical load	Extreme loads		Operational loads		Fatigue loads $m=(4-5) N:1 \times 10^7$	
Tower bottom	Level		F_ex	M_ex	F_op	M_op	F_eq	M_eq
3.6 MW	15 m	4.40 MN	1.42 MN	89.90 MN-m	0.85 MN	54.0 MN-m	0.35 MN	19.20 MN-m
5.0 MW	15 m	7.10 MN	2.03 MN	150.00 MN-m	1.20 MN	90.0 MN-m	0.49 MN	28.10 MN-m

Fig. 8. Reference Co-ordinate System (Ljij & Gravesen, 2008)

감소된 DSCT 해상풍력 타워의 자동설계를 수행하였다. DSCT 해상풍력의 경우, 내·외부관으로 강재 관을 적용한 경우와 FRP 관을 적용한 경우의 두 가지에 대해 자동설계를 수행하였으며, 소성한지부는 Fig. 8과 같이 높이에 따라 일정한 단면을 갖는 것으로 가정하였다. 또한 기존의 강재 해상풍력타워는 현재 해상풍력 터빈의 주를 이루는 3 MW와 5 MW 용량의 터빈에 적용되는 설계 예제를 선택하여, DSCT 해상풍력 타워도 3 MW 터빈과 5 MW 터빈에 대응할 수 있도록 최소 요구성능을 각 용량의 터빈 설치 시에 작용하는 축력과 모멘트로 설정하였다.

Kriegers Flak Offshore Wind Farm에는 3.6 MW와 5.0 MW용량의 터빈이 설치되었으며, 규격과 제원은 Table 3과 같다. Table 3에 나타난 바와 같이, 풍력타워 하부의 직경과 두께는 3.6 MW일 때, 4.5 m와 30 mm이며, 5.0 MW일 때, 6.0 m와 35 mm이다. 설계시 터빈에 의해 풍력타워의 하부(bottom)에 작용하는 설계하중은 모든 외력을 고려한 결과로 나타난 합력이며, Table 4에 나타난 바와 같다. 본 연구에서는 DSCT 풍력타워 설계시 요구성능으로 축강도는 Table 4의 Vertical load를 적용하고, 휨강도는 Table 4의 Extreme loads시의 모멘트(M_{ex})를 적용하였다.

3.1 강재 관을 적용한 DSCT 풍력 타워 설계

강재 관을 적용한 DSCT 풍력 타워의 자동설계를 수행하였다. 자동설계시, 요구성능으로 축강도와 휨강도는 각각 3.6 MW 풍력타워에서 4.40 MN과 89.9 MN-m를 적용하였으

Table 5. Design Model of DSCT Tower with Steel Tubes

Turbine size	Diameter Ratio*	Diameter	Model
3.6MW Steel Tube DSCT Tower	0.7	3,150 mm	3S7
	0.5	2,250 mm	3S5
	0.4	1,800 mm	3S4
5.0MW Steel Tube DSCT Tower	0.7	4,200 mm	5S7
	0.5	3,000 mm	5S5
	0.4	2,400 mm	5S4

Diameter Ratio*: Diameter of DSCT Wind Tower / Diameter of Steel Tube Wind Tower

며, 5.0 MW 풍력타워에서 7.10 MN과 150.00 MN-m를 적용하였다. DSCT 풍력타워의 설계시에는 강재타워 대비 직경을 감소시켜 설계를 수행하였으며, 3.6 MW와 5.0 MW 풍력타워 모두에 대해 기존의 강재타워 직경 대비 70%, 50%, 40%의 직경을 갖는 DSCT 타워를 설계하였다. Table 5에 설계에 적용된 모델을 나타내었다. 모델번호에서 첫 번째 숫자는 풍력터빈의 용량, 두 번째 영문 S는 관의 재료인 steel, 마지막 숫자는 기존 강재타워 대비 직경을 의미한다. 자동설계시 콘크리트의 압축강도는 29.43 MPa를 적용하였으며, 내부관과 외부관의 항복강도는 250.00 MPa, 극한강도는 392.40 MPa를 적용하였다.

