

### 3 MW급 풍력 발전 타워 플랜지 형상비가 구조적 안정성에 미치는 영향

김현오\* · 이연호\* · 허현도\*\* · 김윤제\*\*\*†

## Effect of Flange Shape on the Structural Stability of 3 MW Wind Turbine Tower

Hyun-Oh Kim\*, Yeon-Ho Lee\*, Hyun-Do Huh\*\*, Youn-Jea Kim\*\*\*†

*Key Words* : 1-way Fluid Structure Interaction Analysis(일방향 유체 구조 연성 해석), Tower Flange(타워 플랜지), Von Mises Stress(폰 미세스 응력), Wind Tower(풍력 타워),

#### ABSTRACT

As the interest of the development of new renewable energy has picked up, demand for energy production of wind power generation is increasing. In order to increase the power generation of the wind turbine, the size of the wind tower is required to be enlarged as the size of the blades gets larger. However, the enlargement of the wind turbine sometimes causes breakdown due to the increase of its own weight and wind load. Therefore, it is necessary to develop techniques to design and manufacture components that can achieve structural stability of wind turbines. In this study, numerical analysis of stress applied to wind tower and tower flange was performed to secure the optimal design data base. The optimal design study of the shape and parametric investigation of the tower with varying wind speeds was carried out by using the fluid-structure interaction (FSI) analysis. Numerical analysis of the von Mises stress of the tower and flange was calculated using the commercial code ANSYS 17.1. The results were described graphically and the tower flange case with the highest structural stability was deducted.

#### 1. 서 론

신재생 에너지 발전 기술 중 하나인 풍력 발전 기술은 풍력 터빈을 이용하여 바람을 전력으로 바꾸는 기술로 유럽이 시장을 선도하는 가운데 미국과 아시아 시장이 급속도로 팽창하고 있다. 최근 풍력 발전 효율 향상을 위해 타워의 대형화가 요구되는 가운데 이와 함께 동반되는 구조적인 안정성이 중요한 문제로 대두되고 있다. 풍력 발전기의 대형화는 그 자체의 하중 증가뿐만 아니라 풍하중에 구조적으로 취약하다는 문제가 있어 이를 극복할 수 있는 요소 부품 설계 및 제작기술의 확보가 요구된다. 특히 발전기의 타워 플랜지(tower flange)는 타워 사이를 연결하는 지지 설계 요소로

타워의 구조적 안정성 확보에 중추적인 역할을 함으로 심층적인 연구가 이루어져야한다. 풍력 터빈의 구조적 안정성과 관련한 연구로 Park 등<sup>(1)</sup>은 수치해석을 통해 풍압이 가해지는 풍력타워에서 복합재료 재질이 갖는 섬유 보강 각도에 따른 구조적 최적화 연구를 수행하였다. Joung 등<sup>(2)</sup>은 풍동실험을 통해 풍력타워의 다양한 단면 형상에 대한 풍력계수를 산정하여 각각의 특성을 비교하였으며 CFD 해석을 수행하여 산정된 풍력계수 값의 신뢰성을 확보하였다. Lavassas 등<sup>(3)</sup>은 중력, 지진하중, 풍하중에 대한 피로 분석 및 지진 분석을 실시하여 1 MW 급 풍력터빈을 설계하였다. Yoo 등<sup>(4)</sup>은 풍력 터빈의 타워 플랜지 소재에 대한 고온 압축시험을 수행하였다. 또한 잉고트(ingot) 파쇄공정에 앞서 변형공정 지도를

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

\*\* (주) 스틸코리아(STEEL KOREA CO., LTD)

\*\*\* 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

Table 1 Reference model configuration of wind tower and flange

Height of wind tower	100 m
Diameter of turbine blade	102 m
Outer diameter of flange	6 m
Inner diameter of flange	5.382 m
Outer height of flange (h)	0.203 m
Inner height of flange (h <sub>o</sub> )	0.152 m

