

# Vortex Shedding을 고려한 Tower Flange 설계

이 현주<sup>1)</sup>, 최 원호<sup>2)</sup>, 이 승구<sup>3)</sup>

## Tower Flange Design Considering Vortex Shedding

Hyunjoo Lee<sup>1)</sup>, Wonho Choi<sup>2)</sup>, Seung-Kuh Lee<sup>3)</sup>

Key words : Wind turbine(풍력 터빈), Load Calculation(하중 계산), Vortex Shedding(와류 효과), Tower(타워)

Abstract : In the case of wind turbine design, Optimization of tower structure is very important because tower generally takes about 20% of overall turbine cost. In this paper, we calculated wind loads considering vortex shedding, and optimized tower flange using the calculation results. For optimization, we used FEM to analyze structural strength of the flange and blade momentum theory to calculate wind loads.

### Nomenclature

- V : wind speed, m/s
- Re: Reynolds Number
- fs :Vortex shedding frequency, Hz
- St: Strouhal number
- D : Cylinder(Tower) diameter, m
- H : Tower height, m
- n :Tower natural frequency, Hz
- E : Young's modulus, N/m<sup>2</sup>
- I : Moment of inertia (area)
- M : Bending moment, Nm
- nb : Number of bolt around flange
- Mnac : Mass of wind turbine nacelle, kg
- Mtower : Mass of tower, kg
- Da : Effective stress diameter of bolt, m
- Dw : Bolt head diameter, m
- Tf : Thickness of flange, m

### subscript

WTGS : wind turbine generator system  
IEC : International Electrotechnical Commission

### 1. 서론

풍력 발전 시스템은 화석 에너지를 대체할 대표적인 에너지원으로 주목 받고 있다. 국내에서도 몇 차례의 유류 파동으로 인한 에너지 문제와 점차 심각해지고 있는 환경오염에 대한 부담을 해소하기 위하여 1990년 초부터 풍력 발전 시스템의 연구 개발 및 선진 제품의 도입 설치가 활발히 진행되어 왔다.

풍력 발전 시스템은 예측하기 어려운 다양한 환경 조건 하에서 운전되며, 20년 이상의 신뢰성이 보장되어야 하는 기기이다<sup>(1)</sup>. 따라서 풍력발전 시스템의 설계 단계에서부터 각 구성요소에 미치는 하중과 구성요소들의 상호작용을 수치화 하고, 이를 바탕으로 한 피로해석을 수행하여 설계에 반영함으로써 시스템의 신뢰성을 확보하는 작업이 개발과정에 반드시 포함되어야 한다<sup>(2)</sup>.

특히 블레이드(blade)에 작용하는 하중을 지

- 
- 1) (주) 효성 중공업연구소  
E-mail : brocken@hyosung.com  
Tel : (02)707-4364 Fax : (02)707-4399
  - 2) 이하 동 소속  
E-mail : choiwh@hyosung.com
  - 3) E-mail : sklee1@hyosung.com

지하고, 풍력 터빈 너셀(nacelle)을 특정 높이에 위치시키는 역할을 하는 타워는 그 부하 특성상 다양한 크기와 주기의 하중에 노출되어 있다. 또한 WTGS의 에너지원인 바람은 원통형 타워 주변에 와류(Vortex)를 발생시켜 타워의 피로하중을 증가시킨다. 이런 와류에 의한 피로 손상은 풍력 터빈의 설치 도중에 너셀의 설치 없이 타워가 방치될 때 집중적으로 발생한다고 알려져 있다<sup>(3)</sup>.

본 논문에서는 타워의 고유진동수와 같은 주파수를 갖는 와류를 발생시켜 타워의 피로하중을 가중시키는 임계 풍속을 구하고 타워 플랜지 두께와의 상관관계를 구하였다. 이를 위해 풍력 터빈 해석프로그램인 Bladed를 사용하여 750kW급 기어 타입 풍력 터빈 시스템의 외력을 계산하고, 이를 타워의 플랜지 설계를 위한 입력 하중으로 사용하였다.

## 2. 이론

### 2.1 Vortex wake of a stationary circular cylinder

풍력 터빈의 타워는 운전 수명(20년)동안 바람에 의해 발생하는 와류 진동에 노출되어 있다. 특히 설치되는 동안 발생하는 와류 진동은 타워에 높은 수준의 피로 하중을 유발하는 것으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>.

