

해상 풍력 발전용 Tubular와 Jacket Type Tower의 진동 특성에 관한 연구

A Study on the Frequency Characteristics of Tubular and Jacket Type Tower for Offshore Wind Turbine Tower

이 강 수† 이 정 탁* 손 충 렬** 김 건 훈***
Lee, Kang-Su Lee, Jung-Tak Son, Choong-Yul Kim, Keon-Hoon
(논문접수일 : 2007년 월 일 ; 심사종료일 : 2007년 월 일)

요 지

풍력 발전 분야는 앞으로 에너지 대란에 있어서 이를 해결해 줄 중요한 돌파구 중의 하나이다. 지금까지 연구되어 온 풍력발전기의 Tower에 대한 분야는 정적인 해석에 그치고 있다. 본 연구에서는 타워의 형태를 크게 두 가지 Tubular Type와 Jacket Type으로 정하고 이것에 대한 각각의 특성을 파악하며, 그 경향을 찾아내 이를 실제 설계 및 제작에 적용하고자 하였다. 본 논문에서는 타워의 모드별 고유진동수를 파악하고 이것에 대한 특성을 연구하였으며, 작동 중 발생하는 하중과 해상 설치 시 작용하는 부가질량의 영향에 대하여 고려하여 그 특성을 파악하였고 두가지 유형의 타워의 특성을 비교하여 그 경향을 예측 할 수 있었다.

핵심용어 : 풍력 발전용 타워, 고유진동수, 부가질량, 유한요소법

Abstract

Wind power generation is one of the promising gateways that will solve the energy crisis in the future. The wind power generator studied so far is limited to static interpretation in the areas related to tower. This study broadly sets the form of tower as tubular and jacket, identifies the characteristics of each and aims to find and apply their trend to in actual design and manufacturing process. This paper identified the resonance frequency of tower at each mode and studied their features. Furthermore, this study identified the characteristics of the load that occurs in operation and the effect of additional mass incurring when installed in sea, and it compared the two types of tower and was able to predict their trend.

Keywords : wind tower generator, natural frequency(resonance frequency), added mass, FEM(Finite Element Method)

1. 서 론

일반적으로 해상 풍력 발전기용 타워의 경우 원통형과 자켓형 타워가 많이 쓰이고 있다. 본 연구에서는 원통형(Tubular Type)와 자켓형(Jacket Type)의 타워의 고유진동수의 해석적 접근을 통해서 해상용 풍력 발전기용 타워의 일반적인 고유진동수 예측할 수 있도록 그 경향을 파악하고, 이를 통해 앞으로 진행될 해상 풍력 발전기의 설계에 있어서

그 방향을 잡고자 한다. 모드 해석 수행에 있어 적용된 하중은 현재 우리나라 서해안에서 나타나는 해류 및 파고, 풍속 등을 고려하여 그에 맞게 적용하였다. 비교 형태는 복합재료와 강철(Steel)을 사용한 원통형 타워와 강철을 사용한 자켓형 타워이다. 먼저 원통형의 경우 복합재료와 강철에 따라 작용하는 외부 하중 및 부가질량에 따른 고유진동수 해석 및 그 경향을 파악하고, 강철 자켓형 타워 또한 작용하는 외부 하중 및 부가질량에 따른 고유진동수 해석을 통하여 원통형

† 책임저자, 정회원 · 인하대학교 대학원 선박공학과 박사과정
Tel: 032-860-7338 : Fax: 032-864-5850
E-mail: kslee@inhaian.net

* 인하대학교 대학원 선박공학과 박사과정

** 정회원 · 인하대학교 기계공학부 교수

*** 한국에너지기술연구원 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Material Properties of FRP

Glass Content (%)	Thickness (mm)	Tensile Modulus of Elasticity(kg/mm ²)	Bend Modulus of Elasticity(kg/mm ²)	Compressive Strength(kg/mm ²)	Tensile Shear Strength(kg/mm ²)
80.8	3.03	5130	4795	67.3	1.22

Table 2 Material Properties of STEEL

Density (kg/m ³)	Tensile Modulus of Elasticity(GPa)	Shear Modulus of Elasticity(GPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)
7850	200	77	0.29	400

과 자켓형의 경향 및 그 특성의 차이를 확인한다.

