

# 해상 풍력 발전용 Tower의 고유 진동 해석에 관한 연구

## Study for Natural Frequency of Offshore Wind Turbine Tower

원종범† · 이강수\* · 손충렬\*\*

Jong-Bum Won, Kang-Su Lee and Choong-Yul Son

**Key Words** : Offshore, Wind Turbine, Tower, Natural Frequency, Added mass, stiffener, FRP, Steel

### ABSTRACT

The Object of this paper which study for natural frequency of Offshore Wind Turbine Tower with Composite Material and Steel. The Composit Material Tower consist of shell type and stiffened shell type which is made by the method of Filament Winding. And the component of Composite material is used by the Roving RS220PE-535. The Steel Material Tower consist of shell type and stiffened shell type which is made of Mild steel. The Type of Stiffener is hats.

This paper compare the Composit Material Offshore Wind Turbine Tower with the Steel Material Offshore wind Turbine Tower and study for Natural Frequency and Mode Shapes.

### 1. 서 론

본 연구에서는 기존의 Shell type의 해상용 풍력 발전기 Tower의 재료 및 보강재에 따른 고유 진동수의 해석적 접근을 통해서 해상용 풍력 발전 Tower의 일반적인 고유 진동수의 예측을 목적으로 한다. 또한 이를 통해 앞으로 진행될 해상용 풍력 발전기의 설계에 있어서 그 방향을 잡고자 한다. 모드 해석 수행에 있어 적용된 하중은 현재 우리나라의 서해안에서 나타나는 해류 및 파고, 풍속 등을 고려하여 그에 맞게 적용 하였다. 비교 형태는 복합재료를 이용한 해상용 풍력 발전 Tower와 보강재를 추가한 복합재료 Tower, Steel을 이용한 Tower와 보강재를 추가한 Steel Tower 네 가지이다.

Modeling은 Tubular Tower의 형상으로 상단부와 하단부의 Tower의 직경이 다른 Shell type을 채택하였다. Tower의 치수는 높이 18m이고 상단부의 직경은 0.65m 하단부의 직경은 0.75m이며 두께는 15mm이다.

Offshore 환경의 고려를 위하여 Tower에 작용하는 복합 하중을 계산하여 유한요소 프로그램인 Ansys에 적용하여 모드해석을 통하여 Natural Frequency 값을 도출 하였다.

복합 재료 Tower의 경우 복합재료의 하나인 Roving RS220PE-535의 물성치를 사용하였으며 Steel의 경우 Mild Steel의 물성치를 사용 하였다. Stiffened Steel Tower의 경우 앞에서 언급한 Tower와 동일한 치수를 사용 하였으며 보강재는 Hat형으로 Ring Type의 보강재로 치수가 폭이 0.15m, 높이가 0.1m, 두께가 15mm인 Stiffener를 하단으로부터 각각 5m 높이에 원형의 보강을 하는 것으로 설계하였다.

이 네 가지 모델을 통하여 부가수 질량과 외부 하중의 유무를 통하여 각각의 경우의 수에 대하여 모드해석을 시행하였다.

이를 통하여 각 재료에 따른 고유 진동수의 비교와 또한 보강재의 유무에 따른 진동수의 변화에 대해서 비교해 보았다.

† 인하대학교 선박공학대학원 석사과정  
E-mail : won0331@hotmail.com  
Tel : (032)860-7338, Fax : (032) 864-5850

\* 인하대학교 선박공학대학원 박사과정

\*\* 인하대학교 기계공학부 교수

### 2. 이론적 고찰

#### 2.1 재료의 선택 및 물성치 (Material Properties)

Tower의 제작에 주로 사용되는 재료로는 Steel,

Wood, 복합재료 등이 있다. 본 연구에서는 복합재료 Roving RS220PE-535와 Steel의 물성치를 이용하여 설계를 수행 하였다. 사용한 복합재료의 물성치는 Table.1과 같으며, Table.2 는 규격 KS D 4101-90, SC410으로 만들어진 Steel의 물성치 이다.

