

## 대형풍력터빈의 기초 인서트 설계에 관한 연구

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

### The study for design of the foundation insert of large wind turbine

Dong-Young Han, Won-Ho Choi, Seung-Kuh Lee

**Key words** : Wind turbine(풍력터빈), Foundation insert(기초 인서트), Tower(타워), Strength calculation(강도계산), Fatigue analysis(피로해석)

**Abstract** : The foundation insert is a tubular steel section which is embedded into the concrete of the foundation. The tower base section of the wind turbine is mounted on it. It has a top flange (L type) protruding far enough above the concrete to allow bolts to be inserted from underneath. The load is transmitted to the concrete at the base of the section through a T shaped flange. It has many holes for the reinforcements and the cables. The reinforcements of the concrete foundation run through the insert via a series of holes to bind the inner section to the outer section. Holes are provided for the power and communications cabling. The design follows normal European wind turbine practice, based on GL 2003 and Eurocode regulations.

#### Nomenclature

$\gamma_m$  : Partial Safety Factor  
 $\sigma$  : Stress  
 $b$  : Bearing stress  
 $d$  : inner diameter, mm  
 $f_y$  : yield strength  
 $t$  : tower wall thickness, mm  
 $C$  : Spring Stiffness  
 $D$  : outer diameter, mm  
 $F$  : Force  
 $M$  : Bending moment  
 $N_R$  : design life time expressed as number of cycles related to a constant stress range  
 $N_C$  : cycle at DC( $2 \times 10^6$  cycles)  
 $Z$  : the lowest allowable load per bolt section, kN

#### subscript

FEM : Finite Element Method  
TRF : Thickness reduction factor  
SCF : Stress concentration factor  
GL : Germanische Lloyd  
DC : Detail Category  
IIW : International Institute of Welding  
EC3: Eurocode3

#### 1. 서론

근래에 세계정세 불안으로 인한 고유가, 화석 연료를 이용한 화력발전소 등이 배출하는 온실가스로 인한 온난화와 이상 기후 문제가 사회적 이슈로 떠오르면서 온실가스를 배출하지 않는 친환경에너지에 대한 관심이 최고에 이르고 있다. 또한 친환경에너지가 국가적인 온실가스 배출 저감을 위한 국제기후협약에 대처하는 가장 확실한 대응방안으로 활용되고 있다. 그 중 풍력에너지는 다른 친환경에너지에 비해 상대적으로 우수한 경제성으로 인하여 화석연료를 이용한 전력 생산 방식을 대체할 수 있는 에너지원으로 각광 받고 있으며, 연간 20% 정도의 급속한 성장<sup>(1)</sup>을 보이고 있는 산업분야 중의 하나이다.

풍력에너지를 전기에너지로 변환하는데 사용

- 1) (주)효성 중공업연구소 풍력발전기술팀  
E-mail : handycap@hyosung.com  
Tel : (02)707-4369 Fax : (02)707-4399
- 2) (주)효성 중공업연구소 풍력발전기술팀  
E-mail : choiwh@hyosung.com  
Tel : (02)707-4370 Fax : (02)707-4399
- 3) (주)효성 중공업연구소  
E-mail : sklee1@hyosung.com  
Tel : (02)707-4301 Fax : (02)707-4399

되는 풍력터빈(Wind Turbine)은 크게 너셀(Nacelle)과 로터(Rotor) 및 타워(Tower)로 구성되어 있는데, 철근 콘크리트와 기초 인서트로 구성된 기초부 위에 설치된다. 기초부는 풍력터빈 전체의 중량을 지지하고, 풍력에 의해 발생하는 overturning moment 및 torsional moment를 견디도록 설계된다. 그 중 기초 인서트(Foundation Insert)는 기초부와 풍력터빈의 타워를 용이하게 연결하기 위한 구조물로, 타워와 마찬가지로 구조 안정성에 대한 검토가 요구된다.

기초 인서트는 일반적으로 tubular steel 구조물이고, 상부에는 타워와의 bolt 조립을 위한 flange가, 하부는 상부의 하중을 철근 콘크리트부로 전달하기 위한 T 형태의 flange가 용접되어 있고, 구조물의 옆면은 철근이 통과하기 위한 hole과 전력 및 통신 케이블의 인입을 위한 hole이 있다. 이 hole들은 구조적으로 안정성이 높은 ellipse 형태로 되어 있다.