2. 이론적 고찰

2.1 재료의 선택 및 물성치(Material Properties)

타워의 제작에 주로 사용되는 재료로는 강철, 목재(Wood), 복합재료 등이 있다. 본 연구에서는 복합재료 Roving RS220 PE-535와 강철의 물성치를 이용하여 설계를 수행하였다. 사용한 복합재료의 물성치는 Table 1과 같으며, Table 2는 규격 KS D 4101-90, SC410으로 만들어진 강철의 물성치이다.

2.2 하중의 계산

2.2.1 Blade가 회전하면서 발생하는 추력(Thrust)

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

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

여기서, ρ : 1.25 공기의 밀도(kg/m³)

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 블레이드를 후류방향으로 굽히려는 힘이다. 회전하고 있는 구조물의 항력을 계산하기 위한 단순화된 공식은 다음과 같다.

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

여기서, V : 바람의 속도(m/s)

A : 단면적(m²)

2.2.2 풍하중(Wind Load)

타워는 Shell 유형의 원통형 외팔보의 형상을 하고 있다. 따라서 최대 풍속이 23m/s일 때로 가정하고, 타워를 3m 간격으로 Section을 나눈 후 각각의 구획(Section) 단면적을 구하여 타워의 각 구획에 작용하는 하중을 구한다.

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

여기서, ρ : Air Density

$V(Z)$: Wind Speed

$D(Z)$: Outer Tower Speed

$C(Z)$: Form Factor

Φ : Gust Factor

또는

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

여기서, C_D : 1.2 (실린더 항력계수)

ρ : 1.25(공기의 밀도)(kg/m³)

V : 바람의 속도 (m/s)

A : 바람을 받는 Tower의 면적 (m²)

2.2.3 타워의 나셀(Nacelle) 및 날개의 무게에 의한 하중(Self Gravity)

이 하중은 다음의 식과 같이 간단히 구할 수 있다.

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

여기서, Nacelle : 풍력발전기의 바람에너지를 전기에너지로 전환하는 엔진덮개

2.2.4 해상(Offshore)에서의 파하중(Wave Load)

해상에서의 하중계산을 육상에서의 하중값에 파하중을 더 해주면 된다. 파하중을 계산하기 위해서 연근해의 남해 부근

평균 수면 높이를 5~10m로 가정하였으며, 설계파고는 최대 10m로 풍속은 23m/s로 설정했으며, 수평치수(D)와 파장(L)의 비 D/L값이 0.05보다 작기 때문에 모리슨 식(Morrison Formula)을 이용하여 파하중을 계산하였다. 파하중은 구조물의 형상, 주변의 흐름 형태 및 파입자의 속도에 의한 관성력(Inertia Force)과 표면거칠기(Surface Roughness), 레이놀즈 수(Reynolds Number)에 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, 표면거칠기 및 레이놀즈 수에 따라 결정되는 계수로서, ABS Rule에 따라 C_D 값은 0.5, C_m 값은 1.5로 설정하였다. 위의 식 (4)과 (6)을 이용하여 해상에서의 파하중과 바람의 의한 하중(Wind Load) 값들을 Fig. 1와 Fig. 2에서 보듯이 구하였다.