Table.1 복합재료의 Material Properties

Glass 함량 (%)	두께 (mm)	인장 탄성 계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	만곡 탄성 계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	압축 강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	인장 전단 강도 (kg/mm <sup>2</sup> )
80.8	3.03	5130	4795	67.3	1.22

Table.2 강(Steel)의 Material Properties

밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	인장 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	Poisson's Ratio	항복응력 (MPa)
7850	200	77	0.29	400

2.1 하중의 계산

(1) Blade가 회전 하면서 발생시키는 추력

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

$$P = \frac{1}{2} \rho C_F V^2 \tag{1}$$

여기서,  $\rho$ : 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 굽히려고 한다. 회전하고 있는 구조물의 항력을 계산하기 위한 단순화된 공식은 다음과 같다.

$$D = 0.0064 V^2 A \tag{2}$$

여기서  $V$  : 바람의 속도(m/s)

$A$  : 단면적(m<sup>2</sup>)

(2) Tower가 바람에 의해 받는 하중

Tower는 Shell Type의 원통형 외팔보의 형상을 하고 있다. 따라서 최대 풍속이 23m/s일 때로 가정하

고, Tower를 3m 간격으로 Section을 나눈 후 각 Section의 단면적을 구하여 Tower의 각 Section에 작용하는 하중을 구한다.

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

여기서  $\rho$  : Air Density

$V(Z)$  : Wind Speed

$D(Z)$  : Outer Tower Speed

$C(Z)$  : Form Factor

$\Phi$  : Gust Factor

또는

$$Q = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \tag{4}$$

여기서  $C_D$  : 1.2 (실린더 항력계수)

$\rho$  : 1.25(공기의 밀도)(kg/m<sup>3</sup>)

$V$  : 바람의 속도 (m/s)

$A$  : 바람을 받는 Tower의 면적 (m<sup>2</sup>)

(3) Tower와 나셀 및 날개의 무게에 의한 하중

이 하중은 다음의 식과 같이 간단히 구할 수 있다.

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

(4) 파에 의한 하중(Wave Load)

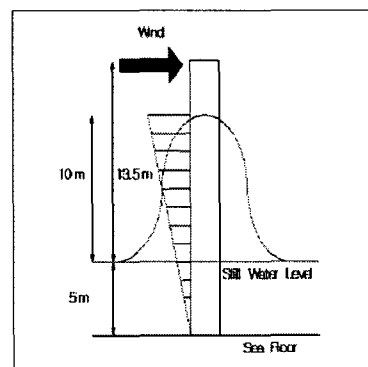


Fig1. Cantilever Beam Model of Tubular Tower

파랑에 의한 하중(Wave Load)을 계산하기 위해서 연근해의 평균 수심을 5m로 가정하였으며, 설계파고는 10m로 풍속은 23m/s로 설정했다.

파의 수령치수(D)와 파장(L)의 비 D/L 값이 0.05보다 작기 때문에 Morison Formula를 이용하여 파

하중(Wave Load)을 계산한다. 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.

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

여기서  $C_m$  : 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.

### 3. 유한 요소 해석

유한 요소법(Finite Element Method)을 이용한 구조해석에 본 연구 설계에서는 Ansys 범용패키지 프로그램을 사용하여 모드해석을 실시하였다. 해석 결과 복합재료(Young's Modulus : 20~50GPa)에 비해 강(Steel, Young's Modulus : 210GPa)에서 탄성계수(Young's Modulus)값이 크기 때문에 모드에 따른 고유 진동수가 크게 발생 하였다. 다음으로 강(Steel, Young's Modulus : 210GPa)보다 보강재로 보강된 강(Stiffened Steel)이 강성이 높아서 하중과 부가수 질량 미적용 상태에서는 고유진동수가 높게 나타났다. 그러나 부가수 질량(Added Mass)이 적용됨에 따라 고유 진동수의 차이의 크기가 작게 나타나는 경향이 발생했다.

보통 Stiffener의 경우 구조물의 강성을 높이기 위하여 보강하는 것이다. 그러나 이 경우 부가수 질량이 고려된 모드 해석임을 고려 할 때 Stiffener로 인해서 접수 면적이 증가해서 보강재가 없는 경우 보다 부가수 질량(Added Mass)의 영향이 크게 발생한 것으로 보인다.