본 연구에서는 FEA 및 Calculation을 통하여 기초 인서트의 극한강도 및 피로강도를 평가하였고, 이를 위해 ANSYS 및 Bladed for windows Software를 활용하였다.

## 2. 연구 개요

### 2.1 연구 목표

이 연구의 목표는 GL 규정에 부합하는 기초 인서트의 설계를 위해 Analysis 및 Calculation을 통해 구조물의 극한 강도 및 피로 강도를 도출하고, 평가하여, 당사의 풍력터빈에 사용할 기초 인서트의 설계를 수행하는 것이다.

### 2.2 연구 요약

기초 인서트에 대한 설계 프로세스는 크게 4가지로 구성된다. 우선 설계 하중 계산 결과를 활용하여, 인서트 wall에 대한 강도 계산을 실시한다. 두 번째로 용접부에 대한 피로 강도 평가 및 철근/서비스 홀에 대한 피로 강도 평가를 수행한다. 그리고, 타워와 연결되는 부분의 볼트 및 flange에 대한 피로 및 극한 강도 평가를 실시하여, 기초 인서트에 대한 설계를 완수하였다.

용접부의 강도 평가를 위한 DC는 EC3<sup>(2)</sup> 및 IIW 문서<sup>(3)</sup>를 참조하였고, SCF는 FEA를 통해 도출하였다. 또한 Partial Safety Factor는 IEC 규정<sup>(4)</sup>에 따라 적용하였다.

Bolt 강도 평가를 위한 spring stiffness의 계산을 위해 VDI2230 규정<sup>(5)</sup>을 참조하였고, Bolt의 Fatigue 평가는 Schmidt/Neuper method<sup>(6)</sup>를 활용하여 수행되었다.

Flange에 대한 극한강도는 Petersen에 따르는 방법<sup>(7)</sup>을 통해 수행되었다.

본 연구에 사용된 좌표계는 GL<sup>(8)</sup> 좌표계를 따른다.

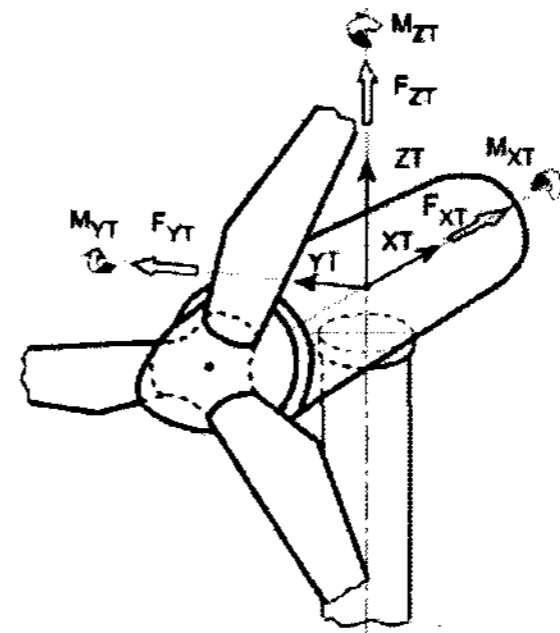


Fig. 1 Tower Coordinate System(GL)

## 3. 연구 내용

### 3.1 인서트 wall 강도 계산

#### 3.1.1 항복 강도 계산

항복 강도는 Bladed for windows로부터 계산된 하중 데이터로부터 유도된다. 전단력, 중력하중, resultant 모멘트, 비틀림 모멘트를 통하여 축 압축응력과 전단응력을 도출한다. 항복 강도(Von mises stress)는 단면적과 단면 계수의 감소를 설명하기 위해 nominal can wall section과 hole의 위치에서 계산된다.

