

부가수질량을 고려한 실린더형 풍력발전기타워의 동적응답연구

손충렬*, 이강수**, 이정탁***

*인하대학교 기계공학부(soncy@inha.ac.kr), **태성에스엔이 ANSYS팀(kslee@tsne.co.kr),
***인하대학교 대학원 선박공학과(ljt0229@inhaian.net)

A Study on the Dynamic Response of Cylindrical Wind Turbine Tower Considering Added Mass

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

*School of Mechanical Engineering, Inha University(soncy@inha.ac.kr),
**Dept. of Naval Architecture, Graduate School, Inha University(kslee@inhaian.net),
***Dept. of Naval Architecture, Graduate School, Inha University(ljt0229@inhaian.net)

Abstract

Unlike structures in the air, the vibration analysis of a submerged or floating structure such as offshore structures is possibly only when the fluid-structures is understood, as the whole or part of the structure is in contact with water. Through the comparison between the experimental result and the finite element analysis result for a simple cylindrical model, it was verified that an added mass effects on the cylindrical structure. Using the commercial FEA program ANSYS(v.11.0), underwater added mass was superposed on the mass matrix of the structure. A frequency response analysis of forced vibration in the frequency considered the dynamic load was also performed. It was proposed to find the several important modes of resonance peak for these fixed cylindrical type structures. Furthermore, it is expected that the analysis method and the data in this study can be applied to a dynamic structural design and dynamic performance evaluation for the ground and marine purpose of power generator by wind.

Keywords : Cylindrical Tower(실린더형 타워), Dynamic Response(동적응답), Wind Turbine(풍력발전기), Added Mass(부가수 질량), Finite Element Method(유한요소법), Fluid-Structure Interaction(유체-구조연성)

기 호 설 명

F_d	:	Drag Force
F_i	:	Inertia Force
C_m	:	Inertia 계수
C_d	:	Drag 계수
A	:	단위 면적
U	:	물입자 속도
C_I	:	Mass Coefficient

1. 서 론

해양구조물 같은 접수구조물의 진동해석은 육상 구조물과는 달리 일부 또는 전체가 물과 접해있기 때문에 유체-구조 상호작용을 파악해야만 가능하다. 따라서 유체영역과 구조영역을 각각 독립적인 지배방정식과 경계조건을 갖는 계로 정의하고 접수면에서의 적합조건을 이용하여 두 계를 연성시켜 풀게 된다. 해상에서는 풍하중과 추력 이외에 파하중, 조류하중, 유체의 영향에 의한 부가수질량 등을 고려해야 한다. 따라서, 육상 및 해양에 설치되는 풍력발전기를 지지하는 타워는 풍력발전기 설계시 중요한 연구대상이 된다. 과거 이러한 타워구조물의 유한요소법을 이용한 해석을 통하여 동적 거동을 파악하고자 많은 수치해석적인 연구를 수행하였다. 최근 컴퓨터 사양의 비약적인 발전으로 유한요소 해석 시 빔, 쉘요소의 사용보다는 실제 형상을 그대로 사용하는 솔리드요소의 적용이 눈에 띄게 증가하였다. 기존연구에서는 하드웨어 및 시간적인 문제로 유한요소모델을 축소하거나 행렬계산 시 집중질량을 사용하는 등 실제 구조물의 전체모델을 그대로 이용할 수 없었다. 본 연구에서는 행렬의 축소 없이 전체행렬을 사용하였다. 구조물의 형태에 따라 유한요소해석(FEA) 상용 패키지인 ANSYS 버전 11.0을 통하여 실제 계산된 하중과 수중

에 잠겨있는 영역의 부가수 질량을 산정하여 구조물의 질량행렬과 합쳐지도록 하였다. 또한, 부가수 질량의 영향을 질량행렬에 합쳐지도록 모드해석을 수행하여 구조물의 동특성을 파악하였으며 동적하중을 적용하여 주파수영역에서의 강제진동 주파수응답해석을 실시하였다. 이러한 실린더형 고정식 풍력발전용 타워구조물에 대한 공진피크응답이 발생하는 몇가지 중요 모드를 제안하였다.

2. 유체-구조 연성

2.1 유체-구조 상호작용

유체-구조 상호작용(Fluid-Structure Interaction)은 구조물이 유체중에서 운동할 때 항상 존재하는 현상이며 다음과 같이 세 가지 영역으로 구분할 수 있다.