자동설계 프로그램에 의해 도출된, 강재 관을 적용한 3.6 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안을 Table 6에 나타내었다. 단면설계안 번호에서 첫 번째 숫자(701, 503, 405에서의 7, 5, 4)는 기존 강재타워 대비 직경비를 나타내며, 이후 숫자는 설계안 번호이다. 자동설계 프로그램의 해석 순서 상, 중공비 95%에서 시작하여 5%씩 감소시키므로, 설계안 번호가 증가함에 따라 DSCT 풍력타워의 중공비는 감소한다. 동일 외경, 동일 직경인 경우에는 내·외부관의 두께가 최소인 설계안을 제시하도록 하였다. 따라서 설계안 번호가 작을수록 풍력타워의 단면적이 더 작은 경우이므로, 일반적으로 더 경제적인 단면이라고 판단할 수 있다. 하지만 이 경우에는 설계안 중 가장 두꺼운 강재 관을 적용하게 되며, 설계안 번호가 높은 경우에는 중공비가 작아 콘크리트의 사용량이 증가하지만 사용 강재 관의 두께가 감소하며, 내부관의 경우에는 직경도 함께 감소하므로 강재 사용량이 절감된다. 따라서 설계자는 강재와 콘크리트의 사용량 및 가격을 고려하여 경제적인 설계 단면을 선택하여야 한다.

Figs. 9~11은 강재 관을 적용한 3.6 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안에 따른 P-M 상관도 해석(P-M interaction Curve) 결과를 보여준다. 각 P-M 상관도에서 보인 바와 같이, 모든 경우에 요구성능을 만족함을 알 수 있으며, 풍력

Table 6. Recommended Section Design for 3.6MW DSCT Wind Tower with Steel Tubes

Design Case for 3S7	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
Outer Diameter (mm)	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150
Diameter of Hollow Section(mm)	2,993	2,835	2,678	2,520	2,363	2,205	2,048	1,890	1,733	1,575
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	12.50	11.00	10.00	8.50	8.00	7.00	6.50	6.00	5.50	0.50
Thickness of Inner Tube (mm)	13.15	11.69	10.53	9.13	8.31	7.25	6.49	5.76	5.05	4.38
Design Case for 3S5	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
Outer Diameter (mm)	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250
Diameter of Hollow Section(mm)	2,138	2,025	1,913	1,800	1,688	1,575	1,463	1,350	1,238	1,125
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	26.00	26.00	25.50	25.00	25.00	24.50	24.50	24.50	24.00	24.00
Thickness of Inner Tube (mm)	27.17	25.74	23.84	22.00	20.63	18.87	17.52	16.17	14.52	13.20
Design Case for 3S4	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
Outer Diameter (mm)	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
Diameter of Hollow Section(mm)	1,710	1,620	1,530	1,440	1,350	1,260	1,170	1,080	990	900
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	41.00	42.00	42.50	43.00	44.00	44.50	45.00	45.50	46.00	46.50
Thickness of Inner Tube (mm)	42.85	41.58	39.74	37.84	36.30	34.27	32.18	30.03	27.83	25.58

Table 7. Recommended Section Design for 5.0MW DSCT Wind Tower with Steel Tubes

Design Case for 5S7	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
Outer Diameter (mm)	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200
Diameter of Hollow Section(mm)	3,990	3,780	3,570	3,360	3,150	2,940	2,730	2,520	2,310	2,100
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	10.00	8.50	7.00	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
Thickness of Inner Tube (mm)	13.58	11.87	10.17	8.48	7.95	7.42	6.89	6.36	5.83	5.30
Design Case for 5S5	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
Outer Diameter (mm)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Diameter of Hollow Section(mm)	2,850	2,700	2,550	2,400	2,250	2,100	1,950	1,800	1,650	1,500
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	24.00	23.50	22.50	22.00	21.00	20.50	20.00	19.50	19.00	19.00
Thickness of Inner Tube (mm)	25.08	23.27	21.04	19.36	17.33	15.79	14.30	12.87	11.50	10.45
Design Case for 5S4	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
Outer Diameter (mm)	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
Diameter of Hollow Section(mm)	2,280	2,160	2,040	1,920	1,800	1,680	1,560	1,440	1,320	1,200
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	38.50	38.50	38.50	39.00	39.00	39.00	39.00	39.50	39.50	39.50
Thickness of Inner Tube (mm)	40.23	38.12	36.00	34.32	32.18	30.03	27.89	26.07	23.90	21.73