#### 3.1.2 피로 강도 계산

피로 해석에 대해, 최대 Overturning moment  $M_y$ 와 횡방향 힘  $F_x$ 의 영향만이 고려된다. 기초 인서트 wall의 피로에 의한 Damage는 EC3를 참조하여 다음 식과 같이 계산된다.

$$Damage = \frac{N_R}{N_C} \cdot \left( \lambda_m \cdot \frac{\sigma}{DC} \cdot \frac{1}{TRF} \right)^m = a \cdot \sigma^m \quad (1)$$

### 3.2 용접부 피로 해석

EC3를 사용하여 용접부에 대한 DC를 결정한다.

Table 1 용접부에 대한 Detail

Location	IIW Weld Detail
Insert top L-flange	Horizontal butt weld
Insert base T-flange	Horizontal K-butt weld
Insert can wall	Longitudinal seam weld

FEA를 통해 각 용접 형상에 대한 SCF가 도출된다. 용접 위치인 Top L-flange, Base T-flange와 Can wall에 대해 DC, SCF, TRF, Partial Safety factor를 이용하여, Damage를 도출하고, 각 용접부에 대한 수명을 평가한다.

### 3.3 철근 및 케이블 Hole 피로 해석

#### 3.3.1 Hole Fatigue 해석

응력은 load time history로부터 계산된다. Hole에 기인한 관성 모멘트의 감소가 응력 계산 시 설명된다.

FEA를 통해 철근 hole과 서비스 hole 주변의 SCF를 계산한다. FEA 모델은 2D Shell element로 만들어지고, 모든 hole은 타원이다. SCF는 hole이 포함됨에 따라 단면 계수의 감소를 고려하여 기대되는 공칭 응력을 사용하여 계산된다.

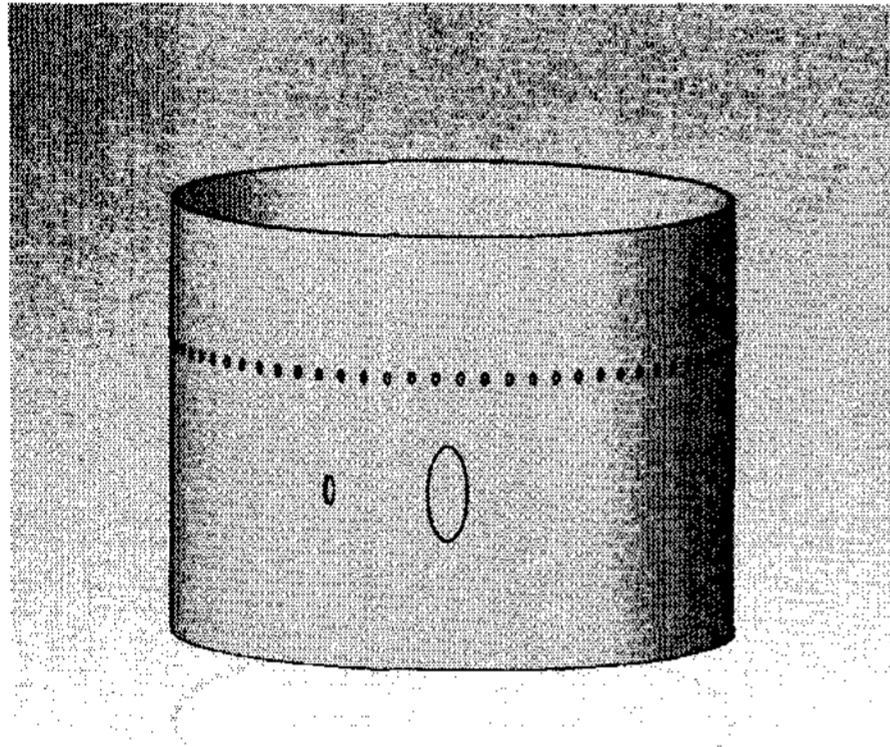


Fig. 2 기초 인서트의 FEA Model

형상에 따르는 DC는 EC3로부터 선택되고, 또한 EC3를 활용하여 hole 주변의 Damage를 계산한다.

#### 3.3.2 T flange의 sizing

T flange의 sizing을 위해 다음 항목 순서대로 계산된다.

