

# 해저지반-구조물 상호작용을 고려한 해상풍력발전타워의 진동특성

## A Study on the vibration characteristics of offshore wind turbine tower including seabed soil-structure interaction

이정탁\* · 이강수\*\* · 손충렬† · 박종빈\*\*\*

Jung-Tak Lee, Kang-Su Lee, Choong-Yul Son, Jong-Vin Park

**Key Words** : Offshore Wind Turbine(해양풍력발전), Soil-Structure Interaction(지반-구조물 상호작용), Natural Frequency(고유진동수), Finite Element Method(유한요소법)

### ABSTRACT

Offshore wind turbine are subjected to more various loads than general land structures and the stability of structures is supported by the piles driven deeply in the subsoil. So it is more important for offshore structures to consider seabed soil-structure interaction than land structures. And the response of a fixed offshore structure supported by pile foundations is affected by resist dynamics lateral loading due to wave forces and ocean environmental loads. In this study, offshore wind tower response are calculated in the time domain using a finite element package(ANSYS 11.0). Several parameters affecting the vibration characteristics of the natural frequency and mode shape and the tower response have been investigated.

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

지난 10여 년간 신·재생에너지 사용이 증가되면서 2년 전부터 해상 풍력 에너지의 이용에 대한 관심이 증가되고 있다. 현재 국내에도 풍력발전단지 건설이 활발히 이루어지고 있고 육상뿐만 아니라 해상에도 풍력 발전기가 건설될 전망이다. 해양구조물은 외부수압, 바람, 파도, 해류, 조수, 빙하, 지진 및 각종 기계설비로부터의 하중을 받는다. 해양구조물의 파괴는 해양오염 및 해양자원개발의 손실뿐 만아니라 인명재산피해까지 이어 질 수 있으므로, 이의 구조적 안정성은 구조물의 설계와 관리에 있어서 아주 중요한 부분이다.

해상에서의 구조물들은 육상에서의 구조물들 보다 다양하고 큰 하중들이 작용하고 있기 때문에 구조물의 정확한 진동해석이 복잡하다. 특히, 구조물을 지지해주는 지반이 영향을 주기 때문에 해상구조물에 대한 거동 해석시 지반을 고려한 지반-구조물계에서 전체적인 상호작용 해석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 해상풍력발전기타워의 진동특성 해석을 위해서 해저 지반층을 모형화하고 유한요소와 경계조건을 적용하여 해저지반-구조물계에 상호작용을 고려한 연구를 수행한다. 또한 해양구조물 같은 접수구조물의 진동해석은 육상 구조물과는 달리 일부 또는 전체가 물과 접해있기 때문에 유체-구조 상호작용을 파악해야만 가능하다. 해상에서는 풍하중과 추력 이외에 파하중, 조류하중, 유체의 영향에 의한 부가수질량 등을 고려해야 한다.

풍력터빈의 타워구조분야에서 현재까지 이루어진 해석적 연구들은 풍력터빈 날개와 타워와의 질량과 강성 등에 기초한 상호작용해석이 주를 이루었다. 그러나 해상에 설치되는 풍력터빈의 경우 진동특성에 영향을 주는 입력변수의 불확실성이 다양하기 때문에 실제 조건을 고려한 해석이 이루어져야 된다.

본 논문에서는 유한요소해석 범용프로그램인 ANSYS

† 손충렬; 인하대학교 기계공학부 선박공학과  
E-mail : soncy@inha.ac.kr  
Tel : (032) 860-7338, Fax : (032) 864-5850

\* 인하대학교 기계공학부 선박공학과

\*\* 한국선급 에너지 산업기술팀

\*\*\* 스테츠집백

11.0을 사용하여 3-D 모델을 만들고 해양 구조물에서의 부가수질량(Added Mass)과 외부하중(Wind Load / Wave Load)을 적용하고 해저지반-타워의 상호작용을 고려한 해상풍력발전기의 진동특성 연구를 목적으로 한다.