타워 자체가 횡하중에 의해 지배되는 구조이므로, 설계안에 따른 풍력 타워의 축강도는 요구성능을 크게 상회하고 있음을 알 수 있다. 따라서 3.6 MW 터빈에 대해 강재 관을 적용한 DSCT 풍력의 경우, 기존의 강재타워 대비 40% 직경 만으로도 충분히 안정적인 거동을 기대할 수 있다고 판단된다.

자동설계 프로그램에 의해 도출된, 강재 관을 적용한 5.0 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안을 Table 7에 나타내었다. 이 경우에도 설계안 번호가 작을수록 풍력타워의 단면적이 더 작은 경우이며, 일반적으로 더 경제적인 단면이라고 판단할 수 있다. Figs. 12~14는 강재 관을 적용한

5.0 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안에 따른 P-M 상관도 해석(P-M interaction Curve) 결과를 보여주며, 이 경우에도 모든 경우에 요구성능을 만족함을 알 수 있으며, 풍력타워로서 충분히 적용 가능성이 있다고 판단할 수 있다.

3.2 FRP 관을 적용한 DSCT 풍력 타워 설계

FRP 관을 적용한 DSCT 풍력 타워의 자동설계를 수행하였으며, 요구성능으로 축강도와 휨강도는 3.6 MW 풍력타워에서 4.40 MN과 89.9 MN-m를 적용하였으며, 5.0 MW 풍력타워에서는 7.10 MN과 150.00 MN-m를 적용하였다. FRP 관을 적용한 DSCT 풍력타워의 설계시에는 강재타워 대비 동

Fig. 9. P-M Interaction Curves - Design Case for 3S7

Fig. 12. P-M Interaction Curves - Design Case for 5S7

Fig. 10. P-M Interaction Curves - Design Case for 3S5

Fig. 13. P-M Interaction Curves - Design Case for 5S5

Fig. 11. P-M Interaction Curves - Design Case for 3S4

Fig. 14. P-M Interaction Curves - Design Case for 5S4

일 직경을 갖는 경우와 직경을 감소시킨 경우에 대해 설계를 수행하였으며, 3.6 MW와 5.0 MW 풍력타워 모두에 대해 기존의 강재타워 직경 대비 100%, 70%, 50%의 직경을 갖는

FRP DSCT 타워를 설계하였다. Table 8에 설계에 적용된 모델을 나타내었으며, 모델번호에서 첫 번째 숫자는 풍력터빈의 용량, 두 번째 영문 F는 관의 재료인 FRP, 마지막 숫자

Table 8. Design Model of DSCT Tower with FRP Tubes

Turbine size	Diameter ratio*	Diameter	Model
3.6MW FRP Tube DSCT Tower	1.0	4,500mm	3F10
	0.7	3,150mm	3F7
	0.5	2,250mm	3F5
5.0MW FRP Tube DSCT Tower	1.0	6,000mm	5F10
	0.7	4,200mm	5F7
	0.5	3,000mm	5F5

Diameter Ratio*: Diameter of DSCT Wind Tower / Diameter of Steel Tube Wind Tower

는 기존 강재타워 대비 직경을 의미한다. 자동설계시 콘크리트의 압축강도는 26.49 MPa를 적용하였으며, 내부관과 외부관으로 사용된 FRP는 항복강도와 극한강도를 동일하게 56.56 MPa를 적용하였으며, 탄성계수는 8.20 GPa를 적용하였다.

자동설계 프로그램에 의해 도출된, FRP 관을 적용한 3.6 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안을 Table 9에 나타내었다. 이 경우에는 강재 관을 적용한 경우와 달리, 설정된 각 직경비에 대해 10개의 설계안을 모두 도출하지는 못하였다. 3F5 설계 모델에 대해서는 10개의 설계안을 도출하였으나, 3F10의 경우에는 2개의 설계안이, 3F7에 대해서는 6개의 설계안만이 제시되었다.