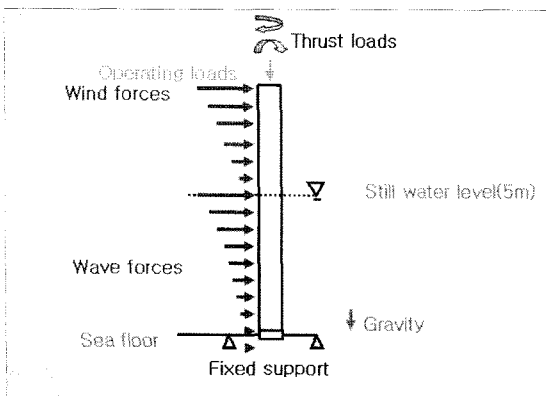


Fig. 1 원통형의 하중 및 경계조건

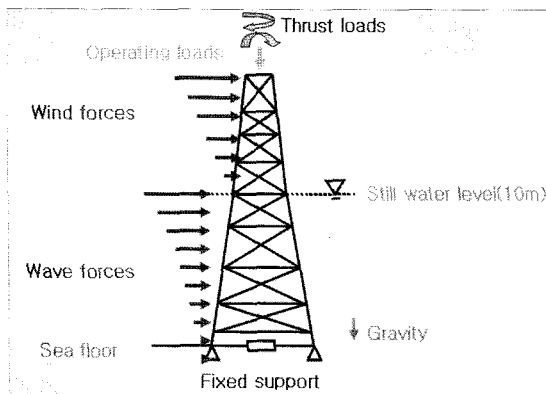


Fig. 2 자켓형의 하중 및 경계조건

2.2.5 해상(Offshore)에서의 부가질량(Added Mass)
해상 구조물처럼 유체 내에서 물체가 움직일 때, 그 물체 주위의 유체도 따라서 움직이게 된다. 이때 물체를 움직이기 위해서 물체 뿐만 아니라 유체의 운동에너지(Kinetic Energy)까지 증가시키기 위한 일을 해주어야 한다. 여기서, 유체의 유동을 일으키는데 필요한 에너지를 유속의 제곱과 가상적인 질량의 곱으로 생각할 수 있는데, 이때의 가상적인 질량을 부가질량이라고 하며 구조물의 동적해석을 위한 모형화를 할 때 포함시켜야 한다.

$$M_a = \frac{2T}{U^2} \quad (7)$$

여기서, M_a : Added Mass

U : Velocity of the Body (Fluid Velocity)

T : 운동에너지 (Kinetic Energy)

즉, 이 부가질량은 유체 내의 유동에 의해서 생기는 가상적인 질량(겉보기 질량)으로서, 물체의 모양, 방향, 운동경로에 따라 달라진다.

2.2.6 접수효과

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

$$f_{nF} = \frac{f_{nA}}{\sqrt{1 + \frac{m_v}{m}}} \quad (8)$$

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 부가질량수에 보인 바와 같은데 m_v 는 동표의 값에 3차원 수정계수를 곱하여 산정한다.

3. 해석 모델

3.1 원통형과 자켓형 타워의 주요제원

원통형 타워의 제원과 자켓형 타워의 제원의 아래와 같이 Table 3와 Table 4이다.

Table 3 원통형 타워의 제원

Top Diameter(m)	0.65
Bottom Diameter(m)	0.75
Thickness(mm)	15
Height(m)	18
Water Depth(m)	5

Table 4 자켓형 타워의 제원

Top Diameter(m)	10 × 10
Bottom Diameter(m)	21.36 × 21.36
Thickness(mm)	5
Height(m)	58.665
Water Depth(m)	10

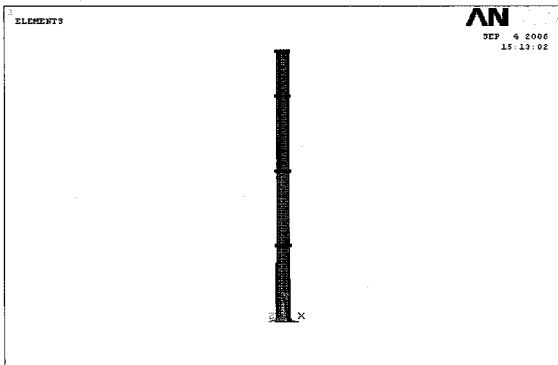


Fig. 3 원통형 타워의 유한요소 모델

3.2 원통형과 자켓형 타워의 유한요소 모델링 (Modeling)

모델링은 원통형 타워의 형상으로 상단부와 하단부의 타워의 직경이 다른 셸(Shell) 유형을 선택하였다. 원통형 타워의 치수는 높이 18m이고 상단부의 직경은 0.65m 하단부의 직경은 0.75m이며 두께는 15mm이다. Stiffener의 경우 Hat형으로 링 유형의 보강재로 치수가 폭이 0.15m, 높이가 0.1m, 두께가 15mm인 보강재를 하단으로부터 각각 5m 높이에 위치하며 하단을 고정하였고 다음 Fig. 3과 같다.