- 거대 상대운동 문제로서 비행기 날개의 flutter 현상이나 현수교의 운동 등과 같은 문제로서 유체의 특성에 의해 상대운동이 좌우 된다.
- 제한된 유체변위를 일으키며 짧은 시간 안에 일어나는 문제로 수중폭파나 선수 충격 하중 등에 의한 유체-구조 상호작용이 이에 속하면 전체 변위는 제한되어 있으나 유체의 압축성이 중요한 역할을 한다.
- 제한된 유체변위를 일으키며 장시간 지속적으로 일어나는 문제로 선체운동, 선체진동 및 음향진동이나 해진에 의해 해양구조물의 주기적 응답과 같은 현상이 이에 속한다.

본 논문에서는 접수구조물의 진동에 대한 것으로 세 번째 범주의 문제에 국한한다. 이 경우 유체는 비압축성, 비점성의 이상유체로 가정할 수 있으며 또한 자유표면에서는 압력이 대기압과 같은 것으로 가정할 수 있으며 기본적인 가정은 다음과 같다.

· 접수구조물의 진동시 주위 유체는 이상 유체이다.

· 질량보존, 운동량보존 및 에너지보존 법칙이 성립한다.

· 일정한 압력밀도를 갖는다.

$$\rho = \rho_0 \quad (1)$$

· 구조물 거동에 대한 물의 밀도변화는 극히 미소하다.

$$U \cdot \nabla(U) = 0 \quad (2)$$

Offshore Structure처럼 유체 내에서 물체가 움직일 때, 그 물체주위의 유체도 따라서 움직이게 된다. 이 때 물체를 움직이기 위해서 물체뿐만 아니라 유체의 Kinetic Energy 까지 증가시키기 위한 일을 해주어야 한다. 여기서, 유체의 유동을 일으키는데 필요한 Energy를 유속의 제곱과 가상적인 질량의 곱으로 생각할 수 있는데, 이때의 가상적인 질량을 부가질량이라고 하며 구조물의 동적 해석을 위한 모형화를 할 때 포함 시켜야 한다.

$$M_a = 2T / U^2 \quad (3)$$

여기서, M_a = Added Mass

U = Velocity of the Body

T = Kinetic Energy

즉, 이 Added Mass는 유체 내의 유동에 의해서 생기는 가상적인 질량으로서, 물체의 모양, 방향, 운동경로에 따라 달라진다. 유한요소 해석 시 실린더형 타워 구조물과 자켓형 구조물에 형상에 따라 계산된 값을 적용하여 모달해석을 수행하였다.

2.2 직접 연성해석

유체 - 구조 상호 작용을 나타내는 운동방정식은 다음 식(4)와 같다.

$$M_S \ddot{W} + C_S \dot{W} + K_S W = F_E + F_I \quad (4)$$

여기서, M_S, C_S, K_S 는 구조체의 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타내면, F_E, F_I 는 각각 순수외력과 유체-구조상호작용에 의해 접수구조표면에 작용하는 유체력을 나타낸다. 유체-구조상호작용해석은 F_I 를 구조응답의 함수로서 구하는 문제라 할 수 있다. 수십 Hz 미만의 고유진동수를 갖는 접수구조물 진동의 경우에는 유체를 이상 유체로 취급할 수 있게 되어 접수구조표면에서는 접선 방향의 전단력은 무시될 수 있고, 접수면 Γ_S 에 수직인 압력 P 만 작용하게 되므로 결국 F_I 는 식(5)와 같다.

$$F_I = \int_{\Gamma_S} N^T n P dS \quad (5)$$

N 은 임의 요소에서의 압력을 근사시키기 위한 형상함수이며, P 는 구조영역과 유체영역의 연성해로부터 구한 압력 벡터를 나타낸다. 이 압력 P 는 Euler 해법의 Inverse formulation에 근거한 경계요소법을 적용하여 구할 수 있다. 이렇게 구하여진 P_S 를 (6)에 대입하면 F_I 를 구할 수 있다.

$$F_I = -M_F \ddot{W} \quad (6)$$

이 때 M_F 는 부가수질량 행렬이다. 식(6)를 식(4)에 대입하면 유체 - 구조 연성해석을 위한 운동방정식은 식(7)과 같이 된다.

$$(M_S + M_F) \ddot{W} + C_S \dot{W} + K_S W = F_E \quad (7)$$

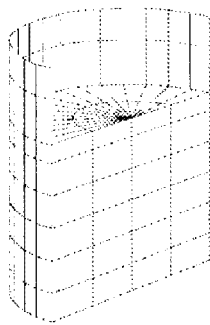
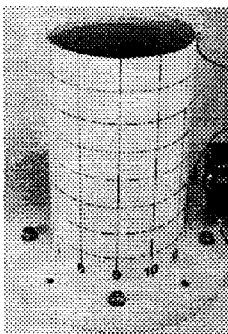
식(7)은 부가수질량 행렬이 접수구조표면에 전 자유도에 연성되어 있고 비대칭이다. ANSYS의 Added Mass기능을 이용한 접수구조진동 해석도 이와 같은 직접연성해석이다. 접수구조 자유도가 많이 커지면 해석이 길어지기도 하지만 현재 컴퓨터 하드웨어 사양이 많이 좋아져 자유도가 큰 대형 구조 모델에 적용할 수 있다. 상용 유한요소해석 프로그램

인 ANSYS에서 Added Mass를 적용한 모달 해석을 통하여 모드해석을 수행하였다.