높이가 18m이고 상단부의 직경이 0.65m 하단부의 직경이 0.75m 이고 두께가 15mm인 타워의 Offshore에서 외부 하중의 작용 및 부가수 질량(Added Mass)의 유무에 따라서 모드해석을 수행한 Ansys 해석결과는 다음과 같다.

### 3.1 FRP

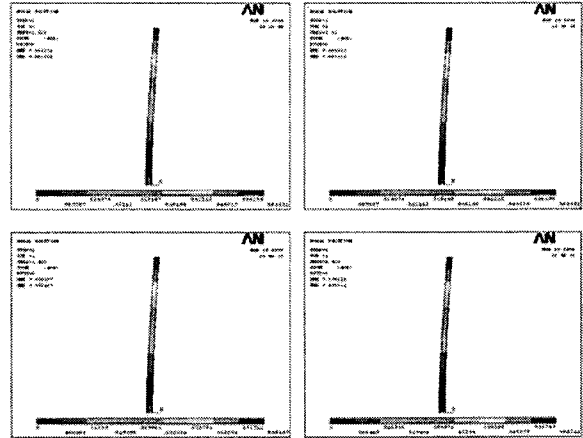


Fig.2 FRP를 사용한 Tower의 Ansys 모드해석 결과

Table.3 FRP를 사용한 Tower의 고유진동수

Mode	하중, 부가수 질량 미적용	하중 적용, 부가수 질량 미적용	하중 미적용 부가수 질량 적용	하중 부가수 질량 적용
1	1.528	1.159	1.433	1.424
2	8.893	8.884	4.383	4.378
3	23.927	23.913	9.336	9.137
4	31.065	31.033	12.661	12.659

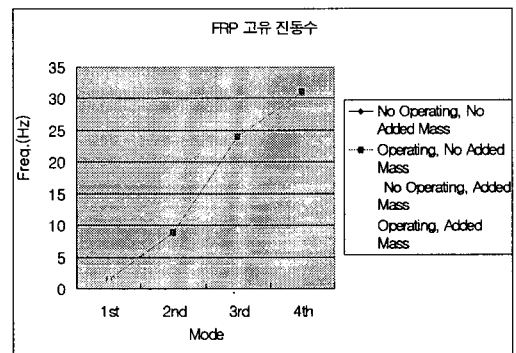


Fig.3 FRP를 사용한 Tower의 고유진동수

### 3.2 Stiffened FRP

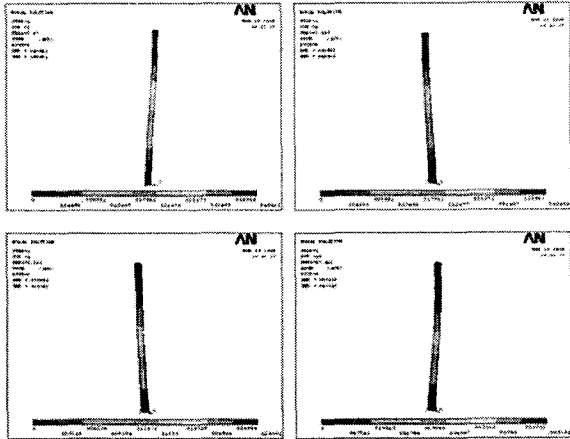


Fig.4 Stiffened FRP를 사용한 Tower의 Ansys 모드해석 결과

### 3.3 Steel

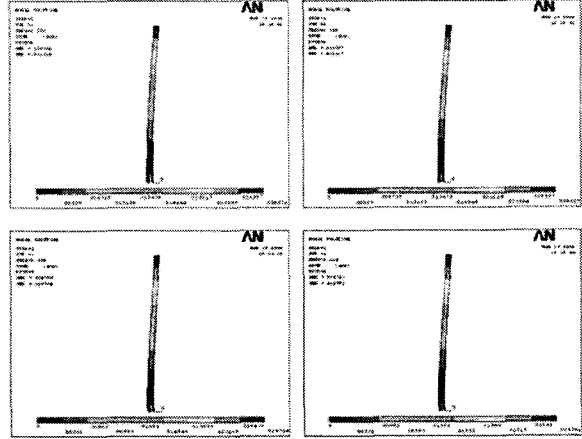


Fig.6 Steel을 사용한 Tower의 Ansys 모드해석 결과

Table.4 Stiffened FRP를 사용한 Tower의 고유진동수

Mode	하중, 부가수 질량 미적용	하중 적용, 부가수 질량 미적용	하중 미적용, 부가수 질량 적용	하중 부가수 질량 적용
1	2.421	2.416	2.165	2.161
2	10.273	10.267	4.986	4.983
3	24.476	24.468	10.114	10.096
4	43.857	43.848	13.761	13.757