## 2. 해양 환경 하중

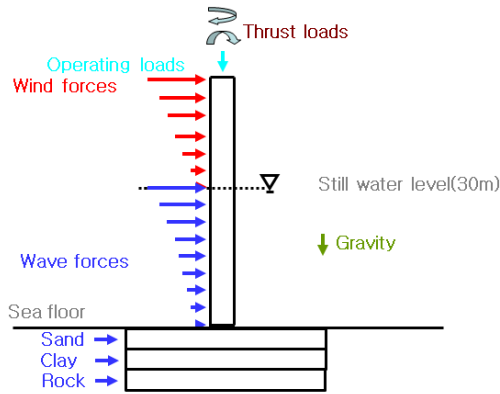


Fig.1 Load & Boundary Conditions

### 2.1 풍하중 (Wind Load)

해상풍력발전기 타워는 원통형의 형상을 하고 있으며, 풍속은 일반적인 cut-in speed인 5m/s를 기준으로 하였고 각각의 타워구조물의 부재에 적용되었다.

보통 경도풍고도(Gradient Wind Level)은 평활지역(Open Terrain)에서 275m에 이르므로 일반적으로 해상구조물은 경계층 안에 포함된다고 볼 수 있다. 경계층의 풍속 분포(Wind Profile)를 나타내는 데는 보통 식(1)과 같은 Power Law를 쓰고 있다.

$$V_z = V_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^a \quad (1)$$

여기서,  $V_z$  = 높이 z에서의 풍속,

$V_{10}$  = 높이 10m에서의 풍속

a = Sea state, 육지로 부터의 거리, 설계풍속의 지속성에 따라 결정

### 2.2 추력하중(Thrust Load)

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

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

여기서,  $\rho$  : 1.25 공기의 밀도 [ $kg/m^3$ ]

$C_F$  : 0.64 추력계수

$V$  : 바람의 속도 [m/s]

또는 풍력발전시스템에 작용하는 항력(Drag Force)으로 구할 수 있다. 항력(Drag Force)은 타워를 전도시키려고 하고 날개를 후류방향으로 굽히려려고 한다. 회전하고 있는 구조물의 항력을 계산하기 위한 단순화된 공식은 다음과 같다.

$$D = 0.0064 V^2 A \quad (3)$$

여기서,  $V$  : 바람의 속도 [m/s]

$A$  : 단면적 [ $m^2$ ]

### 2.3 파하중 (Wave Load)

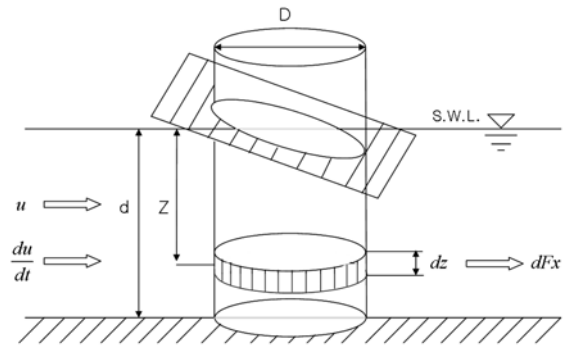


Fig.2 Drag force of cylinder

$$F_{Tm} = F_{im} + F_{dm} \quad (4)$$

$$= \int_{-d}^{\eta} \rho C_I \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} dz + \int_{-d}^{\eta} \frac{\rho}{2} C_D u |u| D dz \quad (5)$$

여기서,

$F_i$  = Inertia Force

$F_d$  = Drag Force

$C_I$  = Inertia 계수

$C_d$  = Drag 계수

$A$  = 단위 면적

$U$  = 물입자 속도

### 2.4 타워와 나셀 및 날개의 무게에 의한 하중

이 하중은 다음의 식과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$\{\text{날개의 무게(kg)} + \text{나셀의 무게(kg)}\} \times 9.8 m/s^2 \quad (6)$$

여기서, 나셀 : 풍력발전기의 바람 에너지를 전기에너지로 전환하는 엔진달개

## 2.5 조류하중(Current Load)

조류와 파의 합성이 필요한 경우 물입자의 속도와 조류의 속도를 벡터 합성하여 해저로부터 z인 지점의 조류와 파에 의한 힘을 다음 식으로 구한다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} f_{TD} &= \text{조류와 파의 항력} && [KN] \\ dA_p &= \text{projected unit area} && [m^2] \\ U &= \text{유속} && [m/s^2] \\ u &= \text{wave particle velocity} && [m/s^2] \end{aligned}$$

## 2.6 부가수질량(Added Mass)

$$M_a = 2T / U^2 \quad (8)$$

여기서,  $M_a$  = 부가수질량

U = Velocity of the Body

T = Kinetic Energy

즉, 이 부가수질량은 유체 내의 유동에 의해서 생기는 가상적인 질량으로서, 물체의 모양, 방향, 운동경로에 따라 달라진다.

