

Wind Turbine Tower의 Door 용접부에 대한 피로 강도 연구

한 동영¹⁾, 고 장욱²⁾, 최 원호³⁾, 이 승구⁴⁾

Fatigue Analysis of Welded Toe of Wind Turbine Tower Access Door

Dong-Young Han, Jang-Wook Koh, Won-Ho Choi, Seung-Kuh Lee

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

Abstract : Recently, as the global warming by fossil fuels become social issues, the interest of renewable energy producing system is increasing rapidly. Among these, wind turbines are most highlighted because of its economic competitiveness. The tower occupying about 20% of overall turbine costs, is one of the main components of wind turbine . Tower access door located to base part of the tower, is used to enter the tower. This is the main structural weak point because of door hole, weldment, etc. In this study, by FEM, we retrieved the maximum von Mises stress at door location and carried out fatigue analysis using stresses at weld toe locations of tower access door part.

Nomenclature

- t : tower wall thickness, m
- M_z : Bending Moment of tower, Nm
- M_y : Torsional Moment of tower, Nm
- $\sigma_x(S_x)$: stress parallel to the weld, MPa
- $\sigma_y(S_y)$: stress perpendicular to the weld, MPa
- $\tau_{xy}(S_{xy})$: shear direction stress, MPa
- σ_1 : 1st principal stress, MPa
- σ_3 : 2nd principal stress, MPa
- PS_{max} : maximum principal stress, MPa

subscript

- FEM : Finite Element Method
- MAPS : Maximum Absolute Principal Stress
- GL : Germanische Lloyd

1. 서론

근래에 화석연료를 이용한 화력발전소가 배출하는 온실가스, 원자력발전소의 방사능 누출 위험성과 핵폐기물 처리문제가 사회적 이슈로 떠오

르면서 친환경에너지에 대한 관심이 빠르게 증가하고 있다. 또한 친환경에너지가 국가적인 온실가스 배출 저감을 위한 국제기후협약에 대처하는 가장 확실한 대응방안으로 활용되고 있다. 그중 풍력에너지는 환경친화성 및 상대적으로 우수한 경제성으로 인하여 화석연료를 이용한 전력생산 방식을 대체할 수 있는 에너지원으로 각광받고 있으며, 연간 20% 이상의 급속한 성장을 보이고 있는 산업분야 중의 하나이다.

풍력에너지를 전기에너지로 변환하는데 사용되는 풍력터빈(Wind Turbine)은 크게 발전기(Generator), 증속기(Gearbox), 제어기(Controllor),

-
- 1) (주)효성 중공업연구소 구조진동팀
E-mail : handycap@hyosung.com
Tel : (02)707-4369 Fax : (02)707-4399
 - 2) (주)효성 중공업연구소 구조진동팀
E-mail : diable@hyosung.com
Tel : (02)707-4373 Fax : (02)707-4399
 - 3) (주)효성 중공업연구소 구조진동팀
E-mail : choiwh@hyosung.com
Tel : (055)268-9910 Fax : (055)268-9926
 - 4) (주)효성 중공업연구소
E-mail : sklee1@hyosung.com
Tel : (02)707-4301 Fax : (02)707-4399

타워(Tower) 및 블레이드(Blade)로 구성되어 있는데, 전체 터빈의 비용 중 타워부가 약 20%를 차지하고 있다. 풍력 터빈을 구성하는 여러 요소들 중에서 타워는 블레이드와 너셀(Nacelle)을 지지하고, 발전에 필요한 풍속을 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 블레이드 및 너셀의 중량과 구조에 따라 타워의 형상과 강도가 달라져야 하기 때문에 최종 생산되는 에너지의 가격을 고려해 타워의 구조를 최적화해야 한다.

타워의 하부에 위치한 Door는, Door를 설치하기 위한 Hole과 용접부 등에 의해 다른 부분에 비해 구조적으로 취약하다. 본 연구에서는 FEM해석을 통해 GL⁽²⁾ 좌표계에 따르는 피로강도의 평가를 위해 Door 및 Base Flange의 취약 지점에서의 Influence Coefficient Matrix(Stress Tensor)를 계산하였다.