2.3 기존의 실험

부가수질량을 고려한 구조물의 진동특성에 관한 실험적 연구가 현재에도 활발히 이루어지고 있다. 국내에서 김극천, 유계형, 국외의 T. Mazuch, S. Bartlett 등은 유체가 고체에 인접하고 있거나 고체가 유체에 잠겨있는 경우에 구조물의 고유진동수의 변화와 모드형상에 대하여 수 많은 실험을 수행하여 왔고, Amabili, W. E. Stillman, Nagaya 등이 이론적인 접근을 하였다.

T. Mazuch는 수직방향으로 세워진 얇은 실린더 쉘 구조물이 물에 잠긴 상태에서 물 높이가 변화에 따른 고유진동수와 고유모드의 변화를 관찰하였다. 실험결과와 유한요소 해석결과를 비교하였다. 유한요소 해석 시 행렬축소에 의한 reduced방법과 full matrix 방법을 비교하였는데, 큰 차이를 보이고 있지 않다. 또한, 실험결과와 해석결과는 매우 잘 맞고 있다. 여러 가지 시험케이스 중 부가수질량 고려하지 않은 물높이가 0인 경우와 69.7%인 경우의 결과를 비교하여 이에 대한 영향을 살펴보았다. Fig.1은 실험시편과 유한요소모델을 보여준다.



(a) specimen (b) H=231mm, R=77.25, t=1.5mm

Fig. 1 Geometry of thin-walled shell

Table 1은 1차부터 5차모드까지의 고유진동수에 대한 실험결과와 유한요소해석결과를 보여준다.

Table 1 얇은두께 원통형 쉘의 진동실험 및 해석

	H/L = 0 (Dry상태) [Hz]			H/L = 0.697 (69.7% 잠긴상태) [Hz]		
	실험	해석 (full)	해석 (red)	실험	해석 (full)	해석 (red)
1차	616	633	633.6	522	543	543.2
2차	708	814	814.6	582	672.7	672.9
3차	945	947	947.6	798	806.0	806.5
4차	1497	1480	1481.1	1196	1188.4	1189.6
5차	1628	1648	1650.3	1244	1253.2	1263.3

결과를 살펴보면 잠긴 상태의 고유진동수가 낮은 대역으로 급격히 변하는 경향을 보인다. 유한요소해석 결과에서 full방법에 비해 reduced방법이 저주파수에서는 값 차이가 크지 않지만 고주파로 갈 수록 값의 차이가 커지는 것을 알 수 있다.

2.4 단순모델선의 실험 및 해석결과 비교

부가수질량의 영향을 알아보기 위하여 open top container선을 모선으로 하는 상사모델을 제작하였다. 이 모델선은 L/B = 8.87, B/d = 3.1 이므로 기존 선박에 비하여 세장비가 긴 광폭선에 해당한다. exciter를 이용한 가진 시험을 수행하여 접수된 구조물의 상하방향 고유진동수를 측정하여 해석결과와 비교하였다. Table 2는 단순모델선의 치수와 기계적 물성치를 보여주고 있다.

Table 2 단순모델선의 치수와 기계적 물성치

항목	값 (괄호는 실선데이터)
L.O.A [m]	2.75(255)
Breadth [m]	0.31(38.5)
Depth [m]	0.16(23.2)
Draft [m]	0.1014
Hold Length [m]	0.25
E(탄성계수) [N/m ²]	210×10 ⁹
ν (Poisson's Raton)	0.3
density(구조밀도) [kg/m ³]	7,850
Plate Thickness [mm]	3.20

Fig.10은 기하학적 형상과 치수를 보여주고 있다.