- flange에 인가되는 m당 최대 힘
- 임의 너비 플랜지를 사용하는 콘크리트에서의 최대 bearing stress
- 콘크리트에서의 허용 bearing stress
- flange에서의 최대 굽힘 모멘트
- 요구되는 plate의 두께

$$t_{flange} = \sqrt{\frac{M_{flange} \cdot 6}{\sigma_y}} \quad (2)$$

최종적으로 요구되는 너비와 plate의 두께를 계산하게 되고, 이때 계산된 두께보다 큰 두께를 선정하여 sizing을 완료한다.

### 3.4 Bolt 피로 해석

타워 Base와 기초 인서트 간의 L flange 볼트 연결은 Schmidt and Neuper method를 사용하여 검토된다. Schmidt and Neuper method는 타워 base 모멘트와 bolt 응력간의 관계를 계산하는데 사용된다.

우선 bolt-flange 시스템의 spring stiffness를 bolt, flange, washer의 stiffness로 결정한다.

$$C = C_S + C_D \quad (3)$$

(C는 전체 시스템의 spring stiffness,  $C_S$ 는 볼트 stiffness,  $C_D$ 는 flange와 washer의 stiffness)

전체 flange package의 spring stiffness를 계산하기 위해 VDI2230 방법이 사용된다. 이를 통해 flange의 stress surface를 계산한다.

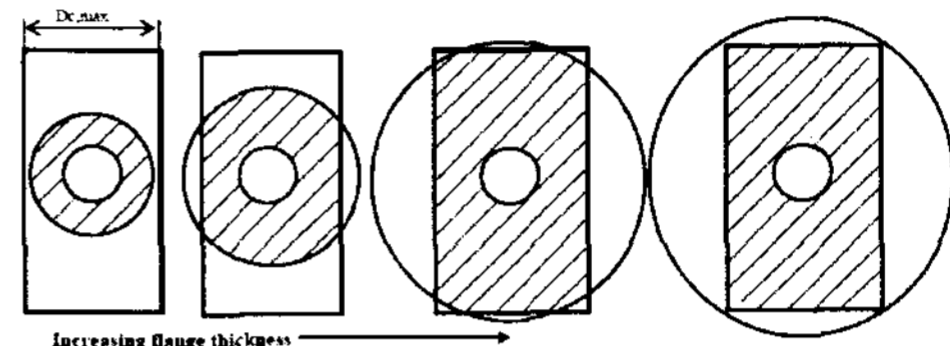


Fig. 3 flange t에 따라 응력을 받는 면적 변화

Schmidt and Neuper 방법에 따라 기초 인서트 wall의 하중과 볼트에서의 응력 간의 관계가 계산된다.

Table 2 응력함수 모멘트/볼트 응력(h=0m)

$Z_{s&n}$ [kN]	$F_{vy}$ [kN]	$M_{tower}$ [kNm]	$S_{v, bolt}$ [MPa]
-500.0	197.5	-64449	134.1
-363.3	461.4	-46827	313.3
-236.6	540.8	-30492	367.2
0.0	581.3	0	394.7
236.6	621.7	30492	422.1
363.3	701.1	46827	476.1
500.0	965.0	64449	655.2

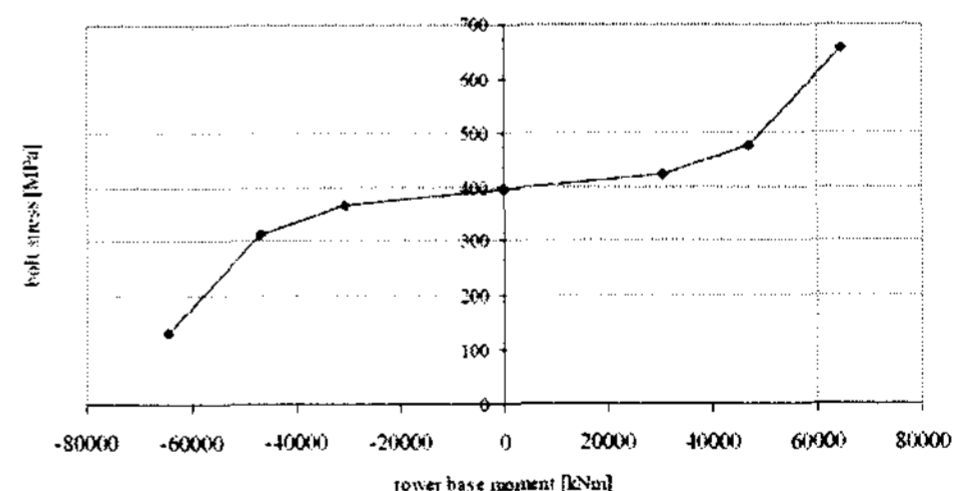


Fig. 4 기초 인서트 모멘트와 볼트 응력 간의 비선형 관계

상기 관계에 대해 Damage Calculation을 수행하여 flange/bolt 간의 Damage를 도출한다.