토대로 최적공정 설계 조건을 도출하였고 유한요소해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 플랜지 소재에 대한 잉고트 파쇄 공정을 통해 공정설계의 신뢰성을 입증하였다. Choi 등<sup>(5)</sup>은 80 m 높이의 5 MW 급 풍력터빈의 타워를 모델링하여 풍하중과 지진하중의 영향을 동시에 고려하여 구조진동에 대한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 지진에 의한 기반가진 효과가 발생할 경우 타워에 추가적인 풍하중이 가해질 때 타워의 하단부에 유발되는 응력이 상승할 수 있다는 결과를 도출하였다. Jiang 등<sup>(6)</sup>은 풍력터빈 타워와 하부 플랜지 사이 용접부 형상에 따른 잔류응력을 측정하여 타워 구조에 대한 최적화 연구를 수행하였다. Bazeos 등<sup>(7)</sup>은 38m, 450 KW 급 풍력 터빈에 대한 지진분석, 정적분석, 좌굴분석 등과 같은 동역학적 분석을 통해 타워 높이에 따라 가해지는 응력을 계산하여 구조적 안정성을 평가하였다.

본 논문에서는 SM35C로 설계된 풍력 터빈을 일방향 유체-구조 연성해석(one-way fluid-structure analysis)기법을 이용하여 구조적 안정성을 평가하였다. 수치해석 과정에서 풍속에 따른 풍하중 및 블레이드 동하중을 고려하였으며, 플랜지 형상에 따른 타워의 구조적 안정성을 평가하기 위해 von Mises 등가응력(equivalent stress)을 산출하였다. 해석 결과를 토대로 안정적인 구조적 특성을 갖는 플랜지 형상을 도출하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 해석 모델

Fig. 1은 풍력 터빈의 타워와 이를 지지하는 설계 요소인 타워 플랜지의 수치해석 모델을 도시한 것이다. 타워 높이는 100 m로 설정하였으며, 타워 플랜지의 기본 형상 치수는 Table 1에 나타내었다. 타워 플랜지의 기본형상은 외경 6 m, 내경 5.382 m, 플랜지 외경 높이(h) 0.203 m, 플랜지 내경 높이(h<sub>o</sub>)를 0.152 m로 설정하였다. 유동해석을 위한 전체 영역을 Fig. 2에 도시하였고 경계면의 영향을 최소화하기 위하여 블레이드 직경(D<sub>b</sub>=102 m)를 기준으로 가로, 세로, 높이를 각각 1.5 D<sub>b</sub>, 6 D<sub>b</sub>, 3 D<sub>b</sub>로 설정하였다<sup>(8)</sup>. 타워 플랜지는 타워 섹션을 지지하고 풍하중에 의한 인장 및 압축 하중을 견뎌야 하므로 강성 재질인 SM35C를 선정하였다. 타워 섹션 또한

