

## 해상 풍력 발전 JACKET의 고유진동수에 관한 연구<sup>#</sup>

### A Study of Natural Frequency of Offshore Wind Turbine JACKET

이 강 수\* · 이 정 탁\* · 손 충 렬†

Kang-Su Lee, Jung-Tak Lee and Choong-Yul Son

(2006년 9월 26일 접수 ; 2007년 1월 26일 심사완료)

Key Words : Natural Frequency(고유진동수), Offshore Wind Turbine(해상풍력발전기), Added Mass(부가수 질량), Finite Element Method(유한요소법), Thrust Load(추력)

#### ABSTRACT

The purpose of this paper is that investigates the Natural Frequency behavior characteristic of wind turbine jacket type tower model, and calculated that the stress values of thrust load, wave load, wind load, current load, gravity load, etc., environment evaluation analysis during static operating wind turbine jacket type tower model, carried out of natural frequency analysis of total load case to stress matrix, frequency calculated that calculated add natural frequency to stiffness matrix for determinant to stress results. The finite element analysis is performed with commercial F.E.M program (ANSYS) on the basis of the natural frequency and mode shape.

#### 1. 서 론

일반적으로 기존의 shell type의 해상용 풍력발전기 tower의 재료 및 보강재에 따른 고유진동수의 해석적 접근을 통해서 해상용 풍력발전 tower의 일반적인 고유진동수의 예측을 한다. 또한 이를 통해 앞으로 진행될 해상용 풍력발전기의 설계에 있어서 그 방향을 잡고자 한다. 모드 해석 수행에 있어 적용된 하중은 현재 우리나라의 남해안에서 나타나는 해류 및 파고, 풍속 등을 고려하여 그에 맞게 적용하였다.

해상 풍력 발전 jacket type tower에서 고유진동수의 해석적 접근을 예측 하였다. 고유진동수 modeling은 turbine jacket type tower의 형상으로 상단부

와 하단부의 tower의 직경이 0.5 m이고 두께는 0.05 m이다. Tower의 치수는 높이 58.665 m이고 상단부의 넓이는 10 × 10 m, 하단부의 넓이는 21.36 × 21.36 m이다. Offshore 환경의 고려를 위하여 tower에 작용하는 wind load, wave load, current load, gravity load 등을 계산하여 유한요소 프로그램인 ANSYS에 적용하여 모드해석을 통하여 natural frequency값을 도출하였다.

Jacket type tower는 국내 해상 환경에 비슷한 Vietnam south China Sea에 설치되어 있는 4-leg의 steel jacket type tower를 해상 풍력 발전용 jacket 모델로 선정하였고, modeling은 turbine jacket tower의 형상으로 상단부와 하단부의 tower의 직경이 다른 대표적인 해양 철 구조물인 스틸자켓(steel jacket type tower)은 해양자원, 특히 원유나 가스채취에 널리 쓰이고 있다. 현재는 풍력 발전용 타워에도 쓰이고 있는 실정이다.

이 연구에서는 4-log의 jacket type tower을 모델로 선정하였다. 먼저 여수지방 환경의 통계자료를 이용하여 wind force, wave force, current force,

† 책임저자; 정희원, 인하대학교 기계공학부 선박공학  
E-mail : soncy@inha.ac.kr

Tel : (033)860-7338, Fax : (032)864-5850

\* 인하대학교 기계공학부 선박공학

# 이 논문은 2006 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

gravity load 등을 각각 연 최고치를 적용하여 계산하여 jacket type tower에 대한 정적해석을 실시하여 고유진동수 해석의 변화에 대해서 비교해 보았다.