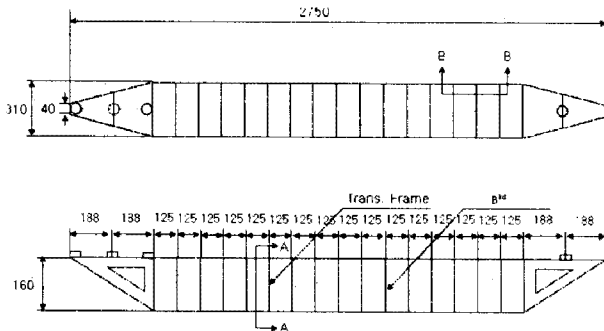


Fig. 2 단순모델선의 기하학적 형상

Table 3은 본 논문에 사용된 구조모델 중 모형선박에 대한 Dry상태와 접수상태 진동 해석결과를 실험결과와 비교하여 보여주고 있다. 실험과 해석결과를 비교해 보면 저차에서 고차로 갈 수록 차이가 많이 나며 부가수질량에 대한 영향을 확인할 수 있었다.

Table 3 단순모델선에 대한 실험결과 및 계산결과 비교

	Dry고유진동수[Hz]		부가수질량고려 고유진동수[Hz]	
	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과
1	108.8	103.1	78.6	77.4
2	268.8	260.9	194.0	192.8
3	463.1	451.8	325.5	334.1
4	645.1	641.8	430.6	482.2

3. 유한요소해석

3.1 3차원 해석

일반적으로 풍력발전기 타워와 날개의 크기는 풍력발전기의 용량에 따라 비례하여 커지게 된다. 본 논문의 해석 대상모델은 현재 풍력발전기가 대형화 됨에 따라 최근 보급되고 있는 2MW 이상을 기준으로 선정하였다. 보통 원형의 실린더형과 자켓형으로 나뉘어지며 본 연구에서는 실린더형 모델을 대상으로 하였다. 실린더형 타워구조물은 하면과 상면의 직경이 다르며 하면에서 상면으로 갈 수록 크기가 감소하고, 해저 바닥면부터 수표면까지의 높이는 40m이다. 실린더형 타워구조물의 제원은 Table 4와 같다.

Table 4 실린더형 타워모델의 제원

	실린더형 (meter)
상면 직경	2.5
하면 직경	4.5
두께	0.045
높이	60
수심	40

2MW 풍력발전기의 경우 날개(blade)의 무게는 약 40톤, 나셀(nacelle)의 무게는 60ton이 된다. 이들 무게를 합하여 풍력발전기 타워의 상부의 무게를 고려하였다. 유한요소해석 모델의 기하학적인 모델링은 Ux, Uy, Uz, Rotx, Roty, Rotz의 6자유도-4절점 Elastic Shell요소로 쉘 두께를 직접 입력하였다. 부가수 질량은 각각 단위면적당 값으로 실제 상수 값으로 입력하였다. 날개의 무게와 나셀의 무게를 합하여 lumped 질량요소를 이용하여 모델링 하였으며 타워의 상부에 강체 MPC(Multi Point Constraint)요소를 이용하여 질량요소와 타워구조물과 연결하였다. 이는 변형이 없는 Beam요소이다. 따

라서, 해석 시 질량에 관한 효과를 구현하도록 하였다. Fig.3은 실린더형 타워의 유한요소해석에 사용된 쉘요소의 기하학적 형상을 보여주고 있다.

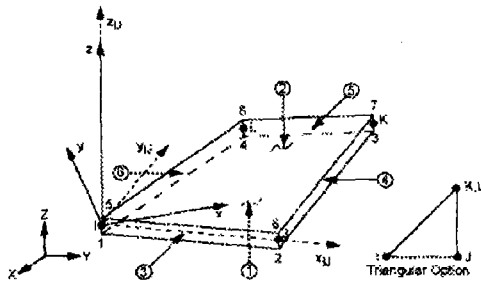


Fig.3 Geometry of elastic shell element

실린더 및 자켓형 타워구조물의 유한요소 모델은 각각 Fig.4와 같다.



Fig.4 FE model of cylindrical and jacket tower structure

3.2 재료물성치

실린더형 타워구조물의 동적해석을 위한 기계적인 재료물성치는 탄성계수, 프와송비, 밀도 등이 필요하다. 이들의 재료물성치는 모두 동일하게 Structural Steel로 설정되었으며 Table 5과 같다.

Table 5 모델의 재료물성치

	실린더
탄성계수	210×10^9 [N/m ²]
프와송비	0.3
밀도	7850 [kg/m ³]
항복응력	2.35×10^8 [N/m ²]

3.3 경계조건

실린더형 타워구조물의 경계조건 설정에 있어 본 논문에서는 해저지반의 soil조건 등을 고려하지 않고 모두 동일하게 구조물 바닥면의 자유도를 모두 완전 고정으로 구속하였다. Fig.5는 실린더형 타워구조물의 경계조건이 적용된 모습을 보여주고 있다.

