

콘크리트 충전 이중관 해상풍력 타워 자동 설계 프로그램

Automatic Design Tool for Double-Skinned Composite Tubular Wind Power Towers



한택희*



이진학*



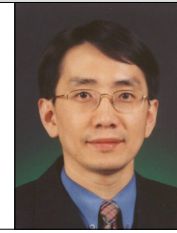
윤길림**



원덕희***



유상량***



이선호****

* 한국해양과학기술연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원
 ** 한국해양과학기술연구원 준설매립·이송기술연구단 단장, 책임연구원
 *** 한국해양과학기술연구원 연안개발·에너지연구부 연구원
 **** 도담이앤씨 종합건축사 사무소·구조부 전문

1. 서론

세계적으로 화석연료의 고갈과 원자력에너지에 대한 불안감 등으로 인하여 신재생 에너지 개발을 위한 노력이 증가하고 있다. 신재생 에너지 중 발전효율이 높은 풍력에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 많은 해상풍력 발전 단지의 건설이 추진되고 있다. GWEC(Global Wind Energy Council) 자료에 따르면, 2012년까지 전 세계에 설치된 풍력발전기의 누적용량은 282,430MW에 이르며, 1996년부터 2012년까지 16년간의 연평균 성장률은 27.7%, 2011년 한 해 동안의 성장률은 18.7%에 달하고 있다. 연간 설치 용량은 2008년도에 26,721MW에서 2009년에 38,708MW로 44.8%로 급성장하였으며, 이는 해상풍력발전의 성장에 기인한 것으로 판단된다(표 1; Sawyer, 2013).

해상풍력은 1980년대부터 풍력발전 단지개발이 집중적으로 이루어져 2008년 말 기준 전 세계적으로 122,158MW 풍력 발전 설비가 보급되고, 여기서 25,413TWh/year 이상의 전력이 생산되고 있으며, 2010년 기준 전 세계 해상풍력 설치 용량은 2,938MW이다. 건설 중인 용량은 2,568MW, 계획 승인된 용량은 23,593MW, 준비 중인 용량은 23,593MW에 이르고 있다. 해상풍력 발전 건설과 운영에 가장 앞서있는 유럽

국가 및 각국의 해상풍력 설치용량은 표 1과 같으며, 표 2에서와 같이 우리나라에서도 서남해의 2.5GW, 전남의 4GW의 해상풍력단지 개발계획 등을 추진하고 있다(Sung, 2012).

해상에서는 육상에 비교하여 동일 풍속 대비 낮은 고도에서 양질의 풍력을 얻을 수 있기 때문에 해상풍력발전 단지건설이 증가하고 있으며, 발전용량의 증대를 위해 발전

표 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 |

표 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 | |



그림 1 Buckling Failure of Steel Tower

터빈, 블레이드 및 지지구조물의 크기가 대형화되는 추세이다. 하지만, 해상풍력의 대형화에 따라 강재로 제작된 타워 구조물의 세장비 또한 크게 증가하며, 그림 1과 같이 지지구조의 좌굴 파괴 위험성도 증가하고 있다. 따라서 이의 해결을 위한 경제적이고 안전한 고강도 신형식 지지구조의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 강제 풍력타워의 좌굴문제 해결과 모듈형 풍력타워 구조체의 개발을 위해 콘크리트 충전 이중관 (DSCT; Double-Skinned Concrete Filled Tube) 구조를 적용하고, DSCT 풍력타워의 자동설계 프로그램인 Auto DSCT (한국해양과학기술원, 2014)를 개발하였다. 자동설계 프

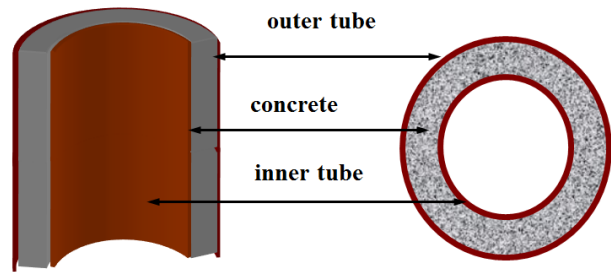


그림 2 Cross Section of DSCT Column (Han et al., 2010)

그림은 기존 연구자에서 제안된 비선형 재료 모델(Han et al., 2010)과 비선형 기동모델(Han et al., 2013)을 적용하여 개발하였다. 개발된 자동설계 프로그램을 이용하여 기존의 강제풍력타워와 동일한 요구 성능을 만족하는 DSCT 풍력 타워에 대한 단면 설계와 성능 분석을 수행하였다.