Figs. 15~17은 FRP 관을 적용한 3.6MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안에 따른 P-M 상관도 해석(P-M interaction Curve) 결과를 보여준다. 강재타워와 동일 직경인 3F10의 경우, 중공비가 95%인 경우와 90%인 경우에 설계안이 도출되었으나, 실제 해석 결과를 살펴보면 중공비 95%인 경우만이 요구성능을 만족한다. 또한, 외경이 기존 강관 직경의 70%인 3F7의 경우에는 중공비 95~70%까지 6개의 설계안이 제시되었으나, 중공비 50%인 경우는 요구 휨강도를 만족하지 못하

Fig. 15. P-M Interaction Curves - Design Case for 3F10

Fig. 16. P-M Interaction Curves - Design Case for 3F7

Table 9. Recommended Section Design for 3.6MW DSCT Wind Tower with FRP Tubes

Design Case for 3F10	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010
Outer Diameter (mm)	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Diameter of Hollow Section(mm)	4,275	4,050	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Hollow Ratio (%)	95%	90%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Outer Tube (mm)	12.50	8.50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Inner Tube (mm)	13.06	8.41	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Design Case for 3F7	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
Outer Diameter (mm)	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150
Diameter of Hollow Section(mm)	2,993	2,835	2,678	2,520	2,363	2,205	N/A	N/A	N/A	N/A
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Outer Tube (mm)	26.50	24.50	23.00	22.00	21.50	21.00	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Inner Tube (mm)	27.69	24.26	21.51	19.36	17.74	16.17	N/A	N/A	N/A	N/A
Design Case for 3F5	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
Outer Diameter (mm)	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250
Diameter of Hollow Section(mm)	2,138	2,025	1,913	1,800	1,688	1,575	1,463	1,350	1,238	1,125
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	51.00	50.50	50.50	50.50	51.00	51.50	52.00	53.00	53.50	54.00
Thickness of Inner Tube (mm)	53.30	50.00	47.22	44.44	42.08	39.66	37.18	34.98	32.37	29.70

Fig. 17. P-M Interaction Curves - Design Case for 3F5

여 실제로는 5개의 설계안이 도출된 것으로 판단하여야 한다. 강재 관을 사용한 DSCT 풍력타워와 달리, 이와 같이 FRP 관을 적용한 DSCT 풍력타워에서 안전한 설계안이 다양하게 도출되지 못한 것은 강재에 비해 FRP의 항복강도가 작고, 극한강도 또한 작게 설정되었기 때문인 것으로 판단된다. 외경이 기존 강관 직경의 50%인 3F5의 경우에는 모든 설계안이 요구성능을 만족시켰으며, 이 경우에는 3F10과 3F7과 비교하였을 때, FRP 관의 두께가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 3F10과 3F7에서 더 다양한 설계안을 확보하기 위해서는 초기에 외부 FRP 관의 두께를 증가시키거나 항복강도가 더 큰 FRP 관을 적용하여야 할 것이다. 이 경우에도 이론적으로는 강재 풍력타워에 비해 50%의 직경을 갖는 FRP DSCT 풍력타워의 적용이 가능함을 알 수 있다.

자동설계 프로그램에 의해 도출된, FRP 관을 적용한 5.0 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안을 Table 10에 나타

내었다. 이 경우에도, 3.6MW 터빈에 대한 설계안과 유사하게 5F5 설계 모델에 대해서는 10개의 설계안을 도출하였으나, 5F10의 경우에는 1개의 설계안이, 5F7에 대해서는 4개의 설계안만이 제시되었다.