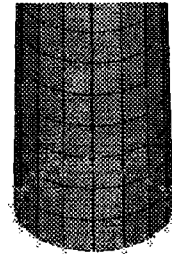


Fig.5 Boundary condition of cylindrical tower structures

4. 모드해석

4.1 모드추출법

본 연구에서는 현재까지 알려진 모드추출법 중 가장 정확하다고 알려진 Block Lanczos법을 이용하여 모드형상을 추출하였다. Block Lanczos 고유치 추출법은 대형, 대칭 고유치 문제에 유용하다. Grimes[13] 등이 Block shift된 Lanczos 알고리즘을 고유치 문제의 이론적인 기초로 적용하였다. 일반적으로 이 해석법은 subspace 법으로 푸는 형태의 문제에 적용 가능하나, 더 빠른 수렴도를 가진다. Block shift된 Lanczos 알고리즘이 이 해석법의 이론적 근거이며, 요구된 수의 고유치를 추출하기 위하여 Sturm sequence check와 결합한 자동 shift strategy를 채택했다. 유한요소해석 수행 시 Sparse matrix solver를 이용하여 계산한다.

Block Lanczos 고유치 추출법은 대형, 대칭 고유치 문제에 유용하며, 본 연구에서 적용한

풍력발전기 나셀부위의 총 질량을 집중질량요소로 적용한 경우와 이 요소를 타워구조물에 연결한 강제요소가 있는 경우에 매우 적합하다.

4.2 모드해석 결과

실린더형 고정식 타워구조물의 모드해석을 실시하였고 20차 모드까지 추출, 20개의 모드를 expand 하여 모드형상을 구하였다. Table 6은 부가수질량을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 고유진동수 결과를 보여주고 있다. steel 재료의 구조물의 경우 감쇠에 대한 영향이 크지 않으므로 감쇠를 고려하지 않았다. 따라서, 고유진동수와 고유모드는 콤플렉스항이 고려되지 않아 모든 결과를 실수로 표현되어 진다. Table 6에 중근에 대한 표시를 하였는데 기하학적 형상의 특성상 발생하게 된다. 이와 같이 주파수가 동일한 경우는 하나의 모드로 간주할 수 있으며 실제 모드형상을 살펴보면 수평면에서의 축방향만 바뀌어지며 동일한 모드임을 알 수 있다. 실린더형 고유진동수에 대하여 살펴보면 1차 고유진동수는 부가수질량을 고려하지 않은 경우(육상용)는 0.51Hz, 부가수질량을 고려한 경우(해상용)는 0.29Hz로 나타났다. 육상용에 대비하여 해상용 타워 구조물의 경우 진동수 대역이 저주파 대역으로 크게 바뀐 것을 알 수 있었다.

Table 6 실린더형 타워구조물의 고유진동수 결과(1-10차)

	육상용(Dry)[Hz]	해상용(Wet)[Hz]
1	0.51(중근)	0.29(중근)
2	0.51(중근)	0.29(중근)
3	4.61(중근)	1.03(중근)
4	4.61(중근)	1.03(중근)
5	9.50(중근)	1.13(중근)
6	9.50(중근)	1.13(중근)
7	11.61	1.54(중근)
8	12.41(중근)	1.54(중근)
9	12.41(중근)	2.27(중근)
10	13.15(중근)	2.27(중근)

Fig.6은 Table 6의 결과를 그래프 형태로 나타낸 것이며 각 경우에 따른 고유진동수의 경향을 쉽게 확인할 수 있다.

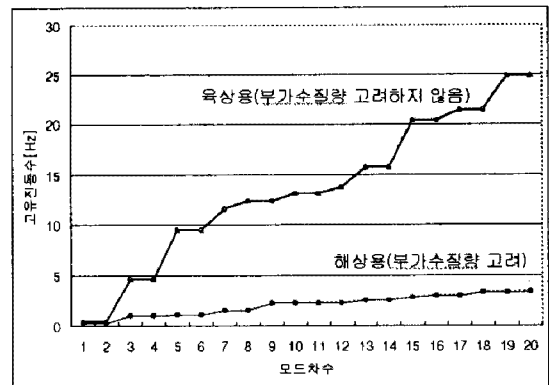


Fig.6 육상, 해상용 실린더형타워의 고유진동수비교

본 연구에서는 해상용에 대하여 더 자세히 살펴보았다. 해석 결과를 비교해 보면 전체적으로 고유진동수 분포는 모드형상에 있어서 1, 2차 모드는 bending모드로 나타났고 3, 4차모드는 1차 breathing, 2차 breathing모드로 나타났다. 해상용의 경우 큰 영향이 있음을 알 수 있었다. 먼저 진동수 대역이 저주파수로 많이 이동되었으며 모드형상도 고차의 모드가 저차에서 나타남을 알 수 있었다.