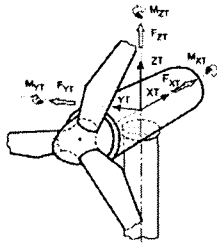


Fig. 1 GL에 따르는 Tower Coordinate System

이 값과 계산된 Load를 활용한 피로강도 평가를 통해 Door부, 특히 Weld Toe에 대한 Fatigue Damage Margin(피로 안전율)을 산출하였다. 또한 계산된 Moment값을 입력하여 Door 부분의 Extreme Stress 해석을 실시하였다.

2. 해석 개요

2.1 해석 목적

해석의 목적은 첫째, 구조적으로 가장 취약한 부위인 타워의 Door와 타워 Wall 및 Base Flange와 타워 Wall 부분을 연결하는 용접부의 피로강도를 확인하는 것이다.

둘째, 취약부에 대한 Extreme Stress(Von mises Stress)를 확인하여, Extreme 조건에 대한 Door부의 안전성을 검토한다.

2.2 해석 요약

해석 프로세스는 FEA를 통해 용접부에 대한 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 Bladed를 활용하여, Fatigue Damage를 계산하고, 결과에 대한 Margin을 확인한다.

해석 모델은 타워의 Base Flange로부터 17.5m 높이까지 도어를 포함하여 모델링 하였고, 모델링을 위해 상용 3D CAD 프로그램인 Solid Edge를 사용하였다.

해석 이론은 Door와 Flange에 대해 선형해석을 실시하였고, 해석 방법으로 Linear Material Behavior 및 Small Deflection Theory를 적용하였다.

용접부의 Hot Spot에 대한 Influence Coefficient Matrix 및 Extreme Stress를 얻기 위한 해석 프로그램으로 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 사용하였고, Load Time History와 Influence Coefficient Matrix의 조합, Rainflow Cycle Counting 및 Fatigue Damage의 계산을 위해 Bladed를 활용하였다.

3. Door 용접부의 강도 해석

3.1 Influence Coefficient Matrix

3.1.1 해석 모델링

Door 용접부의 Influence Coefficient Matrix 계산을 위한 타워의 형상 모델링(3D)을 Solid Edge를 이용하여 실시하였다. 기초부터의 높이는 17.5m이고, Base Flange가 T 형상인 모델이다. 해석을 위해 형상 모델을 Parasolid File로 변환하고, ANSYS에서 Import하여 다음 Fig.2와 같이 FE 해석을 위한 모델을 구성하였다.

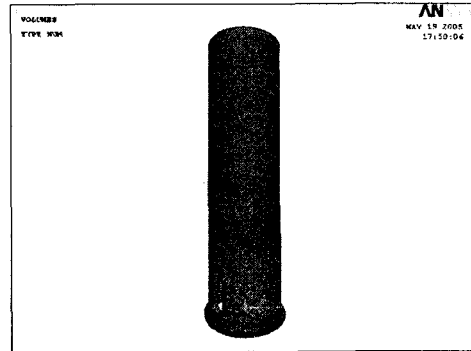


Fig. 2 타워의 형상 모델

Door 용접부의 Weld Toe 위치에서의 응력 값을 얻기 위해, IIW Standard⁽⁶⁾을 참조하여, 타워 Wall로부터 0.8t, 1.4t 지점에서의 응력 값을 계산한 후 외삽법을 통해 Weld Toe 지점(타워 Wall로부터 0.4t 떨어진 지점)에서의 Stress Tensor인 Influence Coefficient Matrix를 확보한다. 해석 모델은 다음 Fig.3의 개략도를 참조하여 작성한다.

FE 모델은 관심부인 Weld Toe 부분의 Mesh를 Fine하게 구성한다. 최종 FE 모델은 다음과 Fig.4

와 같다. 해석시간의 단축을 위해 Half-Model로 구성하였고, Cutting부의 경계조건은 Bending에 대해서는 Symmetric, Torsion에 대해서는 Asymmetric 조건을 적용하였다.

