

# 풍력발전시스템 타워의 플랜지 국부 응력 평가 기법 연구

## A Study on the Method of Local Stress Evaluation for the Wind Turbine Tower Flange

원 중 범\* · 이 강 수\*\* · 박 종 빈\*\*\* · 김 만 응\*\*\*\* · 한 성 곤\*\*\*\*\* · 이 상 래\*\*\*\*\*

Won, Jong-Bum · Lee, Kang-Su · Park, Jong-Vin · Kim, Mann-Eung · Han, Sung-Kon · Lee, Sang-Lae

### 요 약

본 논문은 풍력발전 시스템의 하부 지지 구조물인 타워의 플랜지 연결부 설계 평가를 위한 플랜지 모델 건전성 평가 기법에 대해 다룬다. 일반적으로 풍력발전 시스템 타워의 연결부는 Ring-형 플랜지의 형태를 가지고 있다. 이러한 ring-형 플랜지에 대한 설계 기준 및 방법은 풍력 발전 시스템 기술기준 등에 명시되어 있다. 이러한 설계 기준을 따르는 플랜지 연결부에 대해 구조 및 체결 볼트의 건전성 평가를 위해 하중평가 전용 프로그램인 GH-Bladed 3.8를 통해 생성된 하중 데이터를 유한요소 범용 프로그램인 Ansys 12.0에 접목하여 구조해석을 수행 하였다.

해석 방법은 풍력발전시스템의 타워를 셀 요소로 모델링하여 계산한 해석 결과를 플랜지 모델의 경계면에 적용 시켜 해석하는 submodeling 기법과 타워를 빔의 형태로 단순화 하여 계산한 거동 결과를 플랜지 모델에 적용하는 기법을 사용 하였다. 이 두 가지의 해석 기법으로 도출된 결과의 비교를 통하여 해석 결과 신뢰성을 평가하고 효율적이고 합리적인 방법을 제시하고자 하였다.

**keywords** : submodeling, wind turbine, flange, FEM

### 1. 서 론

풍력발전 시스템 지지 구조물인 타워의 플랜지 연결부에 대한 연구는 유럽을 중심으로 많이 진행 되어 왔다. 그러나 현재까지 연구된 결과는 플랜지 국부 모델을 통한 해석 및 실험 연구에 국한 되어 있다. 본 논문에서는 ring-형 플랜지에 실제 발생하는 외부 환경 하중 및 기계적 하중을 접목하여 플랜지 체결용 볼트에 발생하는 하중을 평가하고자 하였다. 해석 방법은 서브모델링 기법을 사용하여 셀 요소로 모델링한 타워의 해석 결과로부터 플랜지 모델의 경계면에 이를 적용하여 계산한 것과 타워를 빔의 형태로 치환하여 계산한 결과를 플랜지 모델에 적용하여 계산한 방법을 사용 하였다. 하중해석은 GH-Bladed를 사용하였으며 구조해석은 Ansys 12.0 을 사용하여 해석 하였다.

\* 정회원 · (사)한국선급 에너지환경사업단 선임연구원 jbwon@krs.co.kr

\*\* 정회원 · (사)한국선급 에너지환경사업단 선임연구원 kslee@krs.co.kr

\*\*\* (사)한국선급 에너지환경사업단 선임연구원 jvpark@krs.co.kr

\*\*\*\* (사)한국선급 에너지환경사업단 단장 mekim@krs.co.kr

\*\*\*\*\* 대우조선해양

\*\*\*\*\* 대우조선해양

## 2. 모델링

타워의 모델링은 빔 형태와 셸형태의 모델을 사용하였으며 플랜지 모델은 3D 솔리드 요소를 사용하여 모델링 하였다. 플랜지 모델에 적용된 체결용 볼트는 빔 요소를 사용하였으며 빔 요소와 플랜지 사이의 체결 조건을 구현하기 위하여 강체 빔 모델을 사용하였다.