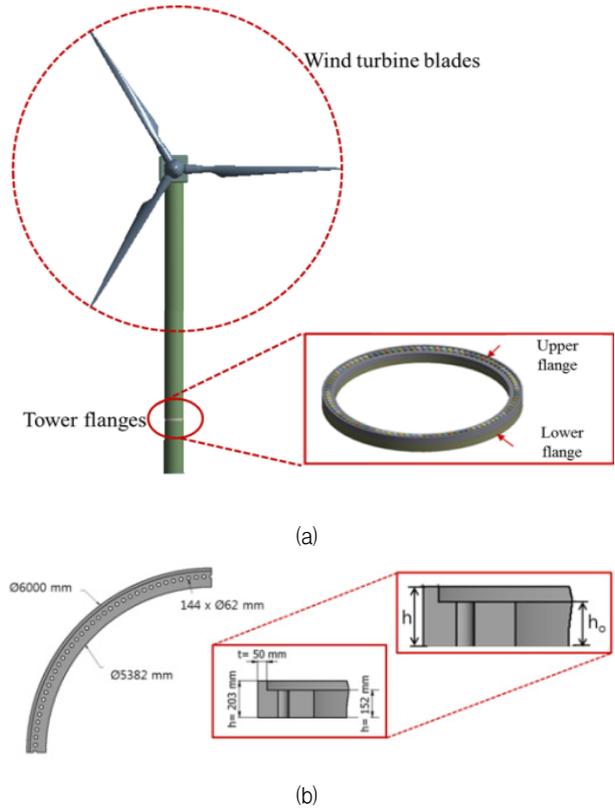


Fig. 1 Model description of wind turbine and tower flange

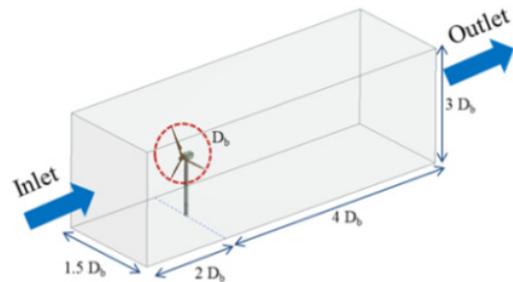


Fig. 2 Flow domain of the wind turbine

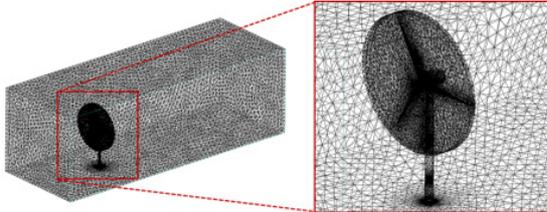
플랜지와 용접을 통해 연결됨을 고려하여 동일한 재질을 선정하였다. 터빈 블레이드는 밀도가 작고 인장강도가 높은 합성 섬유 재질인 carbon-epoxy를 선정하였으며 물성치를 Table 2에 나타내었다. Fig. 1의 기본형상을 토대로 풍력터빈을 유체-구조 연성해석 기법을 이용하여 von Mises 등가응력 산출을 통해 구조적 안정성을 평가하였다.

### 2.2 격자계 구성

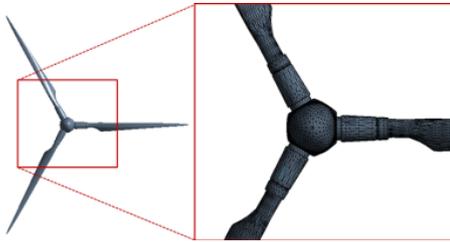
Fig. 3은 ANSYS 17.1을 이용하여 생성한 타워 및 플랜지의 격자계를 도시한 것이다. (a)는 유동 영역의 격자계를 도시한 것으로 주로 사면체 격자계로 구성하였다. 구조해석 시 (b)에 도시한 블레이드에는 육면체 격자계를 적용하였다. (c)에 도시한 타워 플랜지는 사면체 격자계를 적용하여 풍하중

Table 2 Material properties

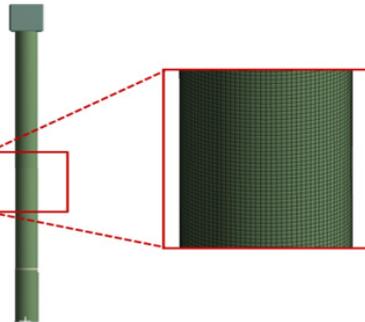
Material	SM35C	Carbon-epoxy
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7850	1580
Tensile strength (MPa)	620	5360
Poisson's ratio	0.29	0.472
Elastic modulus (GPa)	205	138