FEM해석의 경우 범용 package 유한요소 해석프로그램인 ANSYS의 3-D 모델링을 통하여 고유진동수 및 모드형상 결과와 하중이 작용하는 상태, 부가수 질량을 고려한 상태의 결과를 비교·검토하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 Blade가 회전하면서 발생시키는 추력

Blade가 회전 하면서 발생 시키는 추력은 날개가 회전할 때 발생하는 동압(dynamic pressure)으로 구할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_F V^2 \quad (1)$$

Where,  $\rho$  : 1.25 공기의 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$C_F$  : 0.64 추력계수

$V$  : 바람의 속도 [m/s]

또는 풍력발전시스템에 작용하는 항력(drag force)으로 구할 수 있다. 항력(drag force)은 tower를 전도시키려고 하고 blade를 후류방향으로 굽히려려고 한다. 회전하고 있는 구조물의 항력을 계산하기 위한 단순화된 공식은 다음과 같다.

$$D = 0.0064 V^2 A \quad (2)$$

Where,  $V$  : 바람의 속도 [m/s]

$A$  : 단면적 [m<sup>2</sup>]

### 2.2 Tower가 바람에 의해 받는 하중

Tower는 beam type의 원통형의 형상을 하고 있으며, 따라서 최대풍속 23 m/s일 때로 가정하고, tower를 각 element 나눈 후 각 element의 단면적을 구하여 tower의 각 element에 작용하는 하중을 구하였다.

$$F_w = \frac{1}{2} \int_{H-h}^H \rho V(Z)^2 \Phi D(Z) C(Z) dz \quad (3)$$

where,  $\rho$  : Air density

$V(Z)$  : Wind speed

$D(Z)$  : Outer tower speed

$C(Z)$  : Form factor

$\Phi$  : Gust factor

또는

$$Q = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (4)$$

Where,  $C_D$  : 1.2(실린더 항력계수)

$\rho$  : 1.25(공기의밀도) [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  : 바람의 속도 [m/s]

$A$  : 바람을 받는 tower의 면적 [m<sup>2</sup>]

2.3 Tower와 나셀 및 날개의 무게에 의한 하중 이 하중은 다음의 식과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$\{\text{날개의 무게(kg)} + \text{나셀의 무게(kg)}\} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

### 2.4 Offshore에서의 하중계산

Offshore에서의 하중계산을 on shore에서의 하중값에 파하중(wave load)을 더해주면 된다. 파랑에 의한 파하중(wave load)를 계산하기 위해서 연근해의 남해 부근 평균수심을 5~10m로 가정하였으며, 설계파고는 최대 10m로 풍속은 23 m/s로 설정했으며, 수평치수( $D$ )와 파장( $L$ )의 비  $D/L$  값이 0.05보다 작기 때문에 Morison formula를 이용하여 파하중(wave load)을 계산하였다. 파하중(wave load)은 구조물의 형상, 주변의 흐름 형태 및 파입자의 속도에 의한 관성력(inertia force)과 표면의 roughness, reynolds number에 한 항력부분으로 나뉘며, 단위 길이당 파하중은 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u^2 + \rho C_m V \frac{du}{dt} \quad (6)$$

Where,  $C_m$  : Inertia 계수

$C_D$  : Drag 계수

$A$  : 단위 면적

$U$  : 물입자 속도

$C_m$ 이나  $C_D$ 은 물체의 형상, 표면상태 및 reynolds number에 따라 결정되는 계수로서, ABS rule에 따라  $C_D$ 값은 0.5,  $C_m$ 값은 1.5로 설정하였다. 위의 식 (4)와 (6)을 이용하여 offshore에서의

파하중(wave load)과 바람의 풍하중(wind load)값을 구하였다.