자켓형 타워의 높이 58.665m이고 상부면적은 10m×10m, 하부면적은 21.36m×21.36m이고 두께는 5mm이다. ANSYS 상용프로그램에서 Beam 188번(3-D Linear Finite Strain Beam)을 사용하였다. 수면 높이는 남해안 지역의 5~10m로 설정하였고 다음 Fig. 4와 같다.

4. 유한요소 해석

유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 구조해석에 본 연구 설계에서는 ANSYS 범용패키지 프로그램을 사용

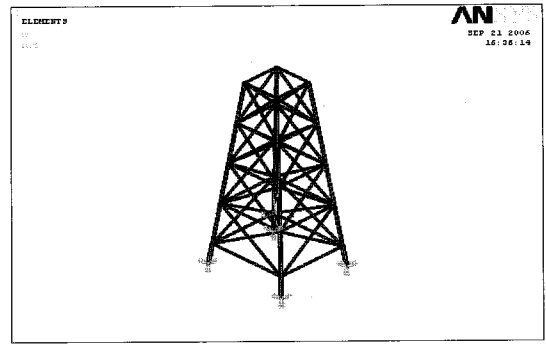


Fig. 4 자켓형 타워의 유한요소 모델

하여 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 고유진동수가 크게 발생하였다. 부가 질량의 관점에서 접근 했을 때 FRP(Fiber Glass Reinforced Plastic) 원통형 타워, 원통형 타워, 자켓형 타워의 경우 각각 약 11%, 19%, 8%의 고유진동수 감소를 보였다.

우선 원통형 타워의 경우 강철의 경우가 FRP에 비해서 부가질량의 영향에 상대적으로 민감한 것을 확인 할 수 있으며, 자켓형 타워의 경우 원통형 타워에 비하여 부가질량에 영향을 덜 받는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 그 높이 및 규모에 비하여 수중에 접촉하는 면적이 원통형 타워에 비하여 상대적으로 작기 때문이다. 또한 동일한 사이즈의 타워가 아니기 때문에 그로 인한 오차 또한 발생한 것으로 보인다. 그 해석의 결과는 아래와 같다.

4.1 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워

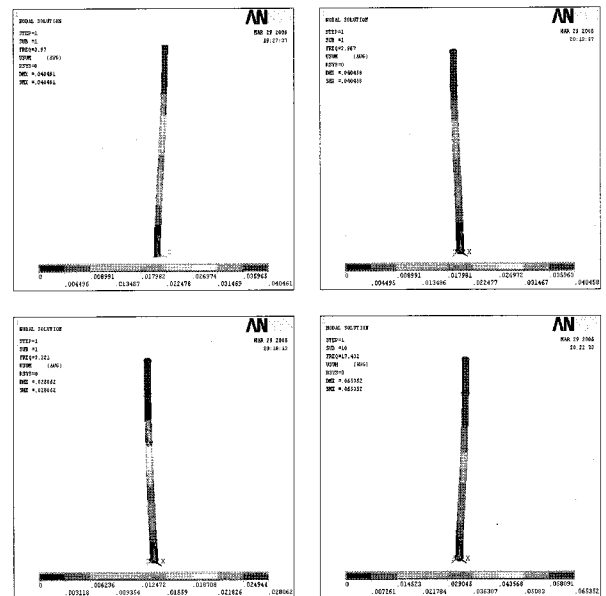


Fig. 5 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워의 유한요소 모드해석

Table 5 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워의 고유진동수 (단위 : Hz)

Mode	하중 미적용, 부가질량 미적용	하중 적용, 부가질량 미적용	하중 미적용, 부가질량 적용	하중 적용, 부가질량 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