1878년 Strouhal은 바람이 불면 자동으로 소리를 내는 Aeolian harp의 튜브 풍속을 하프 줄의 직경으로 나눈 값에 비례한다는 것을 발견하였다<sup>(3)</sup>. 그 후 Lienhard는 1966년에 원통형 실린더 주변에 발생하는 와류와 유체의 Reynolds 수와의 관계를 정리하였다<sup>(4)</sup>.

Lienhard에 따르면 발생하는 와류의 발생 주파수는 다음과 같다.

$$f = \frac{S_r V}{D}$$

와류에 의한 풍력 터빈의 피로하중을 계산하는 방법은 Eurocode 1, Section 2.4에 기술되어 있다. 이에 따르면 타워의 고유 진동수와 동일한 진동을 발생시켜 피로 하중을 증가시키는 바람의 임계속도는 다음과 같이 계산된다<sup>(5)</sup>.

$$V_r = \frac{nD}{S_r}$$

위 식에 사용하는 타워의 직경은 원뿔형상인 타워에 대하여 최상부의 직경을 적용하여야 하며, Strouhal number( $S_r$ )의 값은 Fig1. 과 같다.

### 2.2 Tower Natural Frequency

원통형 타워에 공진을 일으키는 바람의 임계속도를 계산하기 위해서는 해석 대상이 되는 타워의 고유 진동수를 계산하여야 한다. 타워의 고유 진동수는 타워를 단순보로 가정하여 식(2.2-1)을 적용하여 계산하였다.

$$f_{it} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{H^3 (M_{nac} + 0.24M_{Tower})}} \quad (2.2-1)$$

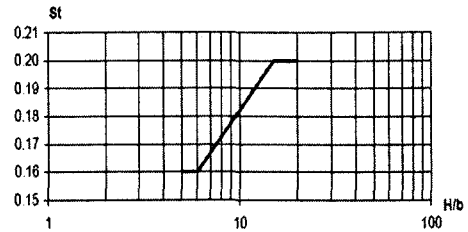


Fig 1. Strouhal number vs. Ratio between tower height H and Tower diameter D.

### 2.3 Flange Connection

원통형 풍력 터빈의 타워는 그 구조 특성상 L-type 플랜지를 이용하여 각 섹션을 연결한다.

아래 그림은 L-type 플랜지에 작용하는 하중(Z)에 의한 플랜지 상부 변형 및 이로 인한 볼트(R)와 플랜지(F)에 작용하는 하중을 표시한다.

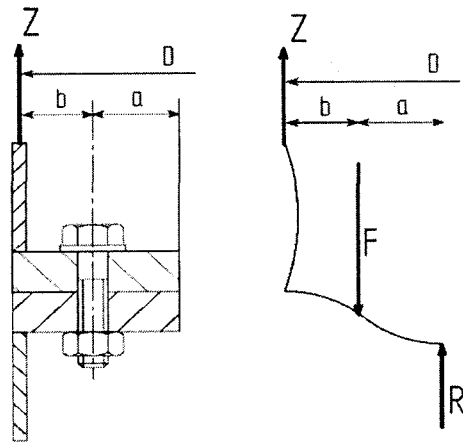


Fig 2. L-type flange connections

이때 Z 및 F는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다<sup>(6),(8)</sup>.

$$Z = \frac{4M}{Dn_b}, \quad R = Z \frac{b}{a}$$

$$F = Z + R = Z \frac{a+b}{a}$$

이때 플랜지의 유효 단면적은 볼트의 유효 직경( $D_a$ )을 통해 나타낼 수 있으며, 볼트의 유효 직경은 다음 식과 같다.

$$D_a = D_w + 0.5 \times L_s \times \tan 45$$

각 볼트 간에 발생하는 간섭을 고려하면 전체 플랜지의 유효 단면적은 다음 식과 같다.

$$A_{ers} = \frac{\pi}{4}(d_w^2 - D_{f, hole}^2) + \frac{\pi}{8}d_w(D_A - d_w)[(x+1)^2 - 1]$$

