

풍력 발전 시스템 타워의 용접부 강도 연구

한 동영¹⁾, 안 경민²⁾, 최 원호³⁾, 이 승구⁴⁾

The study for strength of welds of the wind turbine tower

Dong-Young Han, Kyung-Min Ahn, Won-Ho Choi, Seung-Kuh Lee

Key words : Wind turbine(풍력터빈), Tower(타워), FEM(유한요소법), Fatigue analysis(피로해석), Weld toe(용접지단)

Abstract : Recently, as the global warming by fossil fuels and the steep rise of the oil price become social issues, the interest for renewable energy producing system is increasing rapidly. Among these, the wind turbine is most highlighted because of its economic competitiveness. The tower is one of the main components of wind turbine, which occupying about 20% of overall turbine costs. The tower access door located to base part of the tower, is used to enter the tower. This is the main structural weak points because of door hole, weldment, etc. And so are the weldments between the cans and the flanges. In this study, for the top flange part of the tower, by FEM using ANSYS, we retrieved the maximum von Mises stress on that and carried out fatigue analysis using stresses at such weak points.

Nomenclature

t : tower wall thickness, m
Φ : Diameter, m
V_m : Partial Safety Factor
σ_y : Direct stress

subscript

FEM : Finite Element Method
MAPS : Maximum Absolute Principal Stress
GL : Germanische Lloyd
DC : Detailed Category

1. 서론

근래에 세계경제 불안으로 인한 고유가, 화석 연료를 이용한 화력발전소가 배출하는 온실가스 및 원자력발전소의 방사능 누출 위험성과 핵폐기물 처리문제가 사회적 이슈로 떠오르면서 친 환경에너지에 대한 관심이 빠르게 증가하고 있다. 또한 친 환경에너지가 국가적인 온실가스 배출 저감을 위한 국제기후협약에 대처하는 가장 확실한 대응방안으로 활용되고 있다. 그 중 풍력에너지

는 다른 친 환경에너지에 비해 상대적으로 우수한 경제성으로 인하여 화석연료를 이용한 전력 생산 방식을 대체할 수 있는 에너지원으로 각광 받고 있으며, 연간 20% 이상의 급속한 성장을 보이고 있는 산업분야 중의 하나이다.

풍력에너지를 전기에너지로 변환하는데 사용되는 풍력터빈(Wind Turbine)은 크게 너셀(Nacelle)과 로터(Rotor) 및 타워(Tower)로 구성되어 있는데, 전체 터빈의 비용 중 타워가 약 20%를 차지하고 있다. 풍력 터빈을 구성하는 여러 요소들 중에서 타워는 로터와 너셀을 지지하고, 너셀을 일정 높이에 위치시켜 발전에 필요한 풍속을

-
- 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 : autovan@hyosung.com
Tel : (02)707-4366 Fax : (02)707-4399
 - 3) (주)효성 중공업연구소 구조진동팀
E-mail : choiwh@hyosung.com
Tel : (02)707-4370 Fax : (02)707-4399
 - 4) (주)효성 중공업연구소
E-mail : sklee1@hyosung.com
Tel : (02)707-4301 Fax : (02)707-4399

확보하는 역할을 한다.

풍력 터빈이 설치되는 대부분의 지역에서 고도가 높아지면 풍황(Wind condition)이 좋아지기 때문에 충분한 높이의 타워를 사용하게 된다. 그러나 약 50m 정도의 타워를 더 높이기 위해서는 10m당 약 \$15,000 정도가 추가로 소요된다⁽¹⁾. 높이가 결정된 후라도 설치될 로터 및 너셀의 중량과 구조에 따라 타워의 형상과 강도가 달라져야 하기 때문에 최종 생산되는 에너지의 가격을 고려해 타워의 구조를 최적화해야 한다.

타워 구조는 크게 Can부, Flange부 및 Door부로 구성되어 있다. 각 부분의 연결은 용접에 의하며, 이 용접부가 타워의 강도에 있어 Weak point로 작용하게 된다. 그러므로 각 용접부에 대한 강도의 평가가 필수적이다. GL⁽²⁾ 규정에 따라, 타워 용접부의 강도 평가를 위해 타워 Top Flange 용접부와 Door 및 Base Flange의 용접부에서의 강도 및 타워 수평 용접부에 대한 강도를 평가해야 한다.