## 2.7 점수효과

유동이 없는 유체속에 놓인 보의 고유진동수  $f_{nF}$ 는 부가질량 효과에 의하여 공기속에서의 고유진동수  $f_{nA}$ 보다 낮아진다. 균일 단면보에 대해 이를 식으로 표현하면

$$f_{nF} = \frac{f_{nA}}{\sqrt{1 + \frac{m_v}{m}}} \quad (9)$$

여기서,  $m$  : 보의 단위길이당 질량  
 $m_v$  : 단위길이당 부가질량

단위길이당 부가질량  $m_v$ 는 진동방향을 기준으로 한 보의 단면형상에 따라 다르다. 전형적인 여러단면에 대한 2차원 부가질량에 보인 바와 같은데  $m_v$ 는 동표의 값에 3차원 수정계수를 곱하여 산정한다.

## 3. 3차원 해석 모델

### 3.1 관모양 타워의 주요제원

Table 1. Dimensions of Tower

Station	Height (m)	Diameter (m)	Thickness (mm)
1	0	5.663	18
2	20.5	4.953	18
3	20.5	4.953	16
4	41	4.243	16
5	41	4.243	14
6	61.5	3.533	14
7	61.5	3.533	12
8	82	2.823	12

Table 2 Mass of structures

Blade mass (kg)	4790.23
Hub mass (kg)	17628
Total Rotor mass (kg)	31998.7
Nacelle mass (kg)	52839
Tower mass (kg)	130990
Total Turbine mass (kg)	215828

Table 3 Material Property

Sand	Young's Modulus	620e6 N/m <sup>2</sup>
	Density	1900 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson's Ratio	0.3
Clay	Young's Modulus	170e6 N/m <sup>2</sup>
	Density	1700 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson's Ratio	0.3
Rock	Young's Modulus	960e7 N/m <sup>2</sup>
	Density	2400 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson's Ratio	0.3
Steel	Young's Modulus	210e9 N/m <sup>2</sup>
	Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson's Ratio	0.3
Foundation (Concrete)	Young's Modulus	20e9 N/m <sup>2</sup>
	Density	2400 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson's Ratio	0.167

### 3.2 관모양 타워의 모델링

모델링은 관모양 타워의 형상으로 상단부와 하단부의 타워의 직경이 다른 Shell 유형을 채택하였다. 타워의 치수는 높이 82m이고 상단부의 직경은 3m 하단부의 직경은 6m이다. Soil 조건은 Sand와 Clay 두께는 각각 30m이고 Rock 두께는 40m이다. (Fig.3 ~ Fig.5)