Table.5 Steel을 사용한 Tower의 고유진동수

Mode	하중, 부가수 질량 미적용	하중 적용, 부가수 질량 미적용	하중 미적용, 부가수 질량 적용	하중 부가수 질량 적용
1	2.372	2.367	2.338	2.333
2	13.800	13.796	10.685	10.682
3	37.127	37.122	24.183	24.179
4	48.202	48.179	28.778	28.774

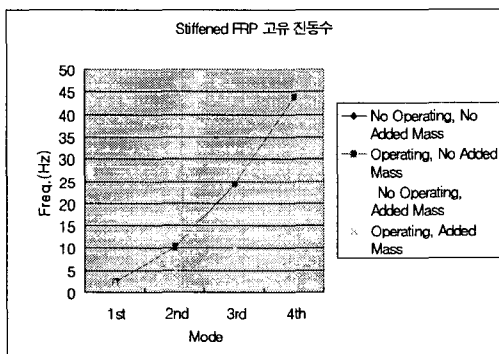


Fig.5 Stiffened FRP를 사용한 Tower의 고유진동수

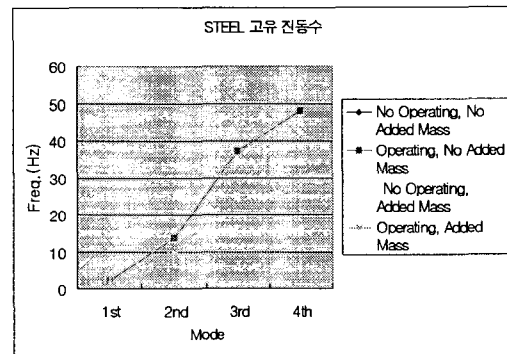


Fig.7 Steel을 사용한 Tower의 고유진동수

### 3.4 Stiffened Steel

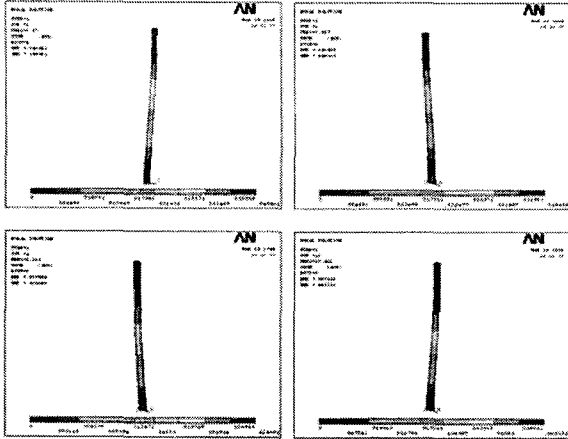


Fig.8 Stiffened Steel 사용한 Tower의 Ansys 모드해석 결과

Table.6 Stiffened Steel를 사용한 Tower의 고유진동수

Mode	하중, 부가수 질량 미적용	하중 적용, 부가수 질량 미적용	하중 미적용, 부가수 질량 적용	하중 부가수 질량 적용
1	3.970	3.967	3.221	3.218
2	13.379	13.374	6.365	6.362
3	26.533	26.525	10.240	10.229
4	39.75	39.749	16.799	16.796