2.5 Current와 Wave에 의한 복합하중

current와 wave의 합성이 필요한 경우 물입자의 속도와 current의 속도를 vector 합성하여 sea floor로부터 z인 지점의 current와 wave에 의한 force를 다음 식으로 구한다.

$$f_{TD} = \frac{\rho}{2} C_D d A_p (U + u)^2 \quad (7)$$

$f_{TD}$  = Current와 wave의 drag force [KN]

$dA_p$  = Projected unit area [m<sup>2</sup>]

$U$  = Current velocity [m/s<sup>2</sup>]

$u$  = Wave particle velocity [m/s<sup>2</sup>]

3.1 Jacket Type Tower 주요제원

4-leg jacket type tower를 이용하여 정적해석을 수행하였다. Model의 bottom경계조건은 fixed

Table 1 Jacket type tower of analysis model

Top diameter [m]	0.5
Thickness [m]	0.05
Water Depth [m]	10
Jacket Type Tower total length [m]	58.665
Number of leg [pieces]	4
Top dimension [m]	10 × 10
Bottom dimension [m]	21.36 × 21.36

Table 2 property of Leg

Out diameter [cm]	50
Wall thickness [cm]	5
Shear area modulus	0.5
E (Young's modulus) [Kg/sq cm]	2,100×1,000
G (Shear modulus) [Kg/sq cm]	840×1,000
Yield strength [Kg/sq cm]	2450
Density [tonne/m <sup>3</sup> ]	7.85
K factor	1.0

Table 3 property of brace

Out diameter [cm]	40
Wall thickness [cm]	5
Shear area modulus	0.5
E (Young's modulus) [Kg/sq cm]	2,100×1,000
G (Shear modulus) [Kg/sq cm]	840×1,000
Yield strength [Kg/sq cm]	2,450
Density [tonne/m <sup>3</sup> ]	7.85
K factor	1.0

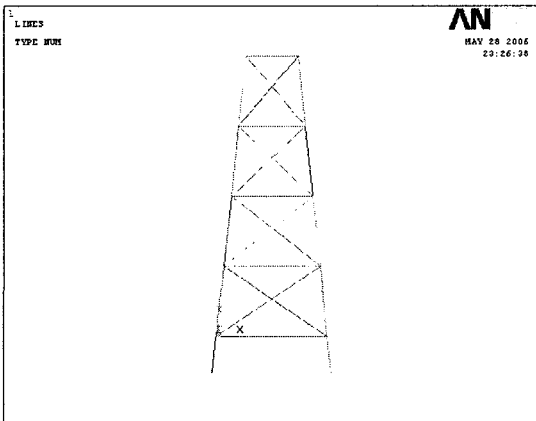


Fig. 1 Model for jacket type tower of ANSYS

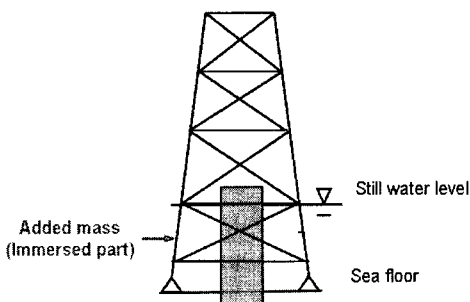


Fig. 2 Added mass(unit length)

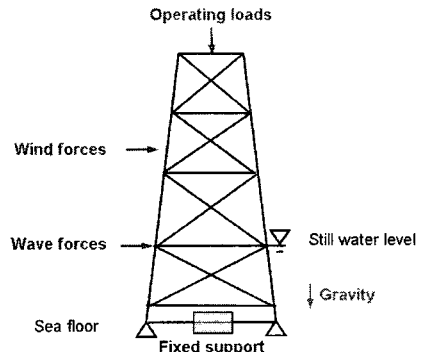


Fig. 3 Load cases와 boundary condition

로 하였다. 분석 model의 주요제원은 Table 1~3과 같다.

### 3.2 Jacket Type Tower 주요제원

Jacket type tower은 높이 58.665m이고 상부 면적은  $10 \times 10$  m, 하부면적은  $21.36 \times 21.36$  m이고 두께는 0.05 m이다. ANSYS 상용프로그램에서 beam 188번(3-D linear finite strain beam)을 사용하였다. 수면 높이는 남해안 지역의 5~10 m 지점으로 하였으며 네 개의 지지점은 fixed 하였다.