2. DSCT 풍력 타워 자동 설계 프로그램

2.1 DSCT 기둥

DSCT 기둥은 그림 2와 같이 이중관 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). 구속효과를 고려한 DSCT 기둥의 비선형 재료모델과 휨거동에 대한 연구는 Han et al. (2010, 2013)에 의해 수행되었으며, 그들은 DSCT 기둥의 파괴모드와 콘크리트의 재료모델을 제안하고(Han et al., 2010),

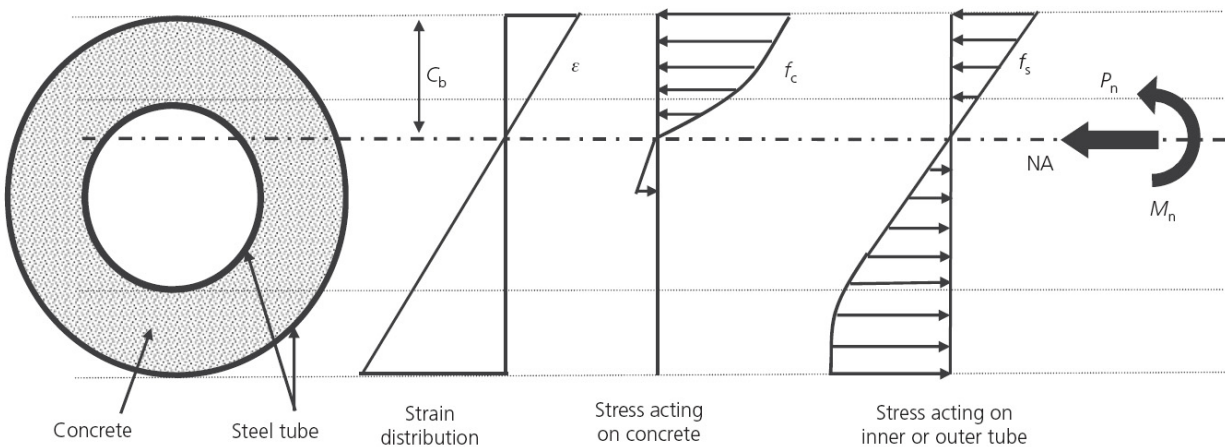


그림 3 Section analysis using strain compatibility and layer-by-layer approach (Han et al., 2013)

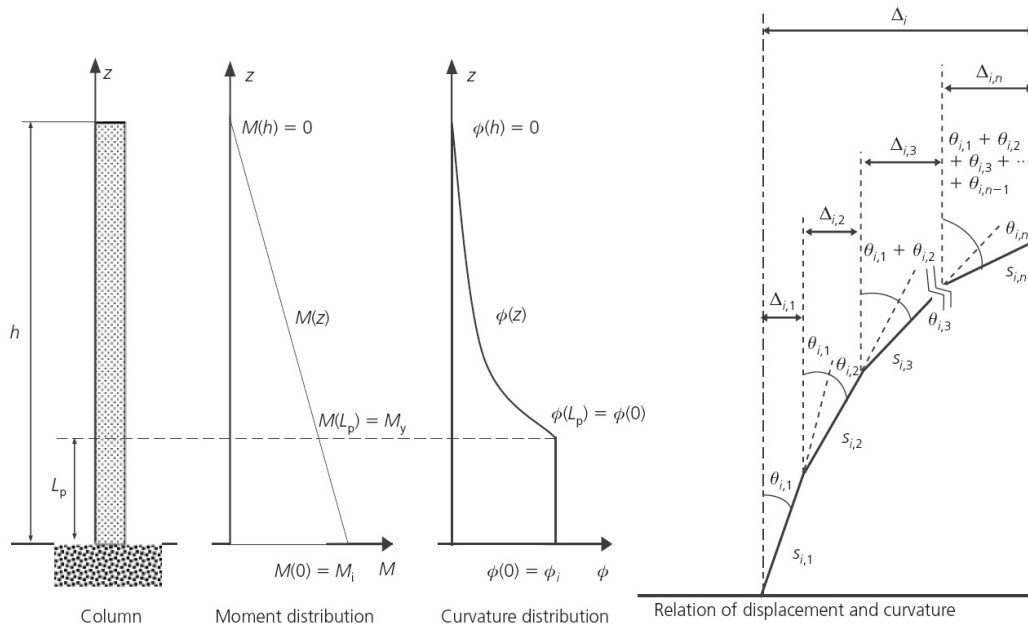


그림 4 Curvature and displacement functions (Han et al., 2013)