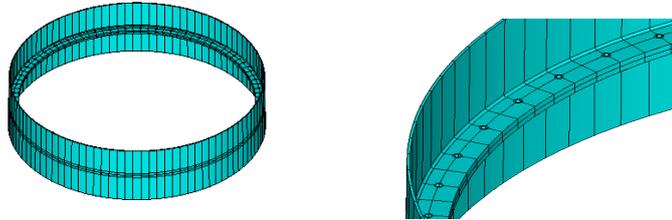


그림 1 Flange 3D Model

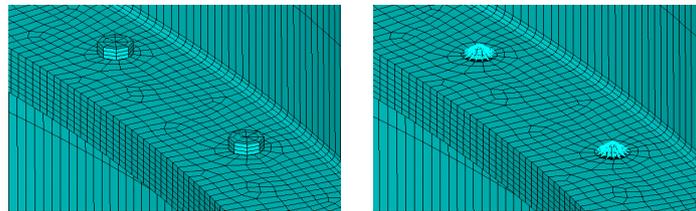


그림 2 Rigid Beam으로 구현된 볼트 체결부

표 1 Material Property

Young's Modulus	$210 \times 10^9 N/m^2$
Density	$7800 kg/m^3$
Poisson's Ratio	0.3

## 3. 유한요소 해석

### 3.1. Submodeling 해석 및 Beam 해석을 통한 거동 결과 적용

플랜지 모델 생성, 유한요소 모델 생성 및 체결 볼트의 적용의 과정을 통해 완성된 해석용 모델에 하중 계산 및 타워 구조해석을 통해 계산된 결과로부터 경계 조건을 적용하는 방법은 다음 그림 3과 같다.

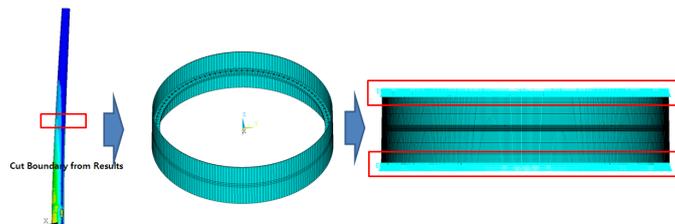


그림 3 Cut Boundary 절차

타워를 빔으로 치환하여 계산 하는 방법의 경우 위의 submodeling 기법과 유사한 과정을 거치며 다른 점은 셀요소의 경계 조건을 가져오는 대신 빔요소를 통해 계산된 타워의 플랜지 위치에 해당하는 절점에서의 거동 결과를 적용하여 해석한다. 타워의 하부의 구속조건은 6 DOF를 구속하였다.

### 3.2. 유한 요소 해석

해석 모델은 볼트가 각각 10개, 100개인 플랜지 모델을 선택 하였으며 이 두 가지의 결과 및 그 경향을 해석 방법에 따라 비교 하였다.

표 2 유한요소 모델 제원(볼트 10EA)

Bolt 10 EA	
Number of Node	171790
Number of Element	156550

표 3 유한요소 모델 제원(볼트 100EA)

Bolt 100 EA	
Number of Node	274400
Number of Element	244720

### 3.3. 해석 결과

#### 3.3.1 Submodeling 해석 결과

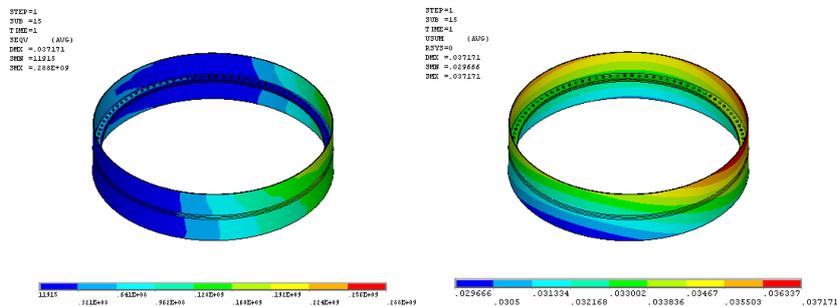


그림 4 Stress and Displacement result(submodeling)