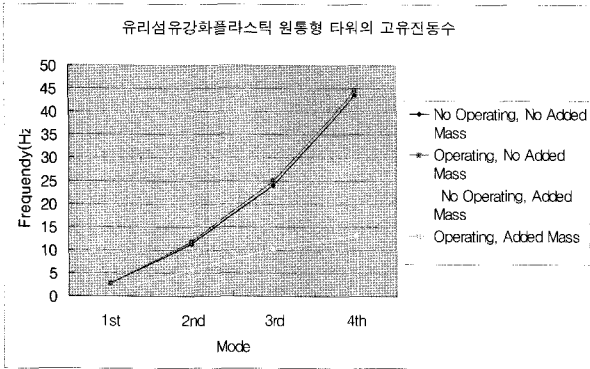


Fig. 6 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워의 고유진동수 (단위 : Hz)

4.2 강철 원통형 타워

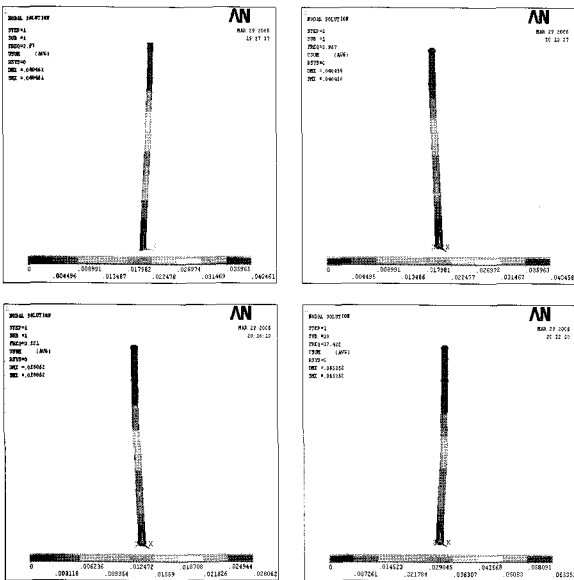


Fig. 7 강철 원통형 타워의 고유진동수(단위 : Hz)

Table 6 강철 원통형 타워의 고유진동수(단위 : Hz)

Mode	하중 미적용, 부가질량 미적용	하중 적용, 부가질량 미적용	하중 미적용, 부가질량 적용	하중 적용, 부가질량 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

강철 원통형 타워의 고유진동수

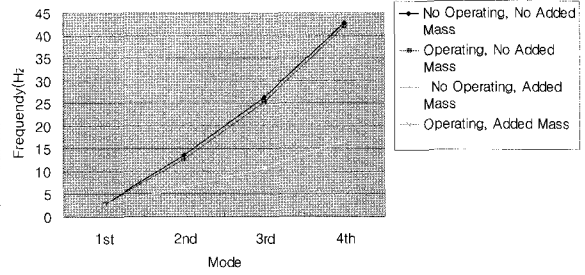


Fig. 8 강철 원통형 타워의 고유진동수(단위 : Hz)

4.3 자켓형 타워

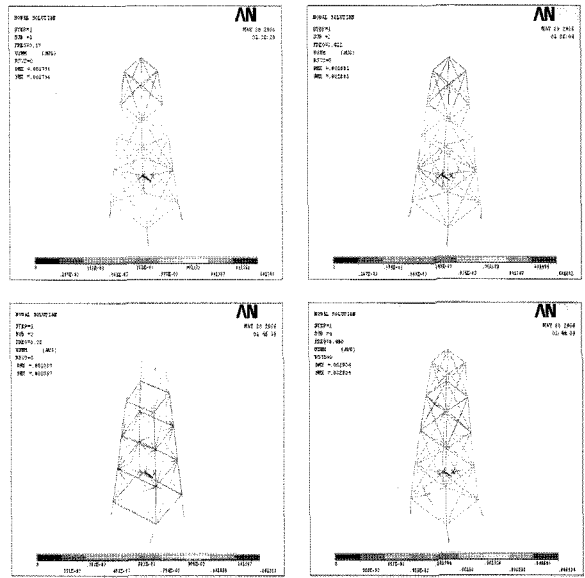


Fig. 9 자켓형 타워의 고유진동수(단위 : Hz)

Table 7 자켓형 타워의 고유진동수(단위 : Hz)