본 논문에서는 FEA를 통해 타워의 Top Flange와 Can과의 용접부에 대한 강도를 평가하였고, Top Flange와 타워 Can을 연결하는 용접부에 대해 응력과 모멘트 사이의 비선형 관계를 고려하였다. 그리고, 용접부에 대한 수명을 평가하기 위해 Bladed S/W가 활용되었다.

2. 해석 개요

2.1 해석 목적

해석의 목적은 첫째, 구조적으로 가장 취약한 부위인 타워 용접부의 피로강도 및 예상수명을 평가하는 것이다. 둘째, 취약부에 대한 Extreme Stress(Von mises Stress)를 확인하여, Extreme 조건에 대한 안전율을 검토한다.

2.2 해석 요약

용접부에 대한 해석 프로세스는 두가지로 나뉜다. 첫째 타워의 Top Flange는 FEA를 통해 Hotspot에서의 Influence Coefficient Matrix를 산출하고, 계산된 Load Time History와 조합하여, 새로운 MAPS(Maximum Absolute Principal Stress) Load Time History를 생성하는 것으로 진행된다.

Rainflow Cycle Counting⁽³⁾⁽⁴⁾을 거쳐 Detail Category⁽⁵⁾ 및 상용 프로그램인 Bladed S/W를 활용하여, Fatigue Damage를 계산하고, 결과에 대한 Margin을 확인하는 것으로 강도 평가가 완료된다.

해석은 타워의 Top Flange 배치에 대해 비선형 해석을 실시하였다.

용접부의 Hotspot에 대한 Influence Coefficient Matrix 및 Extreme Stress를 얻기 위한 해석 프로그

램으로 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였고, Load Time History와 Influence Coefficient Matrix의 조합, Rainflow Cycle Counting 및 Fatigue Damage의 계산을 위해 Bladed S/W를 활용하였다.

3. Top Flange 용접부의 강도 해석

3.1 Influence Coefficient Matrix

3.1.1 해석 모델링

Top Flange 용접부의 Influence Coefficient Matrix계산을 위한 타워의 모델링을 아래 Fig. 1과 같이 실시하였다. 타워의 Top Flange 해석 모델은 정확한 하중조건을 표현하기 위하여, 타워의 최상부 Section의 일부, 요베어링, 너셀의 Bed plate가 고려되었다.

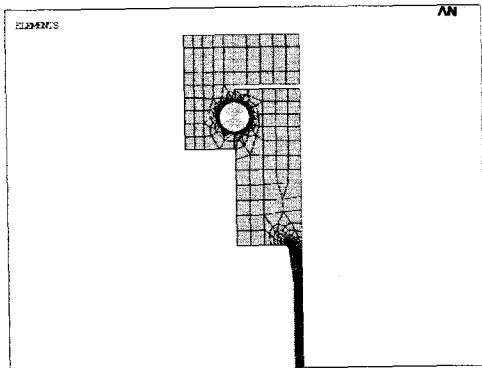


Fig. 1 Geometry Model

Top Flange 및 타워 Can Weld toe 위치에서의 응력 값을 얻기 위해, IIW document⁽⁶⁾를 참조하여, 용접부로부터 0.4t 떨어진 위치에 노드를 생성하였다.

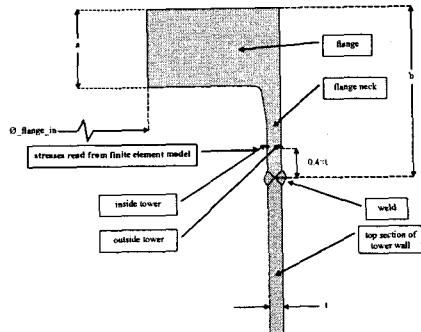


Fig. 2 Location of stress result output nodes

해석 모델은 다음 Fig. 2의 개략도를 참조하여 작성한다.

FE 모델은 관심부인 Weld Toe 부분의 Mesh를 Fine하게 구성한다. 최종 FE 모델은 생성된 2D 모델을 revolve하여 다음과 Fig. 3과 같이 구성된다.

해석시간의 단축을 위해 Half-Model로 구성하였고, 모델의 하부는 Fixed 조건으로, Cutting부의 경계조건은 Bending에 대해서 Symmetric 조건을 적용하였다.