submodeling 해석 결과 응력 및 변위 결과는 위의 그림 4와 같으며 최대 응력값은 288MPa, 최대 변위 값은 0.037m이다. 체결용 볼트에 발생하는 하중 결과를 살펴보면 아래 표 4와 같다. 체결용 볼트에 발생하는 최대 인장력은 볼트가 100개를 기준으로 봤을 때 76200 N이며 전단력 최대 값은 방향에 따라서 각각 3170N, 2090N으로 나타났다. 그 밖의 확인 요소 중 굽힘 모멘트 및 비틀림 모멘트의 경우 위와 같은 플랜지 모델의 경우 상대적으로 매우 작은 값을 가지므로 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

표 4 볼트에 작용하는 요소별 하중 결과(submodeling)

Item	Tension (N)	Shear Force y(N)	Shear Force z(N)	Bending Moment y(N-m)	Bending Moment z(N-m)	Torsional Moment(N-m)	
10	Min.	3641.1	-357.04	-4219.4	-200.96	-173.83	-4.3015
	Max.	1.06E+05	4766.9	2762.9	236.49	213.4	3.4932
100	Min.	567.59	-362.99	-3148.1	-158.96	-134.37	-2.1018
	Max.	76200	3170.1	2090.3	180.23	164.06	0.25679

3.3.2 Beam 해석 결과

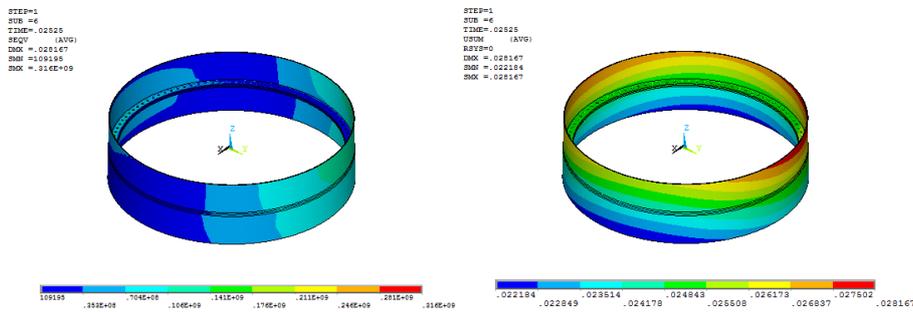


그림 5 Stress and Displacement result (beam)

표 5 볼트에 작용하는 요소별 하중 결과

Item	Tension (N)	Shear Force y(N)	Shear Force z(N)	Bending Moment y(N-m)	Bending Moment z(N-m)	Torsional Moment(N-m)	
10	Min.	2364.6	-3010.3	-28462	-1718.7	-1189.8	-25.336
	Max.	1.23E+05	39636	26566	1684.8	1236.1	8.3463
100	Min.	439.11	-2987.1	-18822	-1001.5	-797.39	-12.151
	Max.	1.01E+05	23277	17307	986.05	805.01	0.27548

Beam 거동 접목 해석 결과 응력 및 변위 결과는 위의 그림 5와 같으며 최대 응력값은 316MPa, 최대 변위 값은 0.028m이다. 체결용 볼트에 발생하는 하중 결과를 살펴보면 아래 표 5과 같다. 체결용 볼트에 발생하는 최대 인장력은 볼트가 100개를 기준으로 봤을 때 101000 N이며 전단력 최대 값은 방향에 따라서 각각 23277 N, 17307 N으로 나타났다. 그 밖의 확인 요소 중 굽힘 모멘트 및 비틀림 모멘트의 경우 위와 같은 플랜지 모델의 경우 상대적으로 매우 작은 값을 가지므로 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

4. 결과 비교

각각의 해석 방법에 따른 도출 결과는 표 7과 같다.