DSCT 기둥의 비선형 해석 모델을 제안하고 휨거동을 분석하였다(Han et al., 2013).

본 연구에서는 Han et al.(2013)의 비선형 기둥 모델을 적용하고 FORTRAN을 이용하여 DSCT 타워의 자동설계 프로그램인 Auto DSCT를 개발하여 DSCT 풍력타워의 단면 설계를 수행하였다. Han et al.(2013)은 DSCT 기둥에서 콘크리트의 구속효과를 고려한 비선형 해석프로그램을 제시하였으며, 그림 3과 같은 단면해석법을 이용하여 DSCT 기둥의 응력과 변형율의 관계를 정의하고 그림 4와 같은 방법으로 기둥의 곡률과 변위의 관계를 정의하였다.

$t_i < t_{lim}$: 파괴 형태 1 (1a)

$t_i > t_{lim}$: 파괴 형태 2 (1b)

$t_i = t_{lim}$: 파괴 형태 3 (1c)

Han et al.(2010)은 DSCT 부재 내 콘크리트의, 구속효과를 고려한 비선형 재료 모델을, 그림 5와 같은 자유물체도를

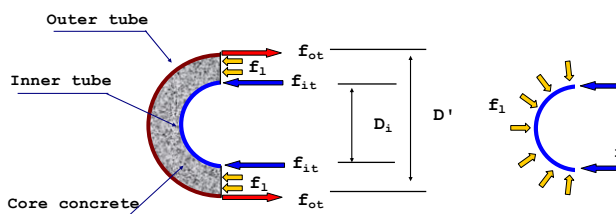


그림 5 Confining stress on concrete in a DSCT column (Han et al., 2010)

를 이용하여 콘크리트에 작용하는 구속응력을 계산하였다. 이 때, 내부관의 좌굴강도와 항복강도, 계산된 구속응력을 비교하여 내부관의 파괴 여부를 결정하며, 내부관과 외부관의 파괴 순서에 따라 3가지의 파괴 모드를 정의하였다. 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 내부관의 두께(t_i)에 따른 부재의 파괴 형태는 식 (1)과 같이 표시된다.

2.2 자동설계 프로그램

본 연구에서 개발한 자동설계 프로그램은 그림 6과 같이 설계자가 원하는 원형 DSCT 타워의 외경, 각 재료의 물성치, 그리고 타워의 최소 요구 성능을 입력하면, 자동으로 단면을 단계적으로 변화시켜 해석을 수행한다. 요구 성능은 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 요구 성능을 만족하는 10개의 최적 단면 설계안을 제시한다.

프로그램에서 외부관은 국부좌굴이 발생하지 않도록 식 (2)(Timoshenko & Gere, 1963)와 식 (3)(Korea Concrete Institute, 2012) 중 하나를 만족하도록 외부관의 최소 요구 두께를 계산하고 점진적으로 증가시킨다. 식 (2)와 식 (3)에서 f_{cr} 은 연직하중에 대한 외부관의 좌굴강도, f_y 는 항복강도, t 는 외부관의 두께, D 는 외부관의 직경, E 는 외부관의