## 4. 유한요소해석

유한요소법(finite element method)을 이용한 구조해석에 이 연구 설계에서는 ANSYS 범용패키지 프로그램을 사용하여 모드형상을 분석하였다. 모드형상 결과 부가수질량(added mass)이 적용됨에 따라 고유진동수의 차이의 크기가 작게 나타나는 경향이 발생했다.

높이가 58.665 m이고 상단부의 직경은  $10 \times 10$  m, 하단부의 직경은  $21.36 \times 21.36$  m이고 두께가 0.05 m인 offshore wind turbine jacket type tower에서 외부하중(wind force, wave force, current force, thrust force, gravity force) 작용 및 부가수질량(added mass)의 유무에 따라서 모드형상을 분석한 결과는 Fig. 4부터 Fig. 7과 같다.

### 4.1 Jacket Type Tower 해석 모드형상

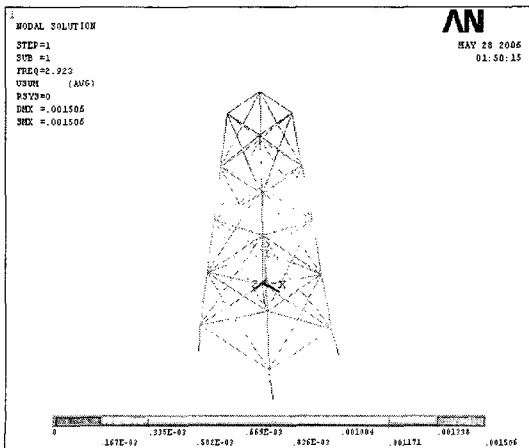


Fig. 4 1st mode shape of jacket type tower

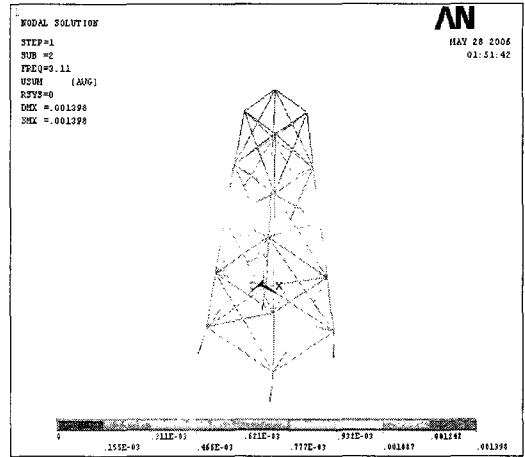


Fig. 5 2nd mode shape of jacket type tower

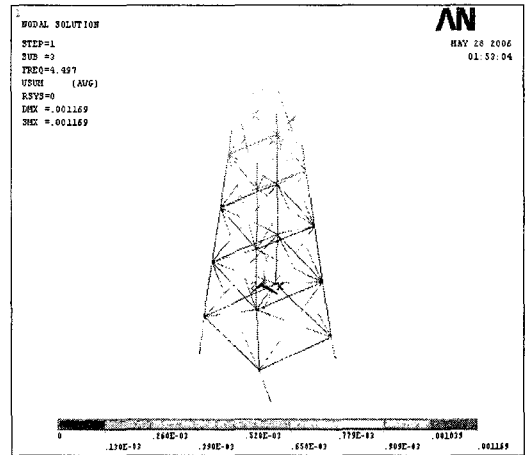


Fig. 6 3rd mode shape of jacket type tower

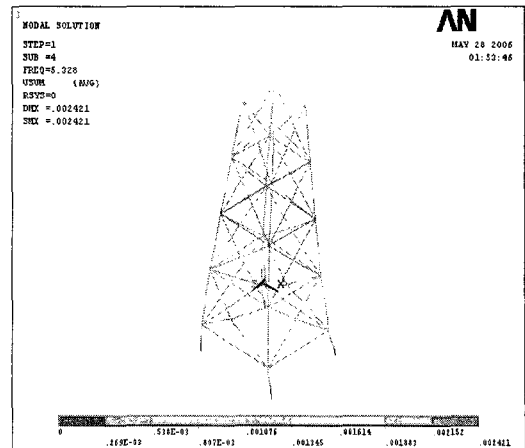


Fig. 7 4th mode shape of jacket type tower

### 4.2 No Operating · No Added Mass

Table 4에서 하중과 부가수질량을 모두 고려하지 않을 시 1차 모드형상에서는 3.1705 Hz, 2차 모드형상에서는 3.4115 Hz, 3차 모드형상에서는 5.3197 Hz이면, 3차 모드형상에서 비틀림 현상이 발생하는 것을 볼 수가 있다. 고차로 가면서 주파수 영역이 높아진 것을 볼 수가 있다. 이는 부재가 가지고 있는 탄성계수(Young's modulus), 밀도, etc. 영향으로 예상된다.