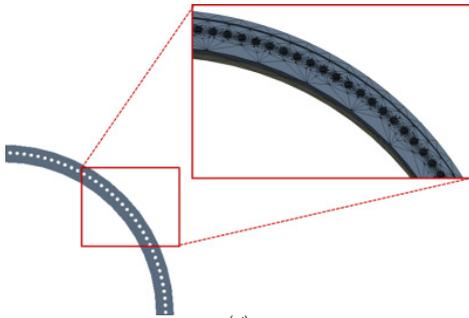
(a)



(b)



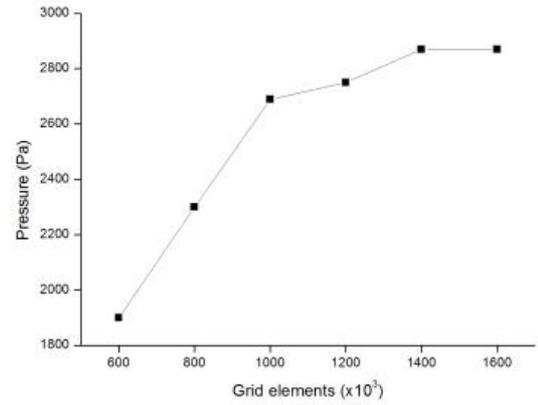
(c)



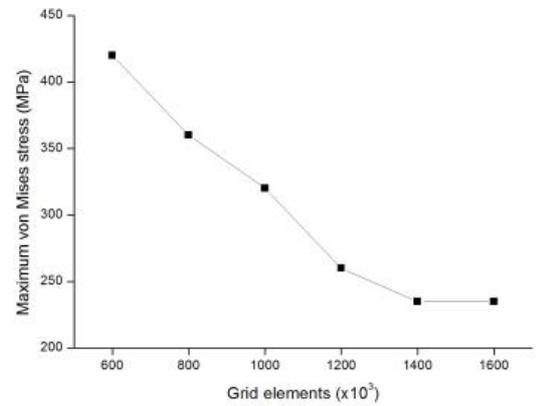
(d)

Fig. 3 Grid systems of (a) flow domain (b) turbine blade (c) tower section (d) tower flange

에 의해 적용되는 정밀한 수렴값을 계산하고자 하였다. 플랜지의 홀 부분은 patch independent 조건을 주어 격자 구성을 조밀하게 하였다. Fig. 4의 격자 의존성 시험을 통해 유동영역 1,400,000개, 풍력 터빈 약 1,400,000개 이상의 격



(a)



(b)

Fig. 4 Grid dependency test of (a) fluid analysis of the blades (b) structural analysis of the upper tower flange

자수에서 일정한 풍압 및 von Mises 응력이 도출되는 것을 확인하였다.

### 3. 일방향 유체-구조 연성해석

풍속 영향으로 풍력타워의 풍압 면적에 작용하는 압력을 산출하기 위한 지배방정식으로 연속방정식과 운동량 방정식을 적용하였다<sup>(9)</sup>.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (2)$$

Table 3은 유동해석에 필요한 경계조건을 나타낸다. 작동 유체로 공기를 적용하였고, 유동 영역 입구에 5 m/s의 균일한 풍속을 적용하였다. 또한 블레이드 1분 당 회전 수(RPM)에 따른 동적 하중을 산출하여 구조해석과 연계하였다. 풍압에 따른 풍하중은 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(10)</sup>

Table 3 Boundary conditions applied in this study

Working fluid	Air
Wind inlet (m/s)	5
Wind outlet (Pa)	0
Blade rotational speed (RPM)	10, 15
Turbulence model	Shear stress transport

$$W = qCA \tag{3}$$

$$q = \frac{V^2}{30} \sqrt{h} \tag{4}$$

위 식에서  $W$ 는 풍하중을 나타내며, 속도압  $q$ , 풍력계수  $C$ , 압력을 받는 면적  $A$ 를 통해 계산 값을 산출할 수 있다. 또한 속도압  $q$ 는 풍속  $V$ 와 바람을 받는 면의 지상으로부터의 높이  $h$ 를 통해 계산할 수 있다. 난류모델은 SST(Shear stress transport) 난류모델을 적용하였다. SST모델은 벽면 근처 유동을 정밀하게 예측할 수 있는  $k-\omega$  난류 모델과 일반 대류 해석을 위한  $k-\epsilon$  난류 모델의 장점을 가지고 있어 터빈 블레이드 회전에 의한 풍압을 산출하기에 유용하다. 유동해석은 최대 순간 풍속 및 블레이드 회전의 영향을 반영하기 위해서 정상상태(steady-state)로 수행되었다.