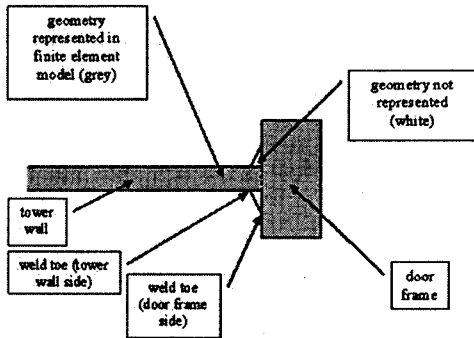


Fig. 3 용접부 모델링 개략도

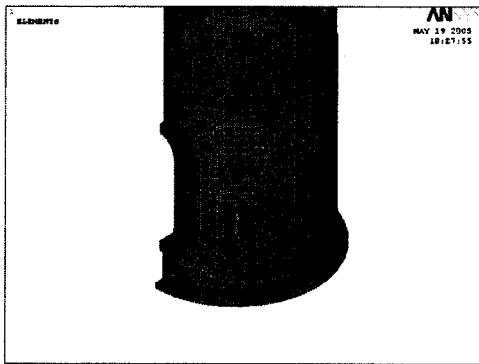


Fig. 4 타워의 FE 모델

3.1.2 해석 결과

1) Unit Load에 대한 Stress Analysis

타워의 Top 지점에 M_z (Bending), M_y (Torsion)의 Unit Load를 가하여, Stress Analysis를 실시하고, 타워 Door의 용접부 및 Base Flange의 용접부에 대한 응력 값을 계산하였다. Door Flange 부의 응력 Contour(3rd Principle Stress)는 다음의 Fig.5와 같다.

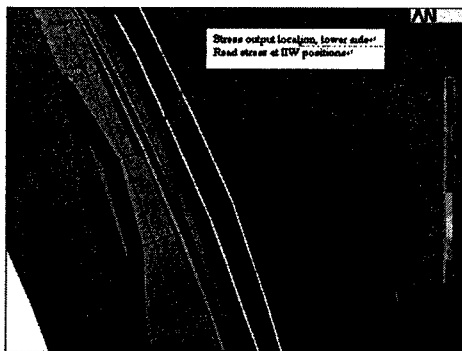


Fig. 5 Door Flange부 응력해석 결과

2) Influence Coefficient Matrix

관심부위인 Door Flange 및 Base Flange의 내/외부 Weld Toe 둘레에 대한 Stress Tensor인 Influence Coefficient Matrix를 구하였다. 아래 Fig.6은 Door Flange 내부의 용접부에 대한 Influence Coefficient Matrix를 구하기 위해 작성된 FE 모델의 Line Component를 표시한다.

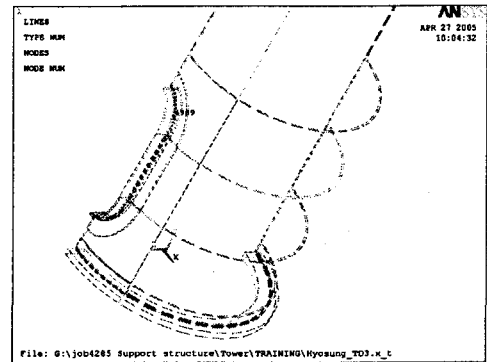


Fig. 6 Door Flange부 Line Component

Fig.7은 Door의 Flange 용접부에서 산출한 세 방향의 Stress 및 Principal Stress(주응력)를 나타낸다.

여기서 Influence Coefficient Matrix를 구성하는 세 방향의 Stress는 용접에 평행인 성분(σ_x), 용접에 수직인 성분(σ_y) 및 전단방향(τ_{xy}) 성분이다.

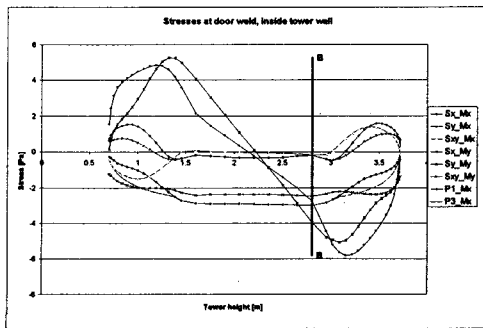


Fig. 7 Door Flange부 응력선도

3.2 Fatigue Analysis

다음의 수식 (1), (2)를 활용하여 주응력을 구하고, 이중 절대값이 더 큰 주응력인 MAPS를 갖는 Node인 Hot Spot을 선정(Table 1)하였다.⁽⁷⁾