표 6 해석 방법에 따른 최대 결과 값 비교

Item	Tension (N)	Shear Force y(N)	Shear Force z(N)	Bending Moment y(N-m)	Bending Moment z(N-m)	Torsional Moment(N-m)	
sub	10	1.06E+05	4766.9	2762.9	236.49	213.4	3.4932
	100	76200	3170.1	2090.3	180.23	164.06	0.25679
beam	10	1.23E+05	39636	26566	1684.8	1236.1	8.3463
	100	1.01E+05	23277	17307	986.05	805.01	0.27548

위의 표 6에서 보는 바와 같이 각각의 해석 방법에 따라 도출된 결과는 submodeling 기법을 사용한 볼트가 10개인 플랜지의 경우 최대 작용 장력이 106000 N, 방향별 각각의 전단력이 4766.9 N, 2762.9 N으로 나타났으며 볼트가 100개인 플랜지의 경우 최대 작용 장력이 76200 N, 방향별 각각의 전단력이 3170.1 N, 2090.3 N으로 나타났다.

또한 빔의 거동 결과를 적용하여 해석한 볼트가 10개인 플랜지의 경우 최대 작용 장력이 123000 N, 방향별 각각의 전단력이 39636 N, 26566 N으로 나타났으며, 볼트가 100개인 플랜지의 경우 최대 작용 장력이 101000 N, 방향별 각각의 전단력이 13177 N, 17307 N으로 나타났다.