서술한 경계조건을 반영하여 산출된 풍력터빈의 풍압분포를 Fig. 4에 도시하였다. 터빈 블레이드의 경우 블레이드 팁 끝단에서, 풍력 타워의 경우 블레이드를 지지하는 나셀(nacelle)에서 풍압이 높게 분포하였다. 5 m/s의 풍속조건에서 블레이드 회전 수 10 RPM, 15 RPM 각각의 경우, 풍력터빈에 작용하는 최대 풍압을 Table 4에 나타내었다. 각 블레이드 회전 속도 조건에서 터빈 블레이드에 작용하는 최대 풍압이 풍력타워에 작용하는 최대 풍압보다 높게 산출되었는데, 블레이드 속도 10RPM과 비교 시 15 RPM일 때, 풍력터빈의 최대 풍압이 약 4.7배 정도 증가하였다.

#### 4. 구조적 안정성 평가

조합응력 상태의 비틀림 에너지가 단순 인장시험의 뒤틀림 에너지와 동일할 때, 항복이 발생하는 것으로 간주하였다. Von Mises 응력은 변형률 에너지 가설에 기초한 계산식으로, 일반적으로 von Mises 응력이 재료의 항복응력에 도달할 때 파단이 일어나는 것으로 판단되는데 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \tag{5}$$

$$\sigma_{vm} \leq \sigma_{yield} \tag{6}$$

Table 4 Imported pressure applied to wind turbine

Blade Rotation speed (RPM)	Maximum Pressure (Pa)	
	10	Wind blade
	Wind tower	2682
15	Wind blade	13610
	Wind tower	11711

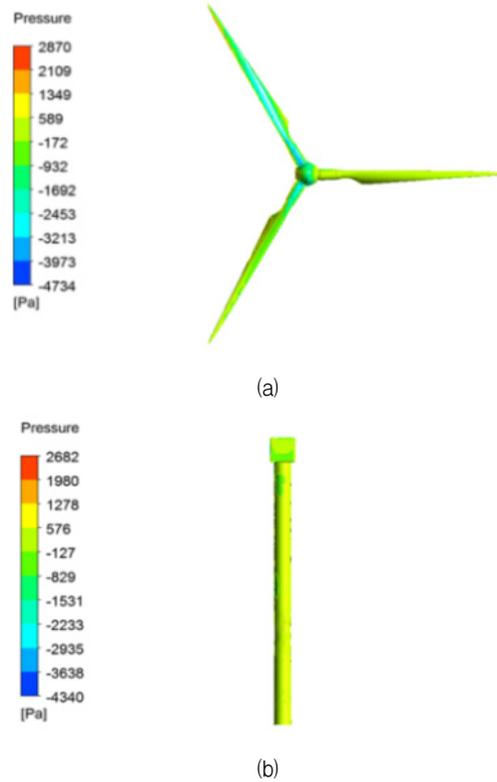


Fig. 4 Imported pressure applied to wind tower at blade rotation speed of 10 RPM

여기서  $\sigma_{vm}$ 은 von Mises 응력을 나타내며 3축의 주응력  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 을 통해 계산 값을 산출할 수 있다. 풍력타워 및 플랜지에 대한 구조 응력해석을 수행하기 위해 중력조건을 적용하였으며, 풍압이 작용하는 풍력터빈의 외부 면적에 fluid-solid surface를 적용하여 유동해석을 통해 산출된 풍압을 적용하였다.