### 3.5 Flange 극한 강도 해석

Petersen 방법에 따라 소성 볼트 계산을 사용하여 타워 base와 기초 인서트의 L flange 연결이 검토된다. 볼트의 예하중 단계에서 볼트에 비틀림에 의한 전단응력이 발생한다. 이 효과가 타

위 및 기초 인서트의 극한 flange 계산에 고려되지 않는다. 이 연구에서는 EN10025<sup>(9)</sup>에 따라 탄성 볼트 계산 방법이 적용된다. 볼트 단면 하중 계산 후 Petersen failure mode에 따라 첫째, bolt가 항복될 때, 둘째 볼트와 타워 wall이 항복될 때, 셋째 flange와 타워 wall이 항복될 때의 하중(Z)을 도출하게 되고, 여기서 가장 낮은 허용 하중을 갖는 failure mode가 결정적 하중이 되고, 강도 safety margin의 계산을 수행하는데 사용된다.

$$SM = \left( \frac{Z_{\min}}{Z} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

$Z_{\min}$ : 3 failure mode로부터 계산된 최소 값,  
허용가능 Z  
Z: 타워 단면에서의 실제 하중

#### 4. 결론

풍력터빈을 지지하기 위한 기초 인서트의 설계를 위해 인서트 wall에 대한 강도 계산, 용접부 강도 계산, 홀 부위의 강도 계산, bolt 및 flange부의 강도계산을 실시하였다.

인서트 wall에 대한 극한 강도는 최소 36.3%, 피로 강도는 최소 23%의 여유가 확인되었고, 용접부에 대한 피로 강도에서는 최소 15%의 Margin을 확인할 수 있었다. 홀 부위에서는 최소 5%의 Margin을 확보하였고, 볼트부는 16.4%, 플랜지는 4%의 margin을 확보하였다.

상기 해석 결과에 따라 기초 인서트에 대한 설계를 완수하게 되었다.

#### 후 기

본 연구는 2004~2007년도 전력산업연구 개발사업인 “국제기술제휴 및 협력에 의한 2MW급 풍력발전시스템 상용화 개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] BTM Consult APS, "World Market Update 2006", 2007.3
- [2] Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.1: general rules and rules for buildings, CEN European Committee for Standardization, ENV 1993-1-1, April 1992.
- [3] International Institute of Welding -IIW/IIS, A. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW document XIII-1965-03/XV-1127-03, updated July 2003, Wilhelmshaven, Germany
- [4] IEC International standard IEC 61400-1, "Wind turbine generator systems- Part 1: Safety Requirements", 2nd edition 1998.
- [5] VDI 2230 Part 1, Systematic calculation of High Duty Bolted Joints, Joints with One Cylindrical Bolt, Verein Deutsche Ingenieure, Dusseldorf, Germany, August 1988.
- [6] H.Schmidt, M.Neuper, "Zum Elastostatischen Tragverhalten exzentrisch gezogener L-Sto'e mit vorgespannten Schrauben", Stahlbau 66, 1997 heft 3, Ernst & Sohn.
- [7] C. Petersen, Stahlbau, "Grundlagen der berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten", auflage 3, print June 2001, Vieweg Wiesbaden, Germany.
- [8] Germanischer Lloyd, Rules and regulations, IV Industrial Services, Part 1 Guideline for Certification of Wind Turbines. 2003 Edition including Supplement 2004.
- [9] CEN, European Standard EN 10025, Hot rolled products of non-alloy structural steels - Technical delivery conditions (Includes amendment A1:1993), Brussels, March 1990.