Figs. 18~20은 FRP 관을 적용한 5.0 MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안에 따른 P-M 상관도 해석 결과를 보여준다. 강재타워와 동일 직경인 5F10의 경우, 중공비 95%인 경우에 대한 설계안이 도출되었으나, 실제 해석 결과를 살펴보면 요구 휨강도를 만족하지 못함을 알 수 있으며, 이 경우에는 만족하는 설계안이 도출되지 못하였다. 외경이 기존 강관 직경의 70%인 5F7의 경우에는 중공비 95~80%까지 4개의 설계안이 제시되었으나, 중공비 80%인 경우는 요구 휨강도를 만족하지 못하여 실제로는 3개의 설계안이 도출된 것으로 판단된다. 외경이 기존 강관 직경의 50%인 5F5의 경우에는 모든 설계안이 요구성능을 만족시켰으며, 이 경우에는 3.6 MW

Fig. 18. P-M Interaction Curves - Design Case for 5F10

Table 10. Recommended Section Design for 5.0MW DSCT Wind Tower with FRP Tubes

Design Case for 5F10	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010
Outer Diameter (mm)	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Diameter of Hollow Section(mm)	5,700	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Hollow Ratio (%)	95%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Outer Tube (mm)	7.50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Inner Tube (mm)	7.84	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Design Case for 5F7	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
Outer Diameter (mm)	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200
Diameter of Hollow Section(mm)	3,990	3,780	3,570	3,360	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Outer Tube (mm)	25.50	22.50	20.00	18.00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Thickness of Inner Tube (mm)	26.65	22.28	18.70	15.84	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Design Case for 5F5	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
Outer Diameter (mm)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Diameter of Hollow Section(mm)	2,850	2,700	2,550	2,400	2,250	2,100	1,950	1,800	1,650	1,500
Hollow Ratio (%)	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Thickness of Outer Tube (mm)	48.50	47.50	46.50	46.00	45.50	46.00	46.50	46.50	47.00	47.50
Thickness of Inner Tube (mm)	50.68	47.03	43.48	40.48	37.54	35.42	33.25	30.69	28.44	26.13

Fig. 19. P-M Interaction Curves - Design Case for 5F7

Fig. 20. P-M Interaction Curves - Design Case for 5F5

터빈에 대한 설계안과 마찬가지로 5F10과 5F7과 비교하였을 때, FRP 관의 두께가 크게 증가하였음을 알 수 있다. 이 경우에도 초기에 외부 FRP 관의 두께를 증가시키거나 항복강도가 더 큰 FRP 관을 적용한다면 5F10과 5F7에서 더 다양한 설계안을 도출할 수 있을 것이다. 5.0 MW 터빈에 대한 경우에도 이론적으로는 강재 풍력타워에 비해 50%의 직경을 갖는 FRP DSCT 풍력타워의 적용이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강재 관과 섬유보강폴리머 관을 적용한 이중관 충전콘크리트 구조의 해상풍력 타워를 제안하고, 이의 자동설계 프로그램을 개발하였다. 개발 프로그램은 콘크리트의 구속효과와 재료비선형을 고려하여 해석을 수행하고, 최적의 설계안을 제시한다. 자동 설계시 입력데이터는 DSCT 해상풍력 타워의 외경과 요구성능인 축강도, 휨강도, 그리고 재료 물성치이며, 이 입력 데이터를 바탕으로 자동적으로 외부관의 두께를 결정한 후, 내·외부관의 두께, 중공비 등을 변

화시켜 비선형 해석을 수행하고, 10개의 단면 설계안을 도출한다. 또한, 해석 결과를 바탕으로 각 설계안에 대한 축력-모멘트 상관관계도를 제시하여 설계자가 원하는 최적의 단면을 선택할 수 있도록 하였다.

개발된 프로그램을 이용하여 기존의 강재 풍력타워 대비 직경이 감소된 DSCT 해상풍력 타워의 단면 설계를 수행하였으며, 내·외부관으로 강재를 사용한 경우와 FRP를 사용한 경우, 3.6 MW 터빈과 5.0 MW 터빈, 그리고 강재타워와 동일 직경부터 강재타워의 40% 직경을 갖는 경우의 3가지, 총 12가지 조건에 대해 단면설계를 수행하였다.