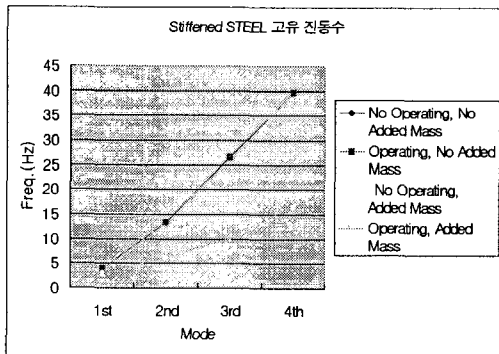


Fig.9 Stiffened Steel를 사용한 Tower의 고유진동수

### 4. 결과 분석

#### 4.1 FRP 와 Stiffened FRP의 비교

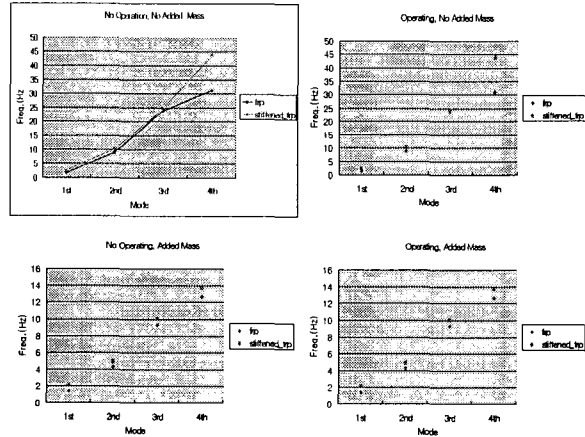
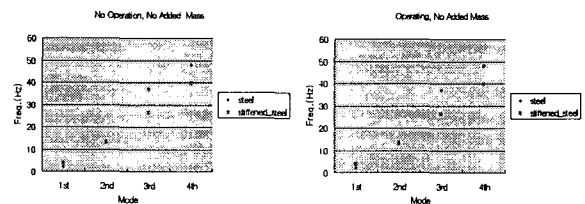


Fig.10 FRP 와 Stiffened FRP의 고유진동수 비교

해상용 풍력 발전기 Tower의 풍속, 파, 부가수 질량, 자중 등을 고려하여 유한요소 범용 패키지 Software인 Ansys를 통하여 모드해석을 수행한 결과 복합재료(FRP)와 보강재를 사용한 복합재료(Stiffened FRP)의 경우 모든 하중이 배제된 경우, 복합 하중이 적용된 경우, 부가수 질량이 적용된 경우, 복합 하중과 부가수 질량이 모두 적용된 순으로 주파수가 낮아졌다. 또한 복합 하중 보다 부가수 질량 적용한 경우 그 감소 비율이 2차 모드 이상에서는 약 2~3배 정도 더 크게 나타났다. FRP Tower와 Stiffened FRP Tower의 고유 진동수는 1차 모드에서 Dry 상태에서는 1.528[Hz], 2.421[Hz]로 나타났으며 하중과 부가수 질량이 적용된 경우 1.424[Hz], 2.161[Hz]로 각각 나타났다. 이는 보강재로 인해 강성이 증가 하여 주파수 크게 나타난 것을 의미하며 부가수 질량이 적용되게 되면 그 영향으로 인해 그 증가 비율이 상대적으로 감소하는 것을 보여준다.

#### 4.2 Steel 과 Stiffened Steel의 비교



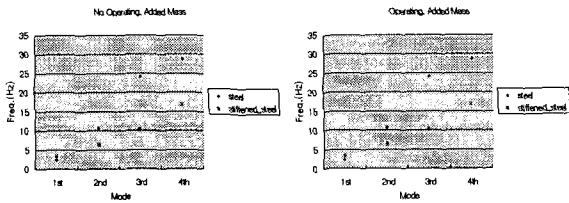


Fig.11 FRP 와 Steel의 고유진동수 비교

Steel Tower와 Stiffened Steel Tower의 경우도 마찬가지로 모든 하중이 배제된 경우, 복합 하중이 적용된 경우, 부가수 질량이 적용된 경우, 복합 하중과 부가수 질량이 모두 적용된 순으로 주파수가 낮아졌다. 또한 복합 하중 보다 부가수 질량 적용한 경우 그 감소 비율이 2차 모드 이상에서는 약 2~3배 정도 더 크게 나타났다. Steel Tower와 Stiffened Steel Tower의 고유 진동수는 1차 모드에서 외부하중과 부가수 질량이 미 적용된 상태에서는 2.372[Hz], 3.970[Hz]로 나타났으며 하중과 부가수 질량이 적용된 경우 2.333[Hz], 3.218[Hz]로 각각 나타났다. 이는 보강재로 인해 강성이 증가 하여 주파수 크게 나타난 것을 의미하며 부가수 질량이 적용되게 되면 그 영향으로 인해 그 증가 비율이 상대적으로 감소하는 것을 보여준다. 그러나 위의 Fig.11 에서와 같이 Steel의 경우 FRP와는 다르게 3차 이상의 모드에서는 부가수 질량이 적용 됨에 따라 주파수가 오히려 역으로 나타나는 경향을 보인다. 이는 보강재로 인해 접촉면적이 증가하여 부가수 질량의 영향이 상대적으로 크게 발생한 것으로 보인다.