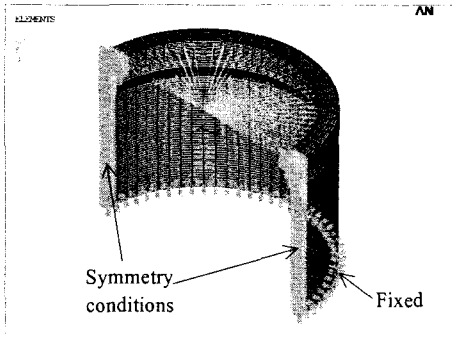


Fig. 3 Finite Element Model

3.1.2 하중 조건

해석 모델에 대한 계산이 비선형이므로, 이 모델에 작용하는 외부 하중은 세분화된 Step으로 적용된다.

하중 Step은 볼트 Preload Step(Load step 1), 너셀의 중량 Preload Step(Load step 2) 및 외부 모멘트 Load Step(Load step 3)으로 구분된다.

볼트 Preload를 가하기 위해 열에 의한 압축을 고려하였고, 너셀의 중량 및 외부 모멘트는 Half 모델을 고려하여 하중의 1/2을 가하였다.

3.1.3 해석 결과

Load Step에 따라 타워의 Top Flange에 대한 FE 해석을 실시하였다. Bolt preload에 대한 Stress Contour는 Fig. 4와 같다.

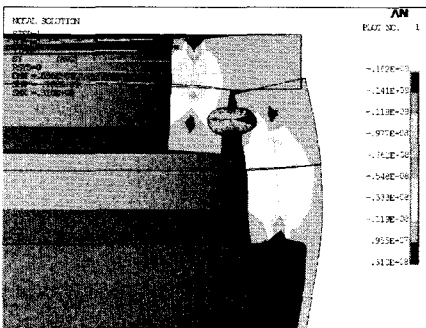


Fig. 4 σ_y stress result(Load step 1)

Bolt Preload에 너셀의 중량을 고려한 Load Step 2의 해석 결과는 Fig. 5와 같다.

Load Step 1과 2를 고려하고, 외부 모멘트가 가해진 Load Step 3의 해석결과는 Fig. 6과 같다.

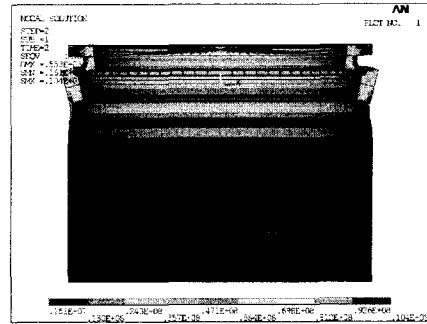


Fig. 5 von Mises Stress(Load step 2)

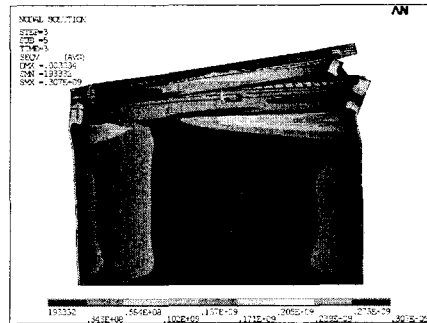


Fig. 6 von Mises Stress(Load step 3)

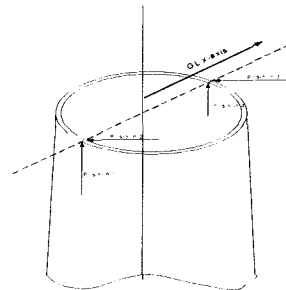


Fig. 7 Tower wall의 hotspot position

타워의 Top Flange가 Bending Moment를 받므로, Stress가 집중되는 타워의 Hotspot은 다음의 Fig. 7의 4가지 Position 중 하나가 된다.