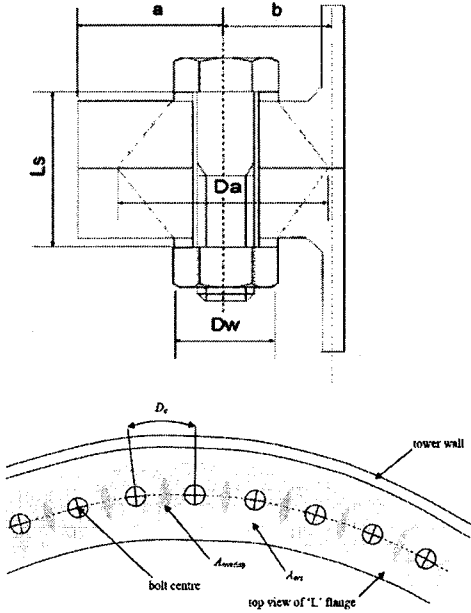


Fig 3. Effective Stress area of Flange

### 3. 해석

#### 3.1 Vortex shedding

2.2 항의 식을 이용하여 타워의 1차 진동수를 구한 후, 2.1항의 식을 이용하여 vortex shedding을 통해 타워에 공진을 발생시킬 수 있는 임계 풍속을 구하였다.

타워의 1차진동수 및 이의 계산에 사용된 변수들은 다음 표와 같다.

Table 1 Tower 1st Mode Frequency

Factor	Value
Nacelle mass, $M_{nacelle}$ (kg)	53,000
Mid Flange Thickness, $T_f$ (m)	0.06
Tower Mass, $M_{tower}$ (kg)	58,900
Young's modulus	$2.05E+11$
Average Diameter(m)	3
Average Thickness (m)	0.03
Height(m)	48.5
Moment of Inertia (Area)	0.31
1st Mode Frequency (Hz)	0.79

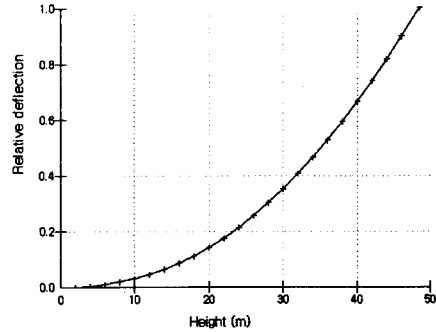


Fig 4. 1st Mode Shape of Tower

중양부 플랜지의 두께변화로 인한 타워의 강성 변화와 이로 인한 고유진동수의 변화를 무시하면 중양부 플랜지의 두께 변화는 타워의 단순 질량 변화로 가정할 수 있다.

이 때, 설계 대상이 되는 타워 중앙부의 플랜지 두께와 WTGS 전체 질량사이에는 다음의 관계식이 성립된다.

$$M_{tower} = 220540T_f + M_{nac}$$

이를 2.2항의 식에 대입하여 플랜지 두께와 타워의 1차 고유 진동수 사이의 관계를 구할 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$f_{1t} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{H^3 (M_{nac} + 0.24 (220540T_f + M_{nacelle}))}}$$

위 식을 이용해 플랜지 두께에 따른 타워 고유 진동수의 변화를 구하면 다음 그래프와 같다.

너셀의 설치 전과 설치 후 타워의 고유 진동수 변화는 각기 다른 양상을 나타낸다. 특히 너셀이 설치된 후의 플랜지 두께 변화는 고유 진동수 변화에 거의 영향을 미치지 않지만, 너셀이 설치되기 전 타워의 고유진동수는 플랜지의 두께 변화에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

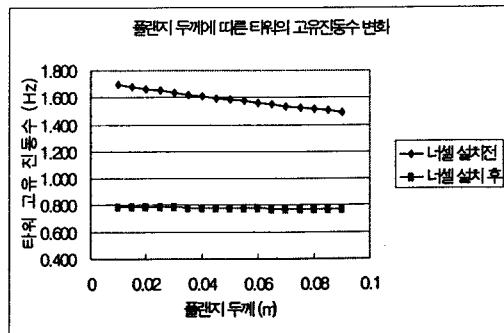


Fig 5. Thickness of Flange vs. Tower Frequency

위 그래프와 2.1항의 식을 이용하여 타워에 높은 피로 하중을 유발하는 임계 풍속과 플랜지 두께사이의 관계 그래프를 구하면 다음 표와 같다. 이 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 플랜지의 두께 변화에 따른 타워의 임계 풍속의 변화량은 너셀이 설치된 후 보다 너셀이 설치되기 전에 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