Hot Spot에서의 Influence Coefficient Matrix와 타워 Top에서의 Load Time History를 조합하여, 새로운 Load Time History를 생성한다.

$$\sigma_1 = \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_3 = \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

Table 1 Influence Coefficient of Hot Spot

Position	Node	P_{Smax}, M_x	σ_x, M_x	σ_y, M_y	σ_z, M_z	σ_y, M_y	τ_{xy}, M_x	τ_{xy}, M_y
[-]	[no]	[MPa]						
Door wall outside	11309	-3.40	-2.34	-0.68	-0.78	3.10	1.67	1.73
Door wall inside	2088	-3.00	-2.99	-2.48	-0.21	-3.95	-0.16	-2.76
Base flange outside	28676	-2.17	-0.36	0.35	-2.17	1.43	-0.04	-0.76
Base flange inside	29539	-2.14	-0.36	0.06	-2.14	0.67	0.04	-0.90

MAPS Time History Data에 Rainflow Cycle Counting을 실시하고, Hot Spot의 Detail Category를 사용하여 Fatigue Damage를 계산한다. 여기서 Weld Detail Category를 결정하기 위해 EC3⁽⁵⁾와 IIW⁽⁶⁾가 사용되었다.

Fatigue Analysis 결과로 생성된 Fatigue Damage의 Margin은 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Fatigue Damage 평가 결과

Position	Node	DC	Margin
			%
Door wall outside	11309	100	3
Door wall inside	2088	100	16
Base flange outside	28676	100	83
Base flange inside	29539	100	86

Door Wall의 외부에서 Margin이 3%로 가장 큰 Fatigue Damage를 갖는 것을 확인하였다.

3.2 Extreme Stress Analysis

Door 용접부의 Fatigue Damage를 평가하기 위해 M_z , M_y 의 Unit Load가 해석 모델에 적용되었다. 이 두 Unit Load로부터의 해석 결과가 모멘트들의 조합 효과를 나타내는 새로운 하중조건을 생성하는데 사용된다. Extreme 전체 overturning moment와 동시에 발생되는 torsional moment는 M_{xy} 와 M_z 로 표시된다(GL 좌표계). 이러한 하중이 적용된 최대 응력(Von Mises Stress)은 다음 Fig.8과 같다.

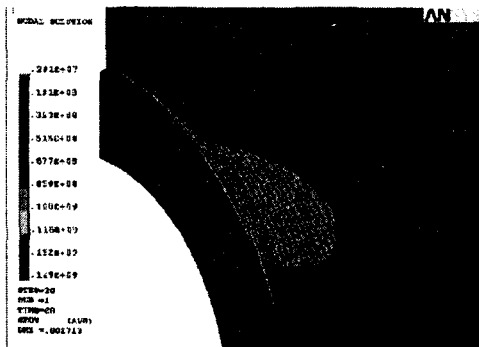


Fig. 8 Extreme Stress 해석 결과(Door Flange)

해석 결과 Node 11307에서 최대 응력이 발생하였고, 발생응력은 92MPa로 재료의 안전율을 고려한 재료의 항복응력인 313MPa에 비해 작은 값을 가져 Extreme Load에 대해 안전하다고 할 수 있다.

4. 결론

T자형 Base Flange를 가진 타워의 Door 및 Base Flange의 용접부에 대한 Fatigue Damage를 평가하였고, 또한 Extreme 조건에서의 최대 응력 값을 계산하였다.

해석결과 Door의 Flange 바깥 쪽 부분에서 Fatigue Damage의 Margin이 3%로 가장 취약한 부분으로 확인되었다. 또한 Extreme Stress 해석 결과는 항복응력 대비 안전율이 3.4 이상임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 적용한 해석 기법을 활용하여, Fatigue Damage 및 Extreme Stress를 고려한 Tower Door부의 설계가 가능하였다.

후기

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

References

- [1] Hau, "Windturbines," 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, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW Document XIII-1965-03/XV-1127-03, updated July 2003, Wilhelmshaven, Germany
- [7] 재료역학(Mechanics of Materials), Third Edition, Gere and Timoshenko