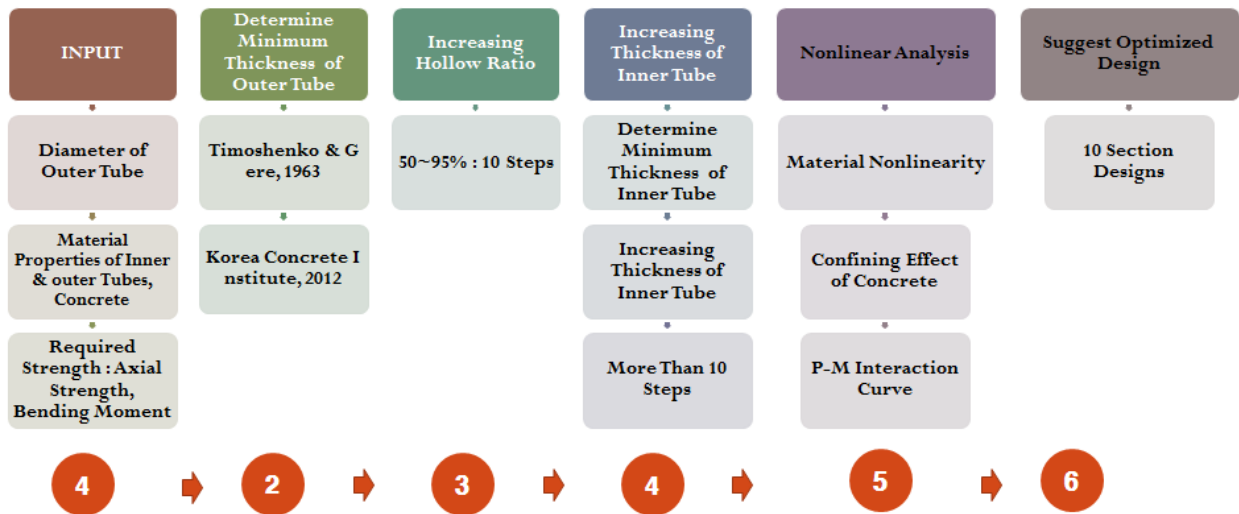


그림 6 Design Process in Developed Program

탄성계수, E_t 는 외부관의 접선탄성계수, ν 는 외부관의 Poisson's ratio이다.

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

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

$$t_i > \frac{D_i f_y t}{D f_{iy}} \quad (4)$$

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

프로그램에서 외부관의 두께 결정 후, 각 단계별로 중공비를 50%~95%까지 10단계에 걸쳐 변화시키고, 각 중공비에 대해 식 (4)와 식 (5)를 동시에 만족하도록 내부관의 최소 두께를 계산하고(Han et al., 2010), 내부관의 두께를 0.01mm 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 그림 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. 그림 6에서 나타난 자동설계 프로그램의 5번째 단계인 타워의 거동 해석에서는 Han et al. (2013)의 해석 모델이 적용된다. 그림 7은 개발된 프로그램의 입력화면이며, 그림 8은 결과를 보여주는 화면이다.

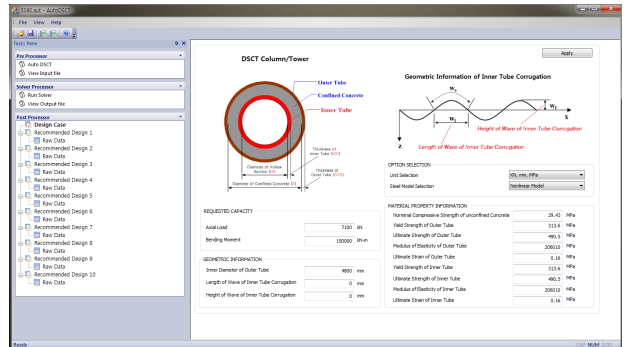


그림 7 Input Screen of Auto DSCT

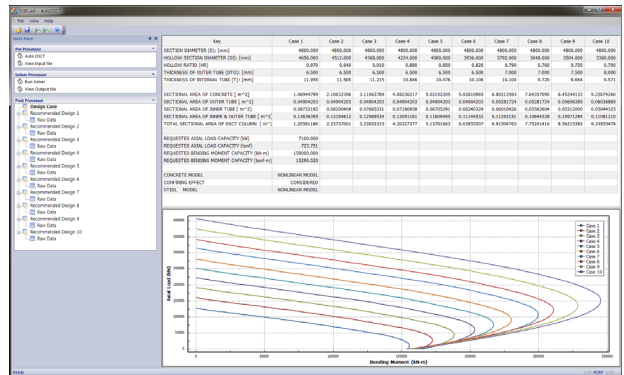


그림 8 Output Screen of Auto DSCT

3. DSCT 풍력 타워 자동 설계

3.1 하중 조건 및 적용 물성치

본 연구에서는 그림 9에 나타난 Kriegers Flak Offshore Wind Farm에 건설된 강제 해상풍력 타워 설계 자료(Ljjj &

Gravesen, 2008)를 참조하였으며, 기존의 강재 해상풍력 타워에 작용하는 설계 축력과 모멘트를 만족하는 동시에 외경이 감소된 DSCT 해상풍력 타워의 자동설계를 수행하였다.