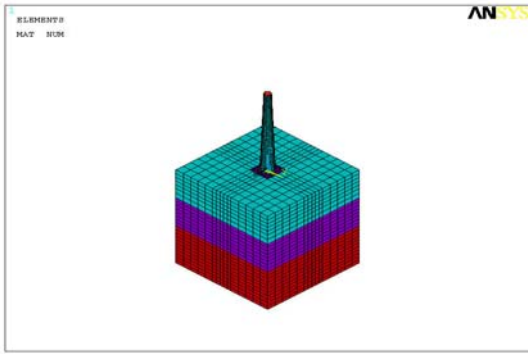


Fig. 3 FE Model of Tubular Type Tower

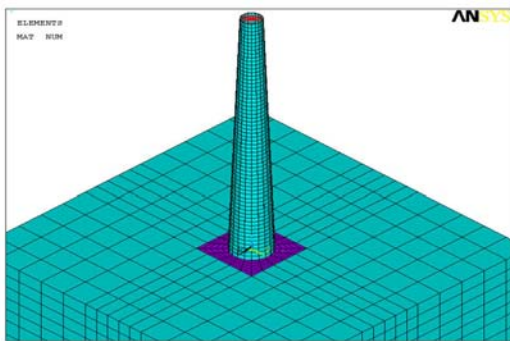


Fig. 4 FE Model of Tubular Type Tower

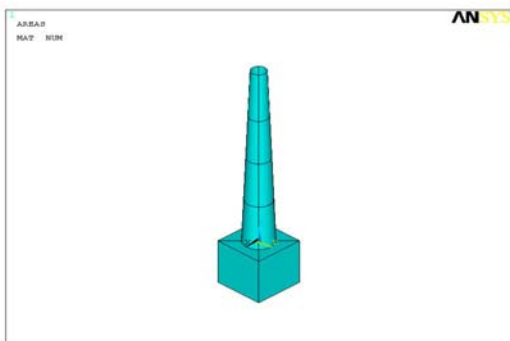


Fig. 5 FE Model of Tubular Type Tower

#### 4. 유한 요소 해석

지반-타워-구조물 상호작용계에서 해상구조물의 동적해석을 수행하기 위해서 해양환경모델링을 모형화하여 진동특성을 얻을 수 있었다.(Fig.4 ~ Fig.7)

##### 4.1 All fixed Type Tower(이하 Type 1)

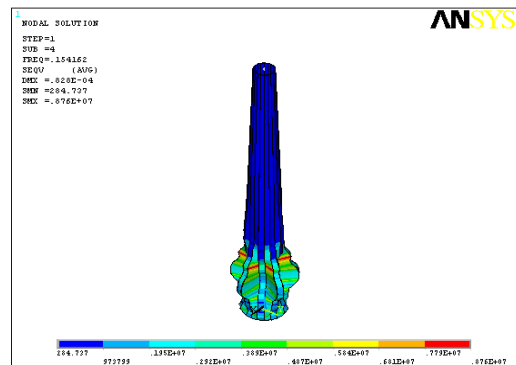
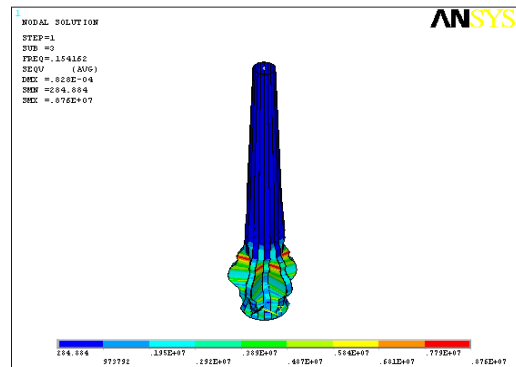
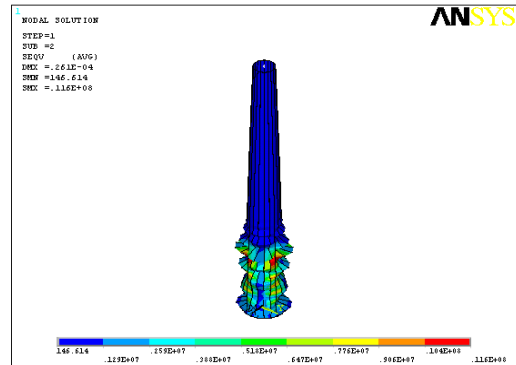
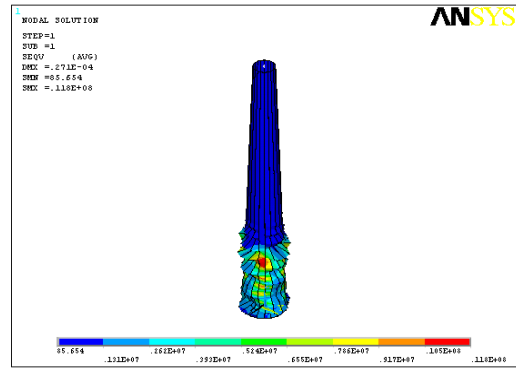