도출된 설계안에 대해 P-M 상관도 해석을 수행한 결과, 내·외부관으로 강재를 사용한 경우 강재 튜브에 비해 외경을 30~60%까지 감소시킬 수 있었으며, 요구 모멘트를 모두 만족하였다. 축강도의 경우 요구 축력에 비해 1,200~2,000%의 값을 가져, 요구성능을 크게 상회하였으며 향후 축강도 부분에 대해 좀 더 경제적인 설계가 요구된다. 외부강관의 두께는 타워의 외경 및 중공비에 따라 변화하며, 기존 강재 타워의 두께인 30 mm(3.6 MW)와 35 mm(3.6 MW)에 비교하였을 때, 17~155%(3.6 MW), 16~113%(5.0 MW)로 다양한 범위에 분포하였다.

내·외부관으로 FRP를 사용한 경우 강재 튜브에 비해 외경을 50%까지 감소시킬 수 있었으며, 요구 모멘트를 모두 만족하였다. FRP관을 적용한 경우에도 요구 모멘트를 만족하고, 요구 축력 대비 1,500~2,000%의 축강도를 보여주었다. 외부 FRP관의 두께는 타워의 외경 및 중공비에 따라 변화하며, 기존 강재 타워의 두께인 30 mm(3.6 MW)와 35 mm(3.6 MW)에 비교하였을 때, 28~180%(3.6 MW), 21~136%(5.0 MW)로 다양한 범위에 분포하였다.

도출된 설계안과 해석 결과는 DSCT 구조가 해상풍력 타워로서 충분히 기능할 수 있다는 것을 보여주었으며, 기존 강재 타워에 비해 외경을 감소시켜 적용할 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 시행한 ‘기술혁신개발사업/미래선도과제(S2046946)’ 및 한국해양과학기술원(KIOST)의 창의 연구사업 중 기관역량강화사업인 “해상풍력 지지구조물 건설 기술 개발연구(PE99122)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Han, T.H., Stallings, J.M., and Kang, Y.J. (2010) Nonlinear Concrete Model for Double-Skinned Composite Tubular Columns, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 12, pp. 2542-2553.
- Han, T.H., Won, D.H., Kim, S., and Kang, Y.J. (2013) Performance of A DSCT Column Under Lateral Loading: Analysis, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 65, No. 2, pp. 121-135.
- Korea Concrete Institute. (2012) Concrete Structure Design Code, Seoul

- Lee, Y.G., Choi, J.W., Park, J.S., and Yoon, S.J. (2011) Compression Strength Test of FRP Reinforced Concrete Composite Pile, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structure*, Vol. 2, No. 4, pp. 19-27.
- Lijj, L.B.J. and Gravesen, H. (2008) *Kriegers Flak Offshore Wind Farm - Design Basis Foundations*, Vattenfall Vindkraft AB
- Sawyer, S. (2013) Global Wind Power Overview, *Wind Energy Asia*, 76-90.
- Shakir-Khalil, H. and Illouli, S. (1987) Composite Columns of Concentric Steel Tubes, *Proceeding of Conference on the Design and Construction of Non Conventional Structures*, 73-82.
- Sung, J.K. (2012) Current Status of Wind Power Industry and Offshore Wind Projects, *Korea-Europe Wind Plaza 2012*.
- Tao, Z., Han, L.H., and Zhao, X.L. (2004) Behavior of Concrete-Filled Double Skin (CHS Inner and CHS Outer) Steel Tubular Stub Columns and Beam Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, pp. 1129-1158.
- Teng, J.G., Yu, T., Wong, Y.L., and Dong, S.L. (2006) Hybrid FRP-Concrete-Steel Tubular Columns: Concept and Behavior, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 846-854.
- Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. (1963) *Theory of Elastic Stability*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C., and Mantrala, S.K. (1995) Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Analysis, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 12, pp. 1815-1821.
- Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C., and Mantrala, S.K. (1995) Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Experiment, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 12, pp. 1806-1814.
- Yu, T., Wong, Y.L., Teng, J.G., Dong, S.L., and Lam, E.S.S. (2006) Flexural Behavior of Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Members, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 10, No. 5, pp. 443-452.
- Zhao, X-L. and Grzebieta, R. (2002) Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS Inner and SHS Outer) Tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 40, pp. 199-213.

© Received March 5, 2013

© Revised March 7, 2013

© Accepted June 14, 2013