구조해석 결과, 터빈 전후반부 von Mises 응력 분포를 통하여 응력이 집중되는 부위를 확인하였고, 이를 Fig. 5에 도시하였다. 터빈 전반부(frontward)에는 응력이 낮게 분포하였으나, 풍압으로 인한 압축력 및 인장력이 작용하는 후반부(backward)에 응력이 높게 분포하였으며, 특히 타워 섹션간 이음쇠 역할을 하는 플랜지를 경계로 응력이 집중되는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 플랜지의 외경 높이 ( $h$ )와 내경높이( $h_o$ )의 형상비( $h_o/h$ )를 변수로 case study를 수행하였으며 이를

3 MW급 풍력 발전 타워 플랜지 형상비가 구조적 안정성에 미치는 영향

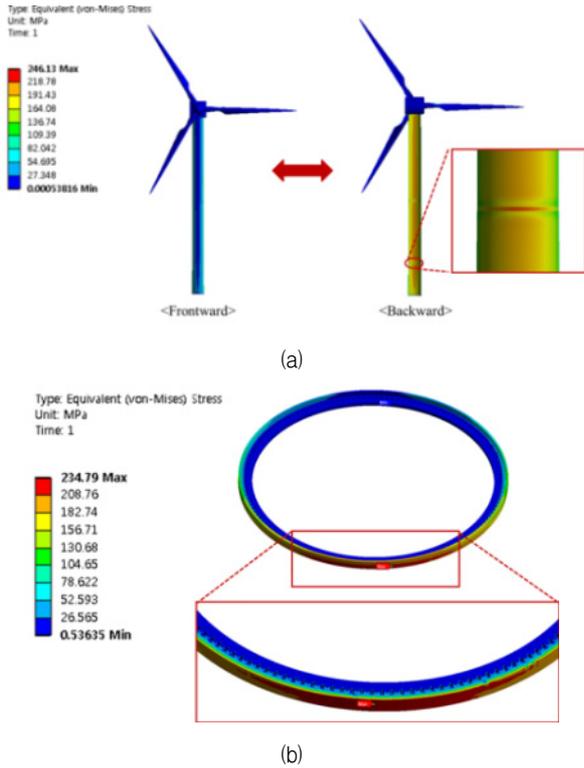


Fig. 5 Von Mises distributions of (a) wind turbine (b) upper tower flange

Table 5에 나타내었다. 외경 높이( $h$ )는 플랜지 기본모델의 길이로 고정하였으며, 내경 높이( $h_o$ )를 변화시켜 형상비를 결정하였다. Fig. 6은 입구 풍속 조건이 5 m/s일 때 각각의 블레이드 회전수 조건에서 형상비에 따른 상단(upper) 및 하단(lower) 플랜지에 작용하는 von Mises 등가응력을 도시한 그래프이다. 또한 상단하단 플랜지 최대 등가응력의 평균값을 산출하여 구조적 안정성을 갖는 플랜지 형상비를 도출하였다.

풍속이 5 m/s일 때 주어진 블레이드 회전수 조건에서, 상단 플랜지에 적용되는 최대 von Mises 등가응력은 하단 플랜지에 적용되는 등가응력보다 높은 수치를 나타내었다. 이는 상단 플랜지가 하단 플랜지보다 높이에 따른 속도압이 더 크게 작용하여 풍하중이 높게 적용되었음을 의미한다.

Fig. 6(a)는 블레이드 회전수가 10 RPM일 때 상단하단플랜지의 평균 von Mises 등가응력을 나타낸 것이다.