DSCT 해상풍력의 경우, 내·외부 관으로 강재 관을 적용한 경우에 대해 자동설계를 수행하였으며, 소성힌지부는 그림 10과 같이 높이에 따라 일정한 단면을 갖는 것으로 가정하였다. 또한 기존의 강재 해상풍력 타워는 현재 해상풍력 터빈의 주를 이루는 3.6MW와 5.0MW 용량의 터빈에 적용되는 설계 예제를 선택하여, DSCT 해상풍력 타워도 3.6MW 터빈과 5.0MW 터빈에 대응할 수 있도록 최소 요구 성능을 각 용량의 터빈 설치시에 작용하는 축력과 모멘트로 설정하였다.

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

강재 관을 적용한 DSCT 풍력 타워의 자동설계를 수행하였다. 자동설계시, 요구 성능으로 축강도와 휨강도는 각각 3.6MW 풍력타워에서 4.40MN과 89.9MN-m를 적용하였으며, 5.0MW 풍력타워에서 7.10MN과 150.00MN-m를 적용하였다.

DSCT 풍력타워의 설계시에는 강재타워 대비 직경을 감소시켜 설계를 수행하였으며, 3.6MW와 5.0MW 풍력타워 모두에 대해 기존의 강재타워 직경 대비 70%, 50%, 40%의 직경을 갖는 DSCT 타워를 설계하였다. 표 5에 설계에 적용된 모델을 나타내었다. 모델번호에서 첫 번째 숫자는 풍력 터빈의 용량, 두 번째 영문 S는 관의 재료인 steel, 마지막 숫자는 기존 강재타워 대비 직경을 의미한다. 자동설계시 콘크리트의 압축강도는 29.43MPa를 적용하였으며, 내부관과 외부관은 항복강도는 250.00MPa, 극한강도는 392.40MPa인 강재를 적용하였다.

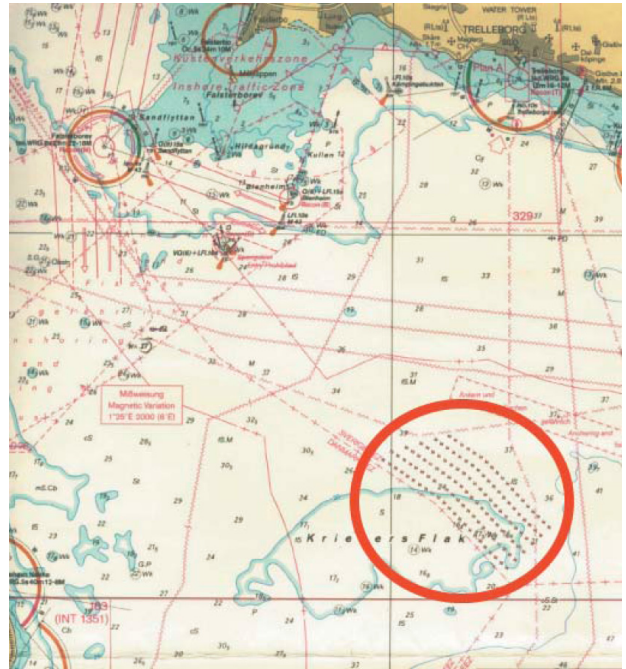


그림 9 Map of the western Baltic Sea south of Sweden and the site: Kriegers Flak II (Ljij & Gravesen, 2008)

표 3 Reference Turbines (Ljij & Gravesen, 2008)

| Turbine size | 3,6 MW | 5 MW |
|--|-----------|-----------|
| Output power | 3,6MW | 5,0MW |
| Rotor diameter | 106m | 126m |
| Foundation - tower interface level acc. MSL* | 3.5m | 3.5m |
| Hub height above foundation interface | 72.5m | 82.5m |
| Nacelle mass incl. Rotor | 220tons | 410 tons |
| Tower top diameter/wall thickness | 3.5m/15mm | 4.5m/20mm |
| Tower bottom diameter/wall thickness | 4.5m/30mm | 6.0m/35mm |
| Tower mass | 220tons | 300tons |