Fig. 6 Mode shape of All fixed

#### 4.2 Sand Clay Rock(SCR) of Type Tower(이하 Type 2)

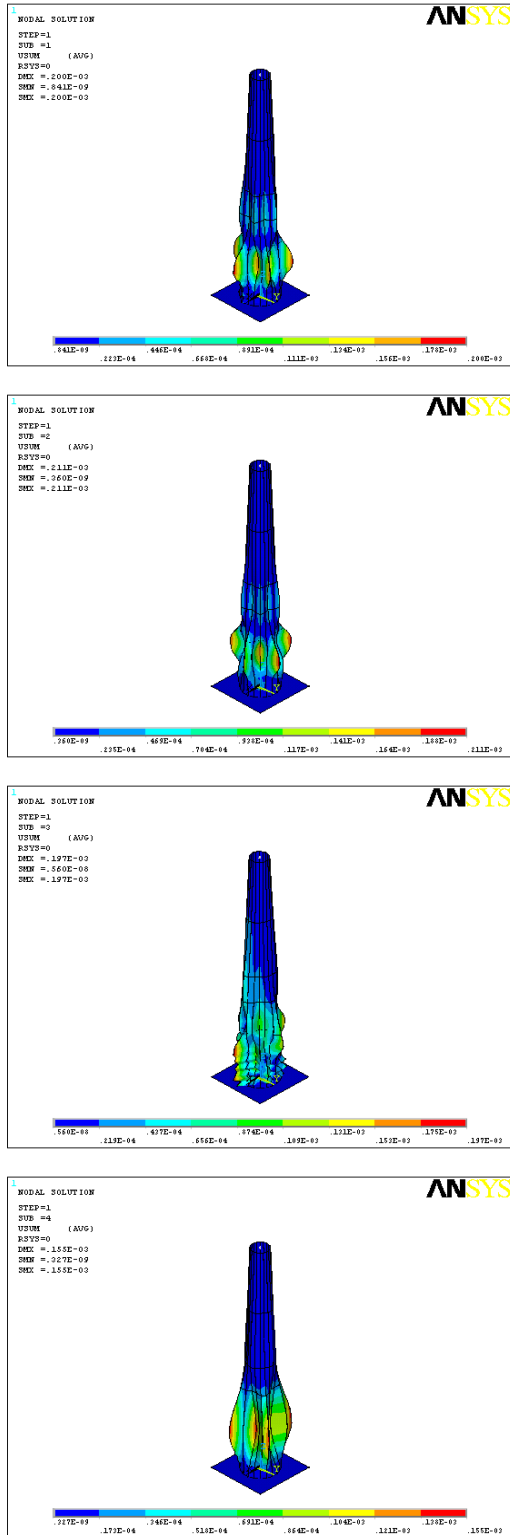


Fig. 7 Mode shape of SCR

#### 4.3 Sand Sand Rock(SSR) of Type Tower(이하 Type 3)

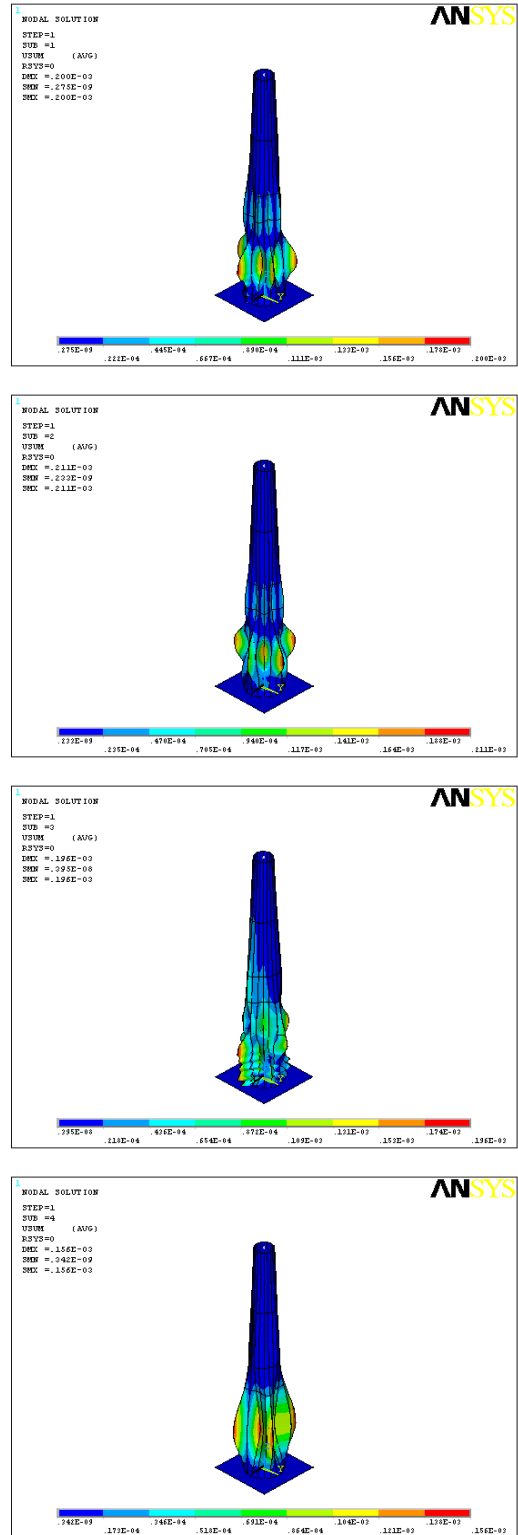


Fig. 8 Mode shape of SSR