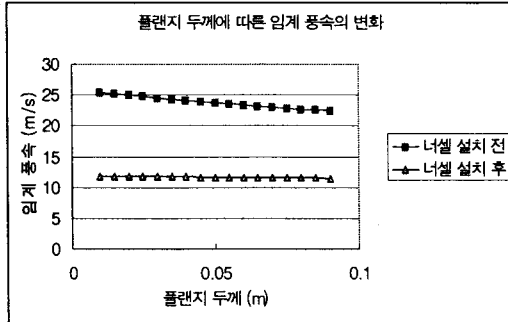


Fig 6. Thickness of Flange vs. Critical Wind speed

### 3.2 Flange Connection

플랜지부의 설계 검증을 위하여 풍력 시스템 해석 프로그램인 Bladed를 사용하여 설계하중을 도출하였다. 설계 하중은 IEC 61400-1에서 정의하는 하중 조건에 따라 구하였으며, 해석 대상이 되는 플랜지가 위치한 높이 28m 지점의 최대 하중은 다음과 같다.

Table 2 Extreme Loads on Flange

Load Case	6.1
Mx (kNm)	11,393
My (kNm)	1231.2
Mz (kNm)	-724
Fx (kN)	99
Fy (kN)	552
Fz (kN)	561

2.3항의 식과 위 하중값을 이용하여 플랜지에 작용하는 응력을 계산한 결과 최대 응력(Von mises Stress)값은 123 MPa 이었으며, 이는 재료의 항복강도(250MPa)를 고려했을 때 안전율 2이 상으로 판단된다.

### 4. 결론

풍력 터빈용 타워에 작용하는 와류의 가진 효과를 최소화하기 위하여 타워의 공진 주파수와 동일한 주파수의 와류를 발생시키는 임계 풍속을 구하였다.

또한 타워 플랜지의 두께 변화에 따른 임계 풍속의 변화를 계산하고, 너셀을 타워에 설치했을 때와 설치하지 않았을 때의 임계 풍속을 비교하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

1. 타워 플랜지의 두께 변화는 너셀을 타워에 설치하지 않았을 때 더 큰 영향을 미쳤으며, 너셀이 설치된 이후에는 플랜지 두께 변화에 따른 임계 풍속의 변화량은 극히 미비하였다.

2. 타워는 너셀이 설치되지 않은 상태에서는 높은 에너지를 갖는 풍속(22~25m/s)에서 공진을 일으키며, 이는 타워에 심각한 피로하중을 유발할 수 있다.

3. 풍력터빈의 설치시나 유지 보수를 위하여 너셀을 설치하지 않은 상태로 타워를 22~25m/s의 풍속에 장기간 방치하는 것은 타워에 높은 피로하중을 유발하게 된다.

3. 풍력터빈의 정상 운전 시에는 11m/s의 풍속에서 와류로 인해 타워의 피로하중이 증가할 수 있으나 날개 회전으로 인해 타워에 와류가 발생하기 어려워지기 때문에 이 영역에서 와류에 의해 발생하는 피로하중은 심각한 수준이 아니라고 판단된다.

### 후 기

본 연구는 2004~2007년도 전력산업연구 개발사업인 “국제기술세취 및 협력에 의한 2.0MW급 풍력발전시스템 상용화 개발” 사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

### References

- [1] Hau, 2000, "Windturbines," Springer
- [2] Robert Harrison, 1998, "Large Wind Turbines - Design and Economics," John Wiley & Sons, 1998 4. David A. Spera, "Wind Turbine Technology," ASME,
- [3] DNV/Risø, "Guidelines for Design of Wind Turbines," DNV/Risø
- [4] Robert D. Blevins, 1990, "Flow-Induced Vibration", Van Nostrand Reinhold, 43-76p.
- [5] Lahmeyer International, 2000, "Wind Energy Technology - Technology, Market, Costs, Perspectives"
- [6] Germanischer Lloyd, 1999, "Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems"
- [7] Robert C. Juninall, 1983, "Fundamentals of Machine Component Design", University of Michigan Press
- [8] DIN4133