위의 결과를 바탕으로 두 해석 기법간의 차이를 비교하여 보면 두 결과 값 간의 차이가 10개의 볼트를 채

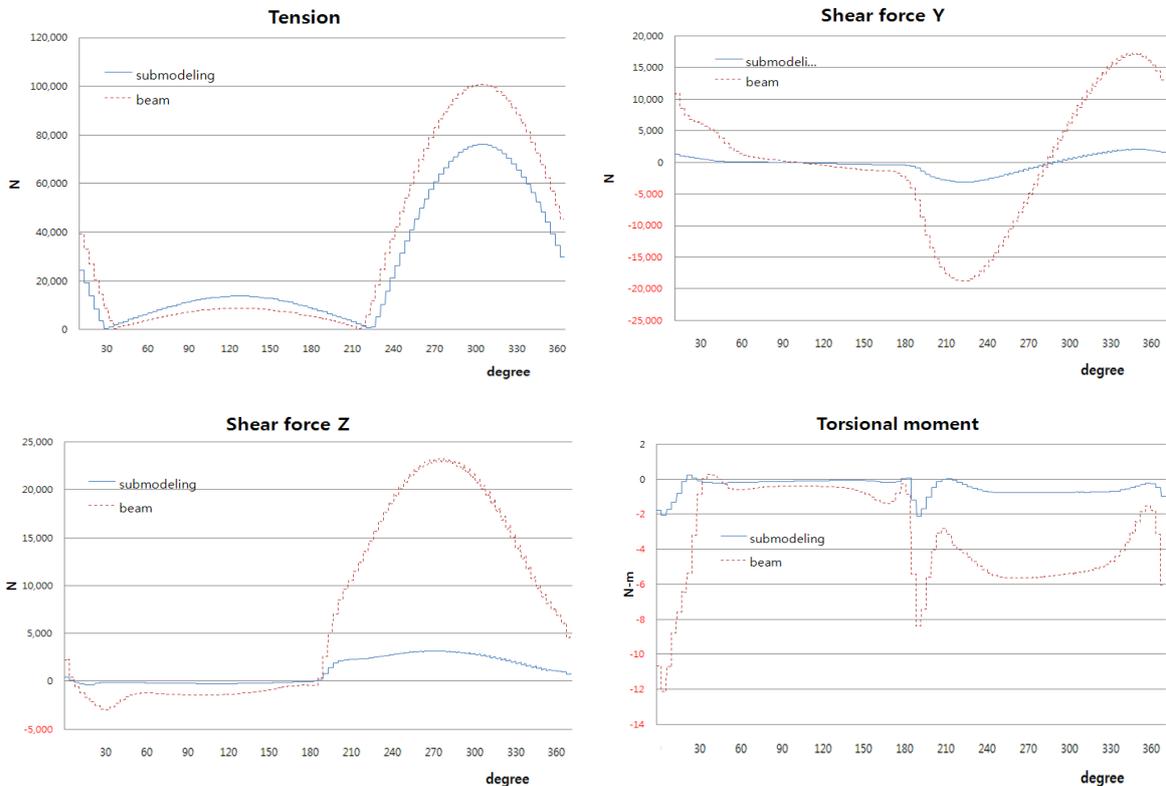


그림 6 볼트 100개 플랜지 해석 결과 비교

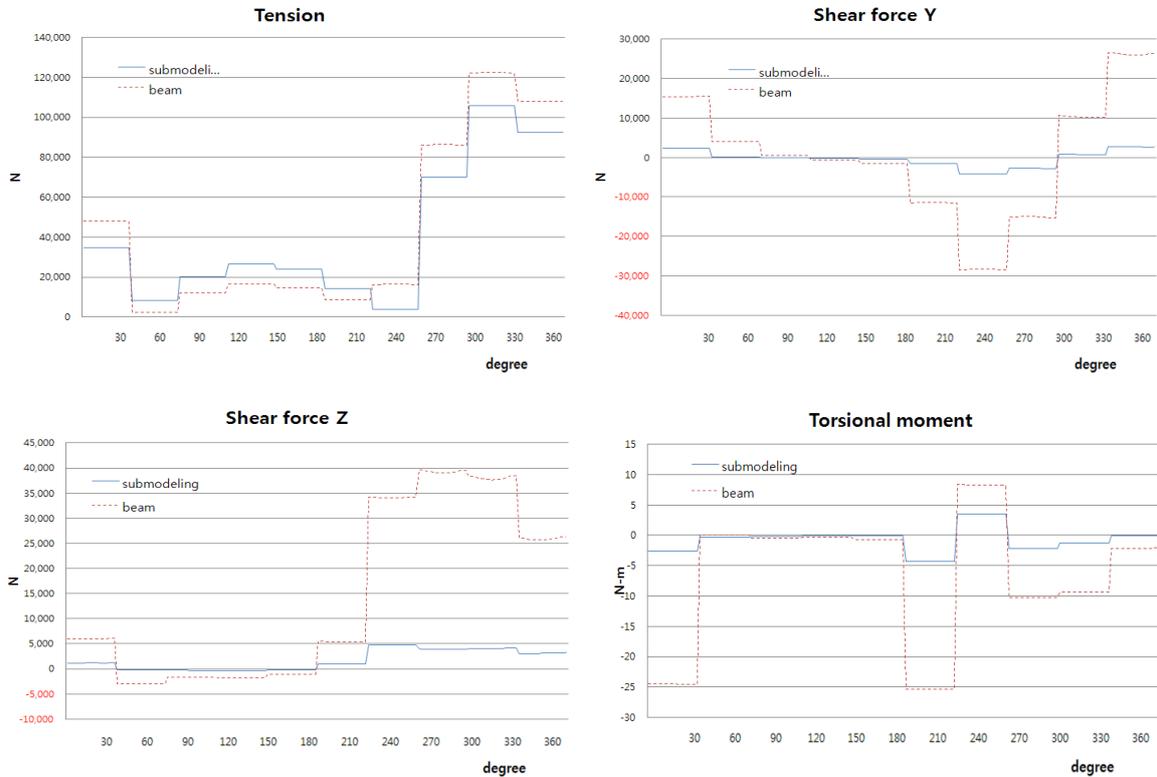


그림 7 볼트 10개 해석 결과 비교

결한 경우 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 장력에서 116%의 차이를 보였으며 방향별 전단력의 경우 각각 831%, 961%의 차이를 보였다. 또한 100개의 볼트를 체결한 경우 장력에서 132%의 차이를 보였으며 방향별 전단력의 경우 각각 734%, 827%의 차이를 보였다. 이는 빔 모델 치환 타워의 결과 값을 방향별 변위 및 각 축의 회전 변위 값을 적용하는 과정에서 Shell 모델과는 적용 방법이 상이한 부분에서 차이를 보이는 것으로 보인다. 일반적으로 submodeling 기법을 사용한 경우 타워의 원통형 셸에서의 결과값을 바탕으로 같은 위치에 위치한 각 모델의 element 대 element로 값이 전달되는 반면 빔 모델의 경우 플랜지 상부 및 하부에 위치한 두 개의 절점에서의 변위 결과값을 플랜지 solid 모델에 일괄 적용 하므로써 부분적으로 과도한 변위가 적용 되었으며 이러한 원인으로 상대적으로 비틀림 변위에 민감한 전단력이 큰 값을 보이는 것으로 판단된다. 반면 이러한 영향으로부터 상대적으로 자유로운 장력의 경우 10개의 볼트가 체결된 플랜지의 경우 116%, 100개의 볼트가 체결된 플랜지의 경우 132%로 그 차이가 작았던 것으로 보인다.

## 5. 결론

본 논문에서는 풍력발전 시스템의 타워 플랜지에 대해 submodeling 기법을 이용한 경우와 빔 형태로 치환하여 결과값을 플랜지에 적용하여 해석한 경우의 비교 및 분석을 통하여 해석 결과 신뢰성을 평가하고 효율적이고 합리적인 방법을 제시하고자 하였으며 결론은 다음과 같다.

- 플랜지 해석의 경우 일반적으로 플랜지를 볼트체결 단위로 세분화 하여 모델링하여 평가하는 방법이 일

반적이거나 본 논문에서는 플랜지 전체를 모델링 하여 해석함으로써 상대적으로 실제거동에 가까운 결과를 도출하고자 하였다.

- 플랜지 해석을 위해 두 가지 해석 기법을 적용하였으며 각각의 해석 결과는 장력에서 볼트 개수 차이별 모델에서 각각 116%, 132% 차이를 보였다.