5. 강제진동해석

5.1 주기하중

본 연구에서는 외력 가진 성분인 Wind, Wave와 로터블레이드 회전 등에 관한 하중을 Sweep Sine으로 적용하였다. 풍력발전기 타워에 작용하는 풍압이 voltex shedding에 의해 주로 영향을 받고, 로터블레이드 뿌리에서의 edgewise 방향의 굽힘모멘트 성분이 시간에 따라 주기적인 응답을 보여주며 실제로 풍력발전기 타워구조물에 주기적인 하중으로 작용하게 되므로 이를 통하여 육상용 및 해상용 타워구조물의 실제 응답주파수를

파악하고 중요 모드를 제안하고자 하였다. 중요 모드의 진동수대역과 형상을 파악하게 되면 추후 로터블레이드의 진동수대역과 비교하여 공진대역을 피할 수 있도록 로터블레이드 설계를 할 수 있게 된다.

일반적으로 구조물의 동특성 시험 시 가진기(exciter)에서 Sweep Sine, Random, Pseudo-Random 또는 Impulse Load 등의 가진력 신호로 구조물을 가진하여 FFT에서 평균된 값으로 평가하게 된다. 보통 impact하중에 의한 시험이 가진에 대한 응답신호가 좋기 때문에 이를 사용하기도 하지만 현재 유한요소해석상에 적용하기 쉽지 않은 단점이 있다. 강제진동해석 시 모드해석과 같은 방법으로 해석을 수행하였다. 부가수질량을 고려한 경우와 고려하지 않은 상태에서의 즉, 육상 및 해상용 타워구조물도 마찬가지로 풍압을 포함하여 추력과 불균형력을 고려하여 주파수응답해석을 실시하였다.

5.2 주파수응답해석결과

실린더형 고정식 타워구조물의 강제진동 해석을 실시하였고 0부터 20Hz까지 0.05Hz 간격으로 sweeping하여 주파수응답을 계산하였다. 모든 절점에서의 주파수응답 및 위상각을 평가하였고, critical response frequency를 선정하여 그 때의 변위응답과 응력응답을 관찰하였다. 모드해석결과와 비교하여 중요 공진응답 진동수와 모드를 선정하였다. Full matrix를 사용하기 때문에 모드해석결과를 주파수응답에 반영시키지 않는다. 따라서, 모드해석과는 무관하게 x, y, z의 방향별 주파수응답을 구하였고 모드해석 시 전응력에 대한 영향이 미비했으므로 전응력 상태를 반영하지 않았다.

부가수질량의 영향을 평가하였으며 또한, 모든 절점에서 검토한 결과 중 20Hz 내에 가

장 많이 공진응답 피크점이 들어있는 지점들을 높이에 따라 상, 중, 하부로 나누어 평가하였다.

실린더형 공진응답 주파수에 대하여 살펴보면 육상용 실린더 타워구조물의 1차 응답 주파수는 0.51Hz로 나타났고, 2차는 4.61Hz로 나타났다. 이는 모드해석 결과와 비교하여 모드해석의 1차와 2차모드에 각각 해당된다. 부가수질량을 고려하고, 추력과 불평형력을 고려한 해상용의 경우 1차 응답주파수는 0.29Hz로 나타났고, 2차는 1.03Hz로 나타났다.

모드해석 결과와 비교하여 육상용과 마찬가지로 모드해석의 1차와 2차모드에 각각 해당된다. 마지막으로 부가수질량을 고려하고, 추력과 불평형력을 무시한 해상용의 경우 1차 응답주파수는 0.29Hz로 나타났고, 2차는 1.03Hz로 나타났다. 이는 모드해석 결과와 비교하여 육상용과 마찬가지로 모드해석의 1차와 2차모드에 각각 해당된다. 또한, 추력과 불평형력에 대하여 주파수 응답에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 사료된다.

Fig.7에서 Fig.9은 각 해석 케이스에 따른 대한 주파수응답 결과를 보여주고 있다.

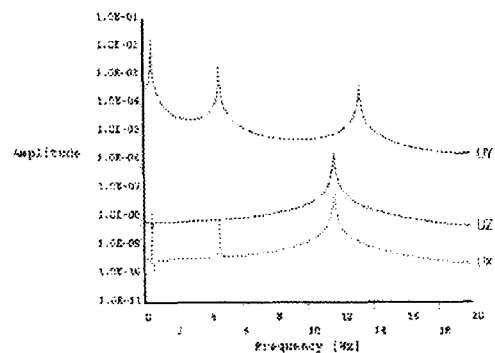


Fig.7 실린더 상부 중요지점의 주파수응답(육상용)