### 4.3 Operating · No Added Mass

Modal test 해석을 수행한 결과 모든 차수 영역 별로 주파수가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 복합 하중이 적용되어 주파수가 낮아진 것으로 Table 4에서 볼 수 있으며, operating · no added mass 조건에서 1차 모드형상 주파수는 3.1688 Hz로 no operating · no added mass 모드형상의 주파수보다 0.05 %로 0.0017 Hz의 주파수가 낮아졌다.

### 4.4 No Operating · Added Mass

이번 모드형상은 해상 풍력 발전 tower의 wind force, wave force, current force, gravity force, etc.을 고려하고 않고 부가수질량만을 고려하여 modal test 해석을 수행한 결과 앞선 두 가지 경우 (no operating · no added mass, operating · no added mass)와 마찬가지로 주파수 영역이 1차에서부터 고차로 갈수록 낮아지는 것을 볼 수 있다. 특히 부가수질량을 적용한 경우가 복합 하중만 적용한 경우보다 주파수가 더 낮아지는 것을 Table 4에서 볼 수 있다. 복합 하중만 적용할 경우 1차 모드형상에서 주파수는 3.1688 Hz이고, 부가수질량만 적용할 경우 1차 모드형상에서 주파수는 약 7.8 % 낮아진 2.9226 Hz이다. 이는 부가수질량이 해상 풍력 발전 jacket type tower에서 복합 하중보다 부가수질량이 주파수에 더 많이 작용한다는 것을 볼 수가 있다.

### 4.5 Operating · Added Mass

마지막으로 복합 하중 및 부가수질량을 모두 고려할 경우의 모드형상을 살펴보았다. 1차 모드형상에서 주파수는 2.9202 Hz이고 2차 모드형상에서 주파수는 3.1075 Hz로 고차 모드형상으로 갈수록 주파수가 높아지는 현상을 볼 수 있지만, 모든 복합 하중과 부가수질량 모두 없는 경우(no operating · no added mass) 보다는 주파수가 작게 떨어지는 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 그리고 복합 하중 및 부가수질량을 모두 고려하지 않았을 경우와 비교하여 보면 1차 모드형상에서 주파수는 약 7.89 % 낮아진 2.9202 Hz이고, 복합 하중과 부가수질량이 적용된 순으로 주파수가 낮아지는 것을 Table 4에서 볼 수가 있다.

여기에서도 마찬가지로 부가수질량이 복합 하중보다 많은 주파수 영역에 작용한다는 것을 볼 수 있으면, 대부분 모드형상 결과 3차 모드형상부터 비틀림 현상이 일어나는 것을 알 수 있다.