#### 4.4 Clay Clay Rock(CCR) of Type Tower(이하 Type 4)

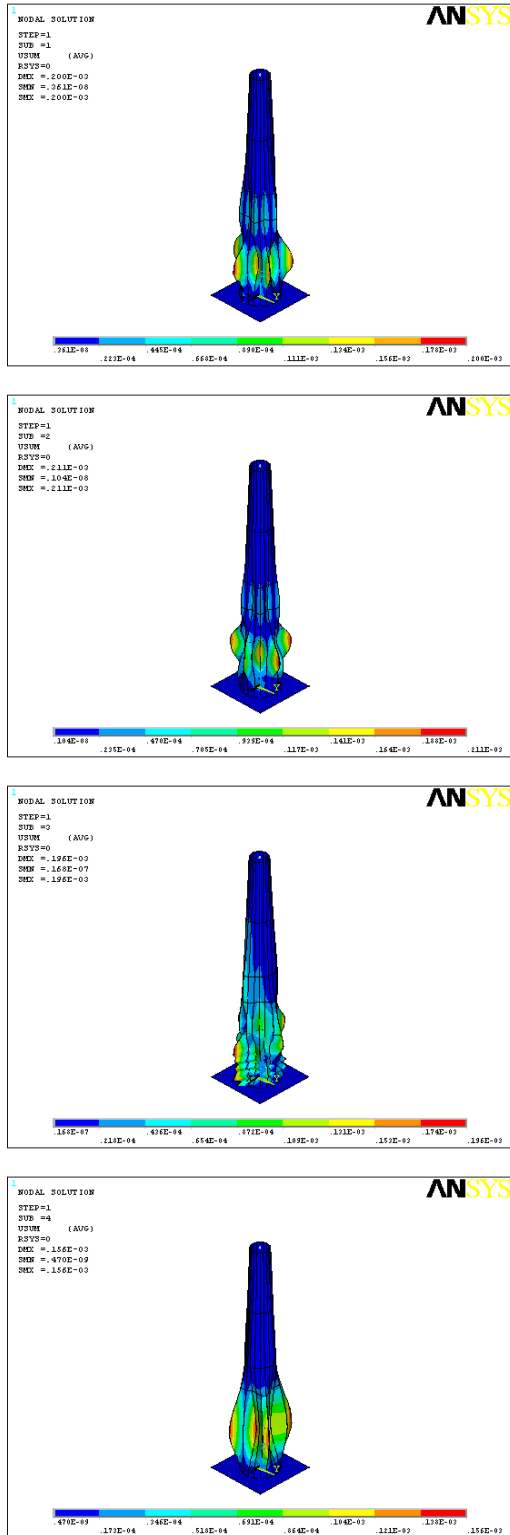


Fig. 9 Mode shape of CCR

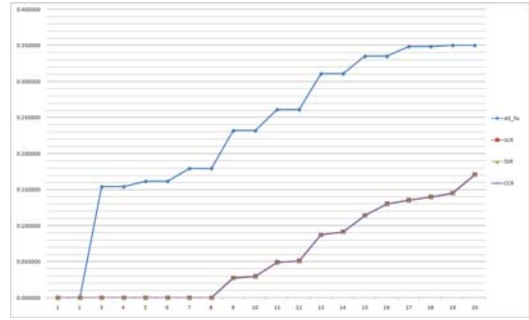


Fig. 10 Natural Frequency of Type Tower

Table 4 Natural Frequency of Type tower  
(Unit : Hz)