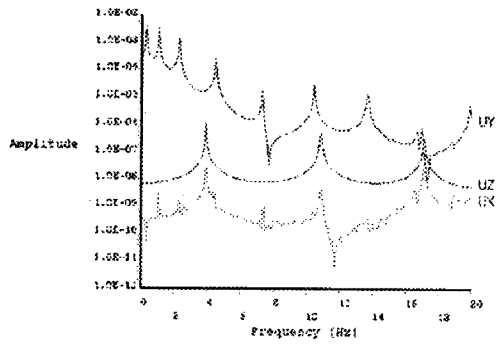


Fig.8 실린더 상부 중요지점의 주파수응답(해상용)

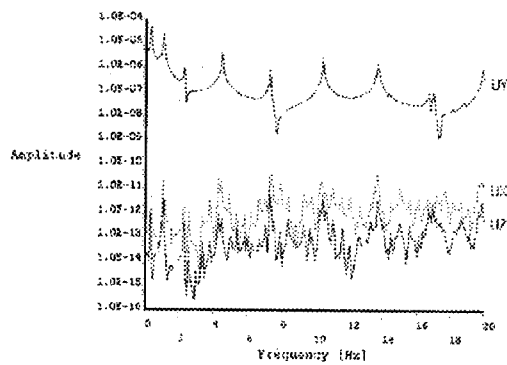


Fig.9 실린더 상부 중요지점의 주파수응답(추력,편심하중제외)

주요 공진모드들은 Fig.10에서 Fig.13과 같았으며 모드해석에서 구한 고유모드와 분명한 차이를 확인하였다.

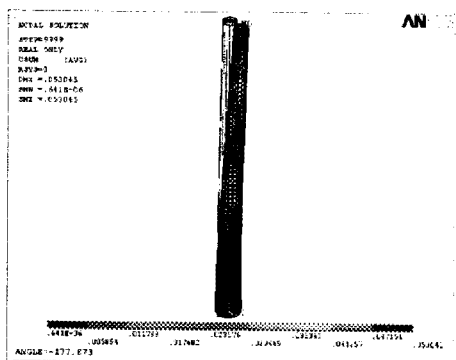


Fig.10 1차공진 응답모드(해상용 - 0.29Hz)

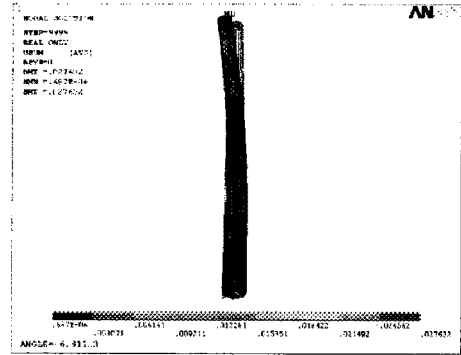


Fig.11 2차공진 응답모드(해상용 - 1.03Hz)

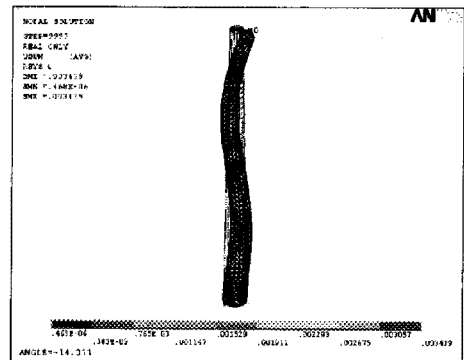


Fig.12 3차공진 응답모드(해상용 - 2.27Hz)
(추력,편심하중제외)

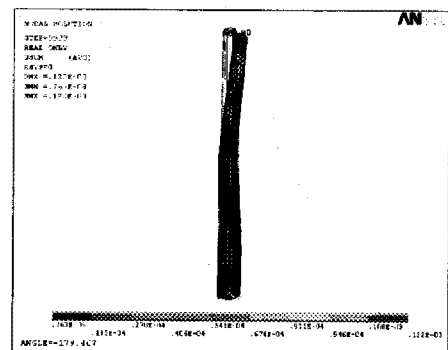


Fig.13 4차공진 응답모드(해상용 - 3.91Hz)