1차 모드형상에서 고유진동수가 감소하고 있는 데 이는 유체의 부가수질량이 첨가되어 유체의 접수 고유진동수가 급격하게 감소하기 때문이다. 그리고 유체와 접하는 구조물 사이의 상호작용에 의해서 나타남을 볼 수 있다. 즉, 보의 일부가 유체와 접할 때 접수 면적이 증가함에 따라 유체의 부가수질량이 증

Table 4 Natural frequency of jacket type tower (Unit : Hz)

	No operating, no added mass	Operating, no added mass	No operating, added mass	Operating, added mass
1	3.1705	3.1688	2.9226	2.9202
2	3.4115	3.4098	3.1102	3.1075
3	5.3197	5.3148	4.4966	4.4907
4	6.0408	6.4028	5.3275	5.3225
5	6.4927	6.4898	5.5243	5.5197

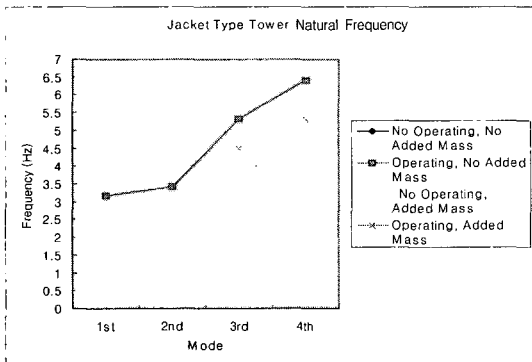


Fig. 8 Natural frequency of jacket type tower

가하게 되고 이로 인해 접수 고유진동수가 감소하게 된다. 강성 증가에 비하여 질량영향이 월등히 큰 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

Jacket type tower의 1차에서 4차 모드형상을 분석하여 보면 하중 적용과 부가수질량의 적용의 유무에 따라 주파수의 변화가 발생 하였으며 이는 모든 경우에서 동일하게 발생하는 경향을 보이고 있으며 하중의 영향으로는 주파수의 큰 영향을 주지 못하지만 부가수질량으로 인해 주파수가 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 또한 각각의 하중과 부가수질량 유무를 고려한 결과 3차 이상의 모드형상에서 비틀림이 발생하였다.

해양구조물(offshore structure)를 해상용 풍력 발전 jacket type tower 모델에 적용하므로 해서 주파수, 모드형상 및 고유진동수에 대한 해석적 접근을 통해 해상용 풍력 발전 jacket type tower에 사용 가능함을 확인하였다.

이 논문에서는 앞으로 해상 풍력 발전 tower는 청정에너지로서 밝은 미래에 대해 무한한 가능성을 갖고 있으며 새로운 기술 분야로 확립되어야 하며, 더 큰 용량의 해상 풍력 발전 타워에 이 논문의 경향을 적용하므로 해서 앞으로 해상 풍력발전기 tower의 설계 시 각각의 재료 및 tower의 특성에

따라 보강재를 고려한 형태 및 치수에 관해 동역학적인 연구가 좀 더 고려하여야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Gunter Clauss, Eike Lehmann, Carsten Østergaard, 1995, "Meerestechnische Konstruktionen".
- (2) Thomas H. Dawson, "Offshore Structural Engineering", Prentice-Hall.
- (3) Gerwick, B. C., 1986, "Construction of Offshore Structures", John Wiley & Sons, Inc.
- (4) Sircar, S., Chandra, T. and Manguno, S., 1990, "Transportation Launch and Self-upend Analysis of the Kilauea Jacket Using Proven Analytical Techniques", Offshore Tech. Conf.
- (5) Ministry of Science & Technology, 1985, "Development of Design Technology of Offshore Platforms for Offshore Oil Production (Jacket Type Tower Structure Design)", KAIST.
- (6) Korean Register, 1991, "Ship Noise and Vibration Control General".
- (7) Son, C. Y., Lee, K. S. and Won, J. B., 2005, "An Analytical Approximation for Natural Frequency Offshore Wind Turbine Tower", Korea Wind Energy Association, pp.103~107.