	All_fixed	S.C.R.	S.S.R.	C.C.R.
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.154160	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.154160	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.161600	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.161600	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.179530	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.179530	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.231810	0.027378	0.027432	0.027422
10	0.231810	0.029807	0.029869	0.029855
11	0.261070	0.049300	0.049315	0.049311
12	0.261070	0.051033	0.051067	0.051063
13	0.310960	0.087305	0.087414	0.087400
14	0.310970	0.091621	0.091692	0.091686
15	0.335130	0.114250	0.114320	0.114310
16	0.335130	0.130320	0.130510	0.130490
17	0.348610	0.135220	0.135530	0.135480
18	0.348610	0.139830	0.139840	0.139820
19	0.350280	0.145190	0.145200	0.145170
20	0.350280	0.170650	0.170850	0.170770

해석 결과 지반 고정하였을때의는 저차에서 모드와 진동수는 근사적으로 구하게 되었고 Soil 조건을 고려했을때는 고차에서의 모드와 진동수가 발생하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 지반-타워-구조물 상호 작용계에서 해상 구조물의 동적해석을 수행하기 위해서 해양환경 모델링을 모형화하여 진동특성을 얻을 수 있었다. 상호작용계는 Soil 조건에 따라 외부영역 하중과 유한요소법을 이용한 내부여역을 조합하여 지반-타워-구조물 상호작용 동적응답해석을 해석하였다.

해상 타워 구조물을 대상으로 하여 지반-타워-구조물 상호작용계의 효과를 알아보기 위하여 구조물을 여러 지반 하중 조건하에 상부구조물의 진동 해석을 수행하였고, 지반의 탄성계수에 따른 고유진동수 값을 비교해 보았다. 그 결과 해안 지반 조건을 고려하지 않은 지반 고정에서의 고유진동수는 저차에서 발생함을 확인하였고, 지반 조건을 고려한 고유진동수는 고차에서 발생함을 확인하였다. 이와 같은 결과로부터 해상풍력타워 구조물의 정확한 동적해석을 위해서는 지반, 구조물의 상호작용을 고려한 동적거동해석이 수행되어야함을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Thomas H. Dawson, "Offshore Structural Engineering", Prentice-Hall, 1983
- (2) Ministry of Science & Technology, "Development of Design Technology of Offshore Platforms for Offshore Oil Production(Jacket Type Tower Structure Design)", KAIST, 1985
- (3) Ben C. Gerwick, "Construction of Offshore Structures", John Wiley & Sons, Inc, 1986
- (4) S. Sircar, T. Chandra, S. Manguno, "Transportation Launch and Self-Upend Analysis of the Kilauea Jacket Using Proven Analytical Techniques" Offshore Tech. Conf., 1990
- (5) David A. Spera, " Wind Turbine Technology", NEW YORK ASME PRESS. 1994
- (6) Gunter Clauss, Eike Lehmann, Carsten Östergaard, "Meerestechnische Konstruktionen", 1995
- (7) Max Irvine, "Structural dynamics", London UNWIN HYMA, 1996
- (8) Korean Register, "Ship noise and vibration control general", 1991
- (9) Martin O. L. HANSEN, "Aerodynamics of Wind Turbines", Technical University of Denmark, 1995
- (10) M.H.Geier, "Quality Handbook for Composite

Material", CHAPMAN HALL, 1997

(11) M.C.Cheney, "Guide for Design of Wind Turbine"

, DNV/RISO in Technical co-operation, 1999

(12) Lee Kang Su, "Effects of Various Stiffeners on Offshore Steel Jacket Strength", A Master's thesis, AH University of Korea, 2000.02

(13) Choong Yul Son, Kang Su Lee, Jong Bum Won, "An Analytical Approximation for Natural Frequency Offshore Wind Turbine Tower", Korea Wind Energy Association, 2005, pp. 103-107

(14) Kang Su Lee, Jung Tak Lee, Choong Yul Son, "A Study of Natural Frequency of Offshore Wind Turbine JACKET", Korean Society for Noise and Vibration Engineering , pp. 130~135, 2007.