- 장력을 제외한 방향별 전단력의 경우 10개 볼트 플랜지의 경우 각각 831%, 961%의 차이를 보였으며 100개 볼트 플랜지의 경우 각각 734%, 827%의 차이를 보였다. 이는 빔 모델 치환 타워의 결과 값을 방향별 변위 및 각 축의 회전 변위 값을 적용하는 과정에서 Shell 모델과는 적용 방법이 상이한 부분에서 결과 값의 차이를 보이는 것으로 보인다. 일반적으로 submodeling 기법을 사용한 경우 각 모델의 element 대 element 로 값이 전달되는 반면 빔 모델의 경우 두 개의 절점에서의 변위 결과 값을 플랜지 solid 모델에 일괄 적용함으로써 부분적으로 과도한 변위가 적용 되었으며 이러한 원인으로 상대적으로 비틀림 변위에 민감한 전단력이 큰 값을 보이는 것으로 판단된다.

- 향후 플랜지의 구조 건전성 해석 및 적용 볼트 선택을 위한 구조해석 시 위의 결과 값의 차이를 인지하고 각각의 상황에 맞는 방법을 택하는 것이 중요 하겠다. 특히, 볼트의 인장력 관점에서 접근 시 빔 모델을 사용한 방법을 사용하는 것은 큰 무리가 없겠으나 전단력, 굽힘 모멘트, 비틀림 모멘트 등의 결과를 확인하고자 할 경우 적합하지 않을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 대우조선해양과의 공동연구 개발 과제 결과물의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

한국선급 (2007) 선급 및 강선규칙 제 2 편 재료 및 용접, 한국선급

C. Heistermann. (2009) Flange connection vs. friction connection in towers for wind turbines ,NSCC2009 ,pp.296~303.

Jerome Montgomery. (2002) Methods for Modeling Bolts in the Bolted Joint, Siemens Westinghouse Power Corporation , ANSYS World Users Conference

Bickford, John H. (1995) An Introduction To The Design and Behavior of Bolted Joints, marcel dekker, 3rd edition

VDI 2230 (2001) Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints with One Cylindrical Bolt, Verein Deutscher Ingenieure

T. Fukuoka. (1994) Analysis of the Tightening Process of Bolted Joint With a Tensioner Using Spring Elements, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 116, pp. 443~448.