*MSL: Mean Sea Level

3.2 3.6MW 터빈 대응 DSCT 풍력 타워 설계

자동설계 프로그램에 의해 도출된, 강재 관을 적용한 3.6MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안을 표 6에 나타내었

표 4 Turbine Loads (Ljij & Gravesen, 2008)

| Turbine Design loads | | Vertical load | Extreme loads | | Operational loads | | Fatigue loads m=(4-5) N:1×10 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 |

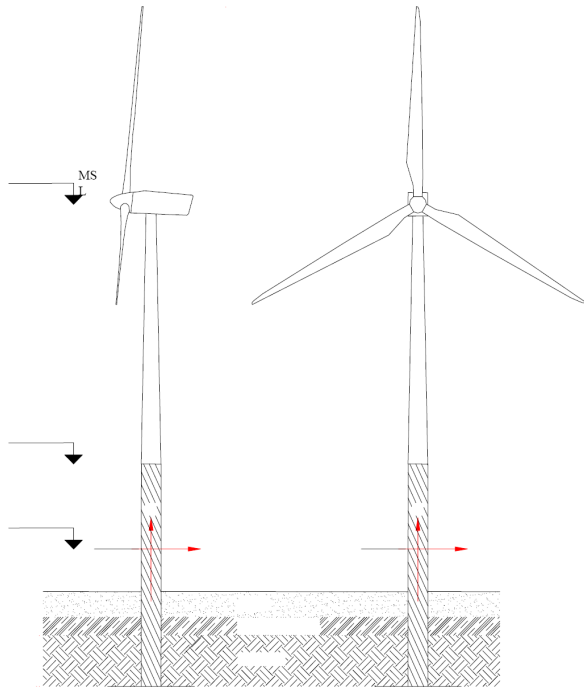


그림 10 Reference co-ordinate system (Lijj & Gravesen, 2008)

다. 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.

표 5 Design Model of DSCT Tower with Steel Tubes

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

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

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.

그림 11~13은 강재 관을 적용한 3.6MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안에 따른 P-M 상관도 해석(P-M interaction curve) 결과를 보여준다. 각 P-M 상관도에서 보인 바와 같이, 모든 경우에 요구 성능을 만족함을 알 수 있으며, 풍력