하단 플랜지 중 플랜지 형상비  $h_o/h=0.85$ 의 등가응력은 약 225.6 MPa로 모든 케이스 중 낮은 수치를 보였으며, 기본모델인  $h_o/h=0.75$ 보다 약 3 MPa 낮게 나타났다. 상단플랜지의 경우, 플랜지 형상비  $h_o/h=0.8$ 의 등가응력은 약 235.3 MPa로 가장 낮은 수치를 보였으며, 기본 모델인 형상비  $h_o/h=0.75$  보다 약 0.7 MPa 낮게 나타났다.

또한 블레이드 회전수가 15 RPM인 경우 상하단 플랜지의 최대 및 평균 von Mises 등가응력을 Fig. 6(b)에 도시하였

Table 5 Design parameters of tower flange for each case

Case	Aspect ratio ( $h_o/h$ )
1	0.65
2	0.7
3	0.75
4	0.8
5	0.85

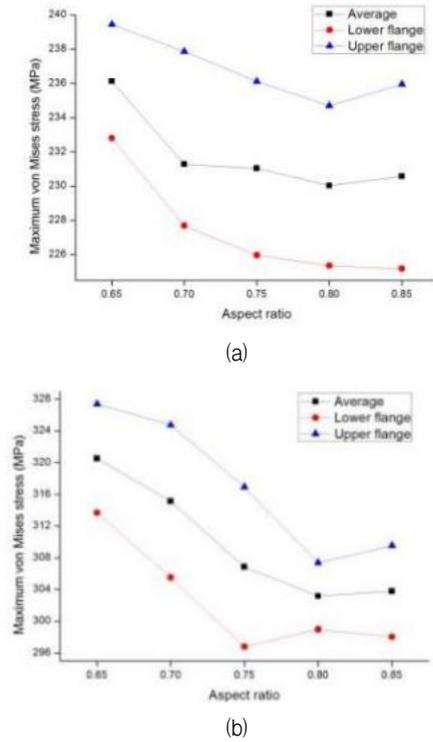


Fig. 6 Maximum von Mises stress of tower flanges at wind speed of 5m/s and blade rotation speed of (a) 10 RPM (b) 15 RPM

다. 블레이드 회전수가 15 RPM인 경우 10 RPM일 때보다 동적하중이 증가하여 각 플랜지 형상비 케이스에서 높은 등가응력을 나타내었다. 하단 플랜지는 블레이드 회전수가 10 RPM인 경우와 달리, 감소하는 등가응력의 경향성을 유지하다 기본 모델의 플랜지 형상비인  $h_o/h=0.75$ 에서 가장 낮은 등가응력(296.2 MPa)을 나타내었다. 상단 플랜지는 10 RPM의 블레이드 회전수 경우와 마찬가지로 플랜지 형상비  $h_o/h=0.8$ 에서 가장 낮은 등가응력(307.8 MPa)을 나타내었다.

Fig. 7은 플랜지 형상비가  $h_o/h=0.8$ 일 때의 전변형(total deformation) 분포를 나타낸 것으로 풍압이 적용된 터빈 후 반부에서 최대 변형량을 보였다. Table 6는 5 m/s 풍속 및 블레이드 회전수 조건에서의 변형률을 나타낸 것으로, 하단 플랜지보다 상단 플랜지에서 높은 변형률을 보였다.

타워 플랜지 형상비가  $h_o/h=0.8$ 일 때 최대 von Mises 응력 값은 SM35C의 항복응력보다 낮은 응력 값을 보였으며 최

Table 6 Imported pressure applied to wind tower

Blade rotational speed (RPM)	Total deformation (mm)	
	Upper flange	Lower flange
10	25.578	24.925
15	46.433	45.286