Mode	하중 미적용, 부가질량 미적용	하중 적용, 부가질량 미적용	하중 미적용, 부가질량 적용	하중 적용, 부가질량 적용
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

자켓형 타워의 고유진동수

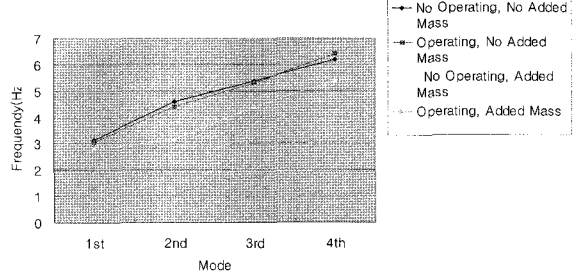


Fig. 10 자켓형 타워의 고유진동수(단위 : Hz)

5. 결과 및 고찰

5.1 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워와 강철 원통형 타워의 비교

유리섬유강화플라스틱 원통형 타워와 강철 원통형 타워는 1차에서 4차 모드까지 높은 고유진동수가 발생하였다. 하중의 영향에 있어서 타워의 고유진동수 변화는 Table 3과 Table 4에서 보듯이 거의 변화가 무관한 것으로 판단된다. 반면 부가질량의 유무에 따라서 고유진동수 변화의 차이를 나타내었다. 일반적으로 모드수가 증가하면 부가질량의 효과가 감소하는 것이 일반적이는데 논문의 해석결과는 반대의 성향을 보여주고 있는데 이는 해상에서 부가질량, 접수효과, 운동에너지 관계를 좀 더 살펴보아야 되는 것으로 사료된다. 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워인 Table 3의 경우 1~4차 모드에서 각각 고유진동수 감소율을 살펴보면 11%, 52%, 59%, 69%로 나타났으며 모드의 차수가 클수록 부가질량에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 1차 모드와 2차 모드의 감소율 차이는 약 40%가 넘게 차이가 발생하였다.

강철 원통형 타워의 경우 1차~4차 모드에서 각각 고유진동수 감소율을 살펴보면 19%, 53%, 62%, 60%로 나타났으며 모드의 차수가 클수록 부가질량에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워와 강철 원통형 타워의 고유진동수 경향을 살펴보면 강철 원통형 타워가 유리섬유강화플라스틱 원통형 타워에 비하여 부가질량의 적용에 따라 고유진동수 감소율이 더 크게 발생하였으며 이는 강철 원통형 타워가 부가질량에 대한 영향을 더 받고 있음을 알 수 있다.

5.2 원통형 타워와 자켓형 타워의 비교

유리섬유강화플라스틱 원통형과 강철 원통형 타워의 모드 차수의 증가에 따른 고유진동수 변화는 각 모드에서 평균적으로 15%, 52.5%, 60.5%, 64.5%의 감소율을 나타내었고 자켓형 타워의 경우는 8%, 9%, 16%, 12%의 감소율을 보였다. 이를 통해 자켓형 타워의 부가질량에 대한 영향은 원통형 타워의 부가질량에 비하여 적게 받는 것을 알 수 있다. 이것은 자켓형 타워의 경우 수면 높이에 따라 접촉하는 면적이 원통형 타워에 비하여 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 자켓형 타워의 모드 차수의 증가에 따라 원통형 타워의 경우와는 다르게 상대적으로 작은 고유진동수 증가를 보인다. 이것은 Marine Growth 등에 의한 질

량 및 기하학적 형상이, 크기의 증가로 인해 부가질량에 영향을 줄 수 있는데, 원통형 타워와 자켓형 타워의 물체형상 (Description of Body)을 보았을때 원형(Rod of Circular Cross-Section)과 타원(Rod of Elliptic Cross-Section)에 의해서 자켓형 타워의 부가질량이 적게 받는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 현재 널리 사용되고 있는 해상풍력발전용 타워 유형별 고유진동수에 관한 경향을 살펴보았다. 이를 통하여 앞으로 진행될 해상 풍력 발전용 타워의 설계에 있어서 그 특성을 고려하여 설계할 수 있게 되었다. 이번 연구는 그동안 진행되지 않은 해상풍력발전용 타워의 동적 특성에 대하여 하중과 부가질량을 고려하여 유형별 특성을 연구하고 그 경향을 파악하였다.