표 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 |

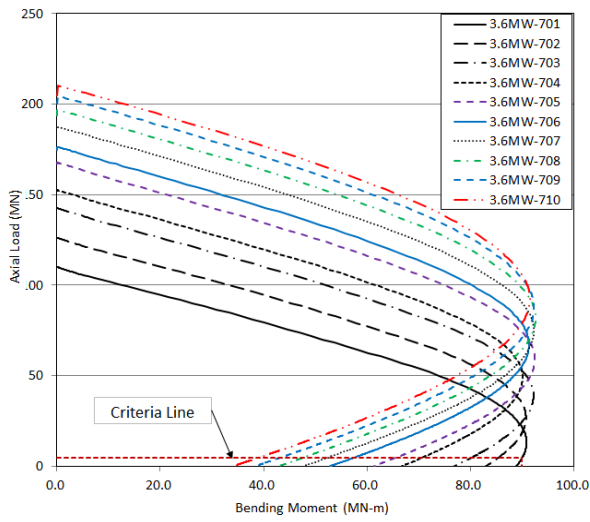


그림 11 P-M Interaction Curves - Design Case for 3S7

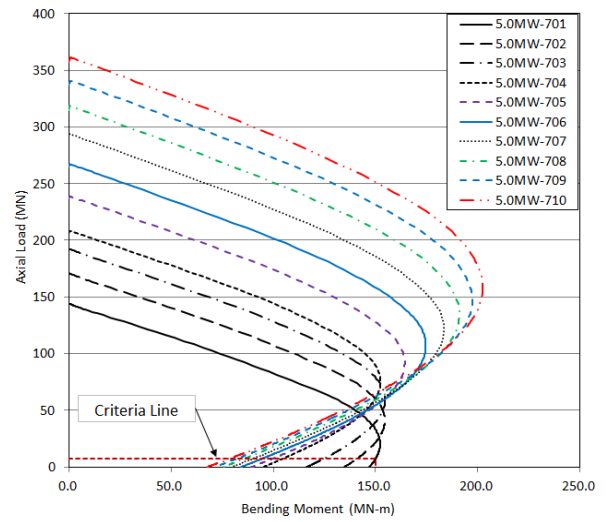


그림 14 P-M Interaction Curves - Design Case for 5S7

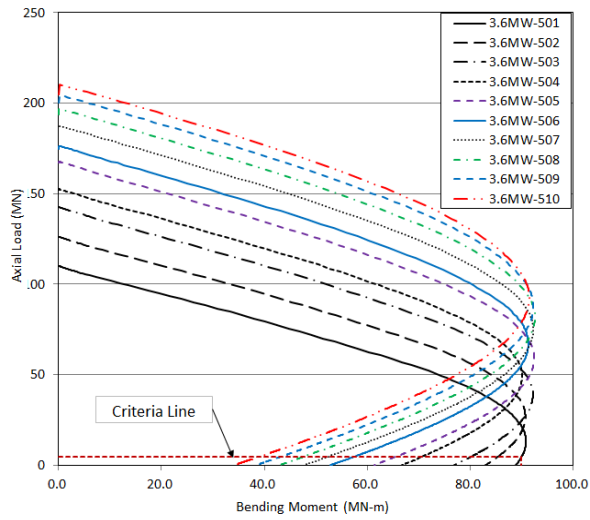


그림 12 P-M Interaction Curves - Design Case for 3S5

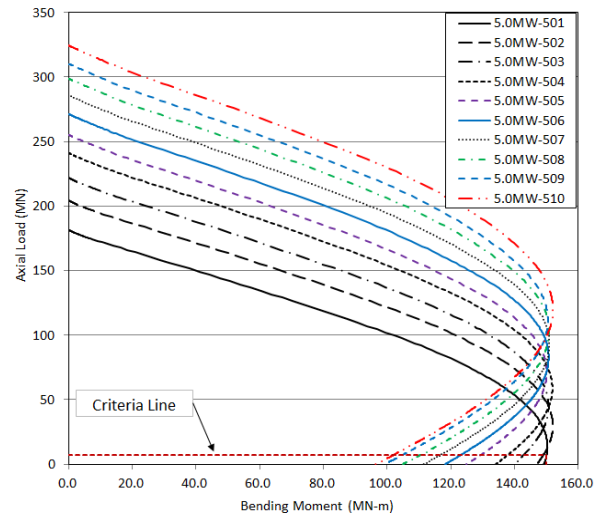


그림 15 P-M Interaction Curves - Design Case for 5S5

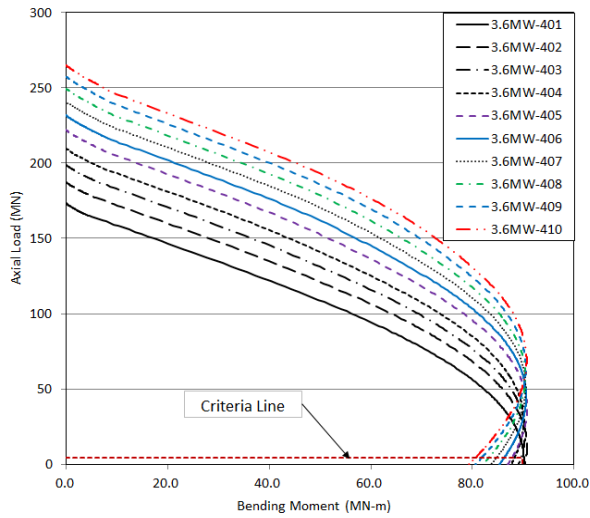


그림 13 P-M Interaction Curves - Design Case for 3S4

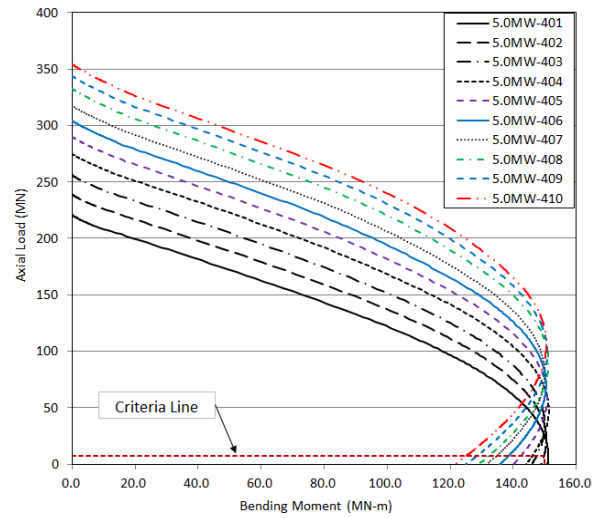


그림 16 P-M Interaction Curves - Design Case for 5S4

표 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 요구 성능을 크게 상회하고 있음을 알 수 있다.

3.3 5.0MW 터빈 대응 DSCT 풍력 타워 설계

자동설계 프로그램에 의해 도출된, 강재 관을 적용한 5.0MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안을 표 7에 나타내었다. 이 경우에도 설계안 번호가 작을수록 풍력타워의 단면적이 더 작은 경우이며, 일반적으로 더 경제적인 단면이라고 판단할 수 있다. 그림 14~16은 강재 관을 적용한 5.0MW DSCT 풍력타워의 단면 설계안에 따른 P-M 상관도 해석(P-M interaction curve) 결과를 보여주며, 이 경우에도 모든 경우에 요구 성능을 만족함을 알 수 있으며, 풍력타워로서 충분히 적용 가능성이 있다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강재 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 요구 성능인 축강도, 휨강도, 그리고 재료 물성치이며, 이 입력 데이터를 바탕으로 자동적으로 외부관의 두께를 결정한 후, 내·외부관의 두께, 중공비 등을 변화시켜 비선형 해석을 수행하고, 10개의 단면 설계안을 도출한다. 또한, 해석 결과를 바탕으로 각 설계안에 대한 축력-모

멘트 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, 3.6MW 터빈과 5.0MW 터빈, 그리고 강재타워와 동일 직경부터 강재타워의 40% 직경을 갖는 경우의 3가지, 총 6가지 조건에 대해 단면설계를 수행하였다.