Fig.7의 각 Position에서 Load step에 따라 작용하는 Stress Result는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1 Nodal stress results weld toe position

| Time | Load | Location for tabulated stress results | | | |
|-------|---------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | | tension side/outside tower wall | tension side/inside tower wall | compressive side outside tower wall | compressive side inside tower wall |
| [Sec] | [Nm] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] |
| 2 | 0 | -14526904.03 | -3012778.69 | -14526675.52 | -3012638.24 |
| 2.2 | 1400000 | -5500209.81 | 13913858.35 | -23794228.7 | -20357147.56 |
| 2.4 | 2800000 | 1666802.25 | 28763807.67 | -34999882.01 | -40143160.41 |
| 2.6 | 4200000 | 8259483.81 | 42934821.6 | -46399709.8 | -60453510.23 |
| 2.8 | 5600000 | 15151638 | 58237905.43 | -55230226.56 | -75449099.76 |
| 3 | 7000000 | 22104046.37 | 73934785.12 | -64534276.18 | -91019377.84 |

Table 1을 통해 타워 Top Moment와 타워 Wall Stress간의 비선형 관계가 계산되었고, 결과는 다음 Fig. 8과 같다.

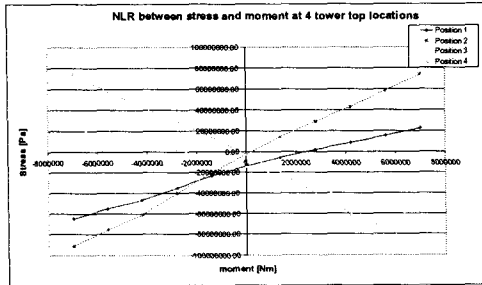


Fig. 8 Non linear relationship between moment and stress at weld position

3.2 Fatigue Analysis

Hot Spot에서의 Influence Coefficient Matrix와 타워 Top에서의 Load Time History를 조합하여, 새로운 Load Time History를 생성한다. 여기에 Rainflow Cycle Counting을 실시하고, Fatigue Damage를 계산한다. 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Fatigue Damage Result

| Position | DC | γ_n | Damage |
|------------|-----|------------|--------|
| Position 1 | 100 | 1.265 | 0.0142 |
| Position 2 | 100 | 1.265 | 0.2924 |
| Position 3 | 100 | 1.265 | 0.0072 |
| Position 4 | 100 | 1.265 | 0.1863 |

3.3 Extreme Stress Analysis

하중이 적용된 최대 응력(Von Mises Stress)은 다음 Fig. 9와 같다. 최대 응력은 219MPa로 항복한계인 268.2MPa보다 작은 값을 가지므로, 안전하다.

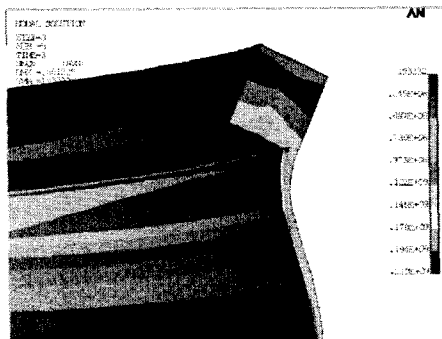


Fig. 9 Extreme Stress Result

4. 결론

타워의 Top Flange 배열의 Hotspot에 대한 비선형 해석을 실시하여, Fatigue Damage를 평가하였고, 또한 Extreme 조건에서의 최대 응력 값을 계산하였다. 해석결과 Position 2에서 Fatigue Damage가 가장 큰 값을 나타내었고, Extreme Stress 해석 결과는 항복응력 대비 안전율에 22%의 여유가 있음을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서 적용한 해석 기법을 활용하여, Fatigue Damage 및 Extreme Stress를 고려한 Tower Top Flange부의 설계가 가능하였다.

후기

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

References

- [1] Hau, "Wind turbines," Springer, 2000
- [2] Germanischer Lloyd, Rules and regulations, IV - Non-marine Technology, Part 1 - Wind Energy, Regulation for the certification of the Wind Energy Conversion Systems, Chapter 1-11, 2003 Edition 1 August 2003
- [3] DNV/Risø, "Guidelines for Design of Wind Turbines", DNV/Risø
- [4] Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, 피로해석의 기초, 청문각
- [5] 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
- [6] A. Hobbacher, International Institute for Welding, Fatigue design of welded joints and components, Abington Publishing, Abington Hall, Abington, Cambridge, 1996
- [7] VDI 2230 Part 1, Systematic calculation of High Duty Bolted Joints, Joints with One Cylindrical Bolt, Verein Deutscher Ingenieure, Dusseldorf, Germany, August 1988
- [8] Warren C Young, Richard G Budynas, "Roark's Formulas for Stress and Strain", Seventh edition, McGraw Hill, 2002