원통형 타워의 경우 강철과 유리섬유강화플라스틱을 비교해 본 결과 강철을 이용하여 제작한 타워가 유리섬유강화플라스틱을 이용하여 만든 타워보다 상대적인 강성의 차이로 인하여 전체적인 고유진동수는 높은 것으로 나타났다. 복잡한 해상 하중과 부가질량의 영향에 있어서 하중의 영향은 크게 받지 않으나 부가질량의 영향은 고유진동수를 낮추는 효과를 분석할 수 있었다. 그리고 강철 원통형의 경우 유리섬유강화플라스틱 원통형에 비하여 평균적으로 약 3~8% 정도의 고유진동수 감소율을 보였다. 이것은 강철 원통형이 유리섬유강화플라스틱 원통형에 비하여 상대적으로 부가질량의 영향을 더 받는 것으로 해석할 수 있다.

자켓형 타워 경우는 원통형 타워와 비교했을 시 상대적으로 부가질량의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 이는 질량 및 기하학적 형상에 따른 단면형상이 다르기 때문에 상대적으로 작은 결과로 볼 수 있다.

모드형상에서 고유진동수가 감소하고 있는데 이는 유체의 부가질량이 첨가되어 유체의 접수효과에 의한 해석을 할 수 있다. 그리고 유체와 접하는 구조물 사이의 상호작용에 의해서 나타남을 볼 수 있다. 즉, 보의 일부가 유체와 접할 때 접수 표면적이 증가함에 따라 유체의 단위길이당 부가질량이 증가하게 되고 이로 인해 접수 고유진동수가 감소하게 된다. 이때 구조물의 동적 변위가 발생하게 되어 유체 운동에너지가 증가하게 되고, 이는 접수 고유진동수를 감소시키는 원인이 된다. 따라서 운동에너지의 급격한 증가는 접수 고유진동수의 급격한 감소를 초래하게 되고 이로 인해 위와 같은 고유진동수를 얻게 된다.

앞으로의 고용량 해상풍력발전 타워의 설계 및 제작에 있

어서 본 연구의 특성 및 경향을 파악하여 기초연구가 되고자 하였다. 이와 같은 불안정성 요소를 크게 갖는 회전 대형구조물에 대한 보강, 재료 및 구조물의 특성에 관한 연구 및 동적 거동 특성에 관한 연구가 더 필요하다. 추후 해상풍력 발전용 타워의 설계 시 구조물의 크기가 증가하면서 각각의 재료 및 타워의 특성에 따라 보강재를 고려한 형태 및 치수에 관해 동역학적인 연구가 좀 더 고려하여야 할 것이고, 나아가 날개의 회전에 따른 공진 및 궤도 이탈 등에 대한 연구도 심도 있게 이루어 져야 할 것이다.

참 고 문 헌

김덕현, 이정호, 박정호 (1997) 탄성지지된 복합재료 상판의 고유 진동수, 한국전산구조공학회, pp.215~222.
손충렬 (1995) 해양구조물공학, 머리내, p.801.

손충렬, 이강수, 원종범 (2005) 해양 풍력발전용 타워의 해석적 접근, 한국풍력에너지학회, pp.103~107.
이강수 (2000) 해양스틸자켓의 강도에 관한 다양한 보강재효과, 인하대학교 석사학위논문, p.70.
이충동, 김준오 (1988) 대형 해양구조물 해석과 컴퓨터 이용, 한국전산구조공학회, pp.34~36.
한국과학기술원 (1985) Development of Design Technology of Offshore Platforms for Offshore Oil Production, p.315.
한국선급 (1999) 선박진동소음 제어지침, p.544.
David A, Spera (1994) Wind Turbine Technology, NEW YORK ASME PRESS, p.638.
Geier, M. H. (1997) Quality Handbook for Composite Material, CHAPMAN HALL, p.278.
Gerwick, C. B. (1986) Construction of Offshore Structures, *John Wiley & Sons, Inc.*, p.552.