도출된 설계안에 대해 P-M 상관도 해석을 수행한 결과, 강재 풍력타워에 비해 외경을 30~60%까지 감소시킬 수 있었으며, 요구 모멘트를 모두 만족하였다. 축강도의 경우 요구 축력에 비해 1,200~2,000%의 값을 가져, 요구 성능을 크게 상회하였으며 향후 축강도 부분에 대해 좀 더 경제적인 설계가 요구된다. 외부강관의 두께는 타워의 외경 및 중공비에 따라 변화하며, 기존 강재 타워의 두께인 30mm (3.6MW)와 35mm (5.0MW)에 비교하였을때, 17~155% (3.6MW), 16~113% (5.0MW)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 한국해양과학기술원의 창의연구사업(과제번호 PE99274)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Han, T. H., Stallings, J. M., and Kang, Y. J. (2010) Nonlinear Concrete Model for Double-Skinned Composite Tubular Columns, *Construction and Building Materials*, 24(12), 2542-2553.
2. 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*, 65(2), 121-135.
3. Korea Concrete Institute. (2012) Concrete Structure Design Code, Seoul
4. 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*, 2(4), 19-27.
5. Ljij L. B. J. and Gravesen, H. (2008). *Kriegers Flak Offshore Wind Farm - Design Basis Foundations*, Vattenfall Vindkraft AB
6. Sawyer, S. (2013). Global Wind Power Overview, *Wind Energy Asia*, 76-90.
7. 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.
8. Sung J. K. (2012) Current Status of Wind Power Industry and Offshore Wind Projects, *Korea-Europe Wind Plaza 2012*
9. 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*, 60, 1129-1158.
10. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M.. (1963) *Theory of Elastic Stability*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Singapore
11. 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*, 121(12), 1815-1821.
12. 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*, 121(12), 1806-1814.
13. Zhao, X-L. and Grzebieta, R. (2002) Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS Inner and SHS Outer) Tubes, *Thin-Walled Structures*, 40, 199-213. 