### 4.3 FRP 와 Steel의 비교

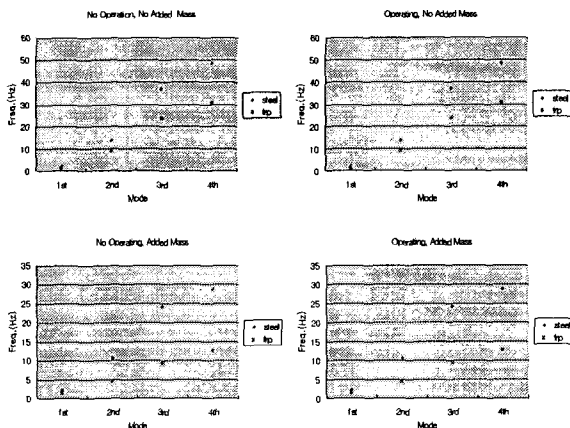


Fig.12 FRP 와 Steel의 고유진동수 비교

FRP와 Steel의 1차에서 4차 모드 까지 모두 강성이

상대적으로 큰 Steel에서 높은 주파수가 발생 하였다. 모두 하중의 적용과 부가수 질량의 적용의 유무에 따라 주파수의 변화가 발생 하였으며 이는 모든 경우에서 동일하게 발생하는 경향을 보이고 있으며 하중의 영향으로는 주파수의 큰 영향을 주지 못하지만 부가수 질량으로 인해 주파수가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다.

### 4. 결론

위의 결과들을 종합해 보면 보강재가 없는 복합재료(FRP)와 강(Steel)의 관계에서 보여 진 바와 같이 강성이 클 경우 고유 진동수는 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 복합재료(FRP)와 Stiffened FRP의 관계에도 그 강성이 증가하여 주파수가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Steel과 Stiffened Steel의 관계에서는 부가수 질량의 유무에 따라 보강재로 인하여 접촉 면적이 증가하여 오히려 고유 진동수가 낮아지는 현상을 보였다. 이것으로 봤을 때 FRP와 Steel의 경우 모두 부가수 질량이 주파수 변화에 큰 인자로 작용을 하지만 Steel의 경우가 그 영향이 상대적으로 더 큰 것으로 보인다.

이 연구는 앞으로 만들어질 더 큰 용량의 풍력 발전기용 타워에 본 해석의 경향을 적용하기 위한 이었으며 이를 위해 앞으로 해상 풍력 발전기 Tower의 설계 시 각각의 재료 및 Tower의 특성에 따라 동적 거동 측면에서 보강재의 형태 및 치수에 관해 좀 더 많은 연구가 필요하다고 하겠다.

### 참 고 문 헌

- (1) M.H.Geier, 1997, Quality Handbook for Composite Materials, CHAPMAN HALL.
- (2) Max Irvine, 1996, STRUCTURAL DYNAMICS, London UNWIN HYMA..
- (3) M.C.Cheney, 1999, Guide for Design of Wind Turbine , DNV/Riso in technical co-operation.
- (4) David A. Spera, 1994, Wind Turbine Technology, NEW YORK ASME PRESS.
- (5) Martin O. L. HANSEN, 1995, Aerodynamics of Wind Turbines, Technical University of Denmark.
- (6) Daryl L. Logan,1998, "Logan의 유한 요소법", 시그마프레스.
- (7) 이재신,1996, "해양구조물 설계요소", 한국해양대학교.
- (8) 안상욱,1999, "기계공학방법", 북두 출판사.