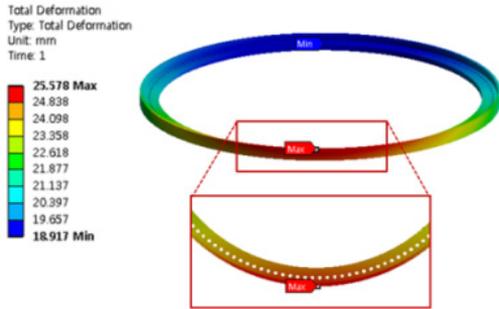


Fig. 7 Total deformation of upper tower flange with aspect ratio of  $h_0/h=0.8$

대 변형량 또한 미미하였으므로 구조적 안정성을 가진 플랜지 형상비로 판단하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 풍력터빈에서 타워섹션을 연결하는 지지 설계요소인 타워 플랜지 형상 및 최대 순간 풍속 및 동적하중에 따른 구조적 안정성을 확인하고자 유체-구조 연성해석을 수행하였으며, 이를 통하여 플랜지에서 응력이 집중되는 부위를 확인하였다. 응력 집중은 풍압이 적용되어 인장력 및 압축력이 발생하는 플랜지 후반부에서 확인되었다. 이에 플랜지 형상비에 따른 케이스 분석을 통하여 응력 집중을 완화하고자 하였다. 수치해석 결과, 플랜지 형상비가  $h_0/h=0.8$  일 경우 최대 von Mises 값은 설계 재질인 SM35C의 항복응력 보다 낮은 응력 값을 갖는 것을 확인하였고, 최대 변형량 또한 크지 않음으로 구조적 안정성을 가진 플랜지 형상 구조로 판단하였다.

### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발 사업의 연구비 지원(과제번호 20163010024740)에 의해 수행되었습니다.

### References

- (1) Park, J. M., Lee, S. Y., Ji, H. S., and Son, B. J., 2014, "Optimal Fiber-Angle of Wind Turbine Tower made of Composites under Wind Loads," Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 5, No. 1, pp. 9~15.
- (2) Joung, J. W., Kim, Y. M., and Sin, S. H., 2015, "Study on Wind Loads for the Various Cross-sectional Shapes of a Wind Turbine Tower through a Wind Tunnel Test and a CFD simulation," Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 19, pp. 3~10.
- (3) Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Dodoumis, I. N., and Baniotopoulos, C. C., 2003, "Analysis and Design of the Prototype of a Steel 1-MW Wind Turbine Tower," Engineering Structures, Vol. 25, pp. 1097~1106
- (4) Yoo, G. Y., Kang, N. H., Kim, J. H., Hong, J. K., Lee, C. S., Lee, J. M., Kim, N. Y., and Yeom, J. T., 2012, "Ingot-breakdown Design of Tower Flange Material for Offshore Wind Turbine," Transactions of Materials Processing, Vol. 21, No. 7, pp. 412~419.
- (5) Choi, H. S., Kim, D. H., Kim, D. M., and Park, K. K., 2010, "Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads," Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 23, No. 2, pp. 209~215.
- (6) Jiang, W., Fan, Q., and Gong, J., 2010, "Optimization of Welding Joint between Tower and Bottom Flange based on Residual Stress Considerations in a Wind Turbine," Journal of Energy, Vol. 35, pp. 461~467.
- (7) Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G. D., Hondros, I. D., Karamaneas, H., Karabalis, D. L., and Beskos, D. E., 2002, "Static, Seismic and Stability analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower," Journal of Engineering Structures, Vol. 24, pp. 1015~1025.
- (8) Park, S. W., Kim, K. H., Lee, K. S., Park, Y. S., Oh, H. S., Shin, H. K. and Hong, K. Y., 2015, "Arrangement Design and Performance Evaluation for Multiple Wind Turbines of 10 MW Class Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation System," Journal of the Society for Marine Environment and Energy, Vol. 18, pp. 123~132.
- (9) Sargsyan, A., 2010, "Simulation and Modeling of Flow Field around a Horizontal Axis Turbine (HAWT) Using Rans Method," Degree of Master of Science Thesis, Department of Engineering and Computer science, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida.
- (10) 국토해양부, 2009, "건축구조 설계기준," Vol. 1245.