5.3 결과 분석

실린더형 타워구조물(전응력고려) 경우는 1차 굽힘모드의 고유진동수는 0.29Hz였다. 이는 로터블레이드의 회전을 고려하여 공진응답에 대한 영향을 고려하고자 할 경우 가장 중요한 정보가 된다. 일반적으로 회전체는 회전하면서 발생하는 자이로스토프 모멘트의 영향으로 인하여 실제로 로터블레이드에 감쇠형태로 작용하게 되며 고유진동수에 영향을 미치게 된다. 즉, 회전하면서 고유진동수가 계속적으로 변하게 된다. 로터블레이드의 고유진동수를 수직축에, 실제 회전수를 수평축에 놓고 평면상에 고유진동수를 표시해보면 각 고유진동수와 모드에 대하여 연속적인 형태의 그래프가 된다. 로터블레이드의 고유진동수를 표시한 후 수평축과 수직축의 단위를 1대1로 대응시키고 교차하는 점을 찾게 되면 바로 그 점이 공진영역이 된다. 이와 같은 선도를 캠벨선도(Campbell-Diagram)라고 한다. 또한, 일반적으로 로터블레이드의 날개가 3기임을 감안하면 1대1로 대응되는 직선의 기울기가 3X가 되며 공진대역이 바뀌게 된다. 즉, 로터블레이드의 개수가 n 개이면 nx 성분을 고려하게 된다. 캠벨선도를 통하여 운전회피구간을 파악할 수 있는데 일반적으로 2MW급이상 풍력발전기 로터블레이드의 회전진동수는 0.2 ~ 0.4 Hz이므로 타워구조물은 이에 대해 공진대역에 놓여있게 된다. 따라서, 추후 이에 대한 공진검토가 정확히 이루어져야만 한다. 일반적으로 로터블레이드 자체에 대한 공진응답은 회전진동수에 비해 높은 대역에 있기 때문에 크게 고려할 필요는 없을 것으로 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 육상 및 해상용 풍력발전기 고정식 실린더형 타워구조물의 고유진동수와 고유모드, 강제진동해석을 통하여 구조

물의 진동특성과 응답특성에 관하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

해양구조물 같은 접수구조물의 모드해석은 육상 구조물과는 달리 일부 또는 전체가 물과 접해있기 때문에 유체-구조 상호작용을 파악해야만 가능하다. 따라서 두 계를 연성시켜 풀게되는데, 단순모델선의 실험을 통하여 부가수질량의 영향을 검증하였다.

부가수 질량을 구조물의 단면 형상인 실린더 형상에 따라 평가하여 전체 구조물에 적용하였으며 육상용 실린더형의 경우 1차와 2차는 굽힘모드였고, 해상용 실린더형의 경우 육상용과 동일하였으나 고유진동수 대역이 크게 달라지는 것을 알 수 있었다.

강제진동해석 시 모드해석과 마찬가지로 행렬의 축소 없이 전체행렬을 사용하였으며 육상용과 해상용 모두 실린더형 타워구조물의 경우 모드해석결과와 경향이 동일하였으며 주파수 응답 대역만 이동하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 실린더형 타워구조물의 경우 모드해석만 통하여 동적설계를 충분히 할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 고정식구조물에 대한 고유진동특성을 파악하였고, 주파수응답 해석결과 발생하는 몇가지 중요 모드를 제안하였다. 해석기법과 분석자료는 육상 및 해상 풍력발전기의 동적 설계 및 동적 성능 평가 시 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. M. Amabili, 1996, "Effect of finite fluid depth on the hydroelastic vibrations of circular and annular plates", Journal of Sound and Vibration, Vol. 193(4). pp. 909-925.

2. T. Mazuch., et al, 1996, "Natural mode and frequencies of a thin clamped-free steel cylindrical storage tank partially filled with water", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 193(3). pp. 669-690
3. 손충렬 외 (2007), "해상풍력발전 JACKET의 고유진동수에 관한 연구", *한국소음진동공학회 논문집 제17권 2호*. pp. 130-135
4. S. Bartlett., et al, 2001, "An added mass theory for the base plate in a partially filled rectangular tank for use with fea", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246(2). pp. 211-223
5. 유계형 외, 2002, "유체로 연성되고 두께가 상이한 두 직사각 평판의 실험적 모드해석", *대한기계학회논문집 A권 제12호*. pp. 2541-2549
6. 정경훈 외, 2004, "유체로 연성되고 크기가 다른 두 원판의 진동해석", *한국소음진동공학회 추계학술대회논문집*. pp. 258-262.
7. Lalu Mangal, et al, 2001, "Structural monitoring of offshore platforms using impulse and relaxation response", *Journal of Ocean Engineering*, Vol.28. pp. 689-705
8. Grimes, R.G., Lewis, J.G., and Simon, H.D., 1994, "A shifted block lanczos algorithm for solving sparse symmetric generalized eigenproblems", *SIAM Journal Matrix Analysis Applications*, Vol. 15(1). pp. 228-272.
9. Proefschrift, 2006, "Design of support structures for offshore wind turbines", Jan VAN DER TEMPEL. pp. 135-150.
10. 이강수 외, 2007, "LNG운반선용 펌프타워의 GUI개발에 관한 연구", *한국전산구조공학회 논문집 제20권 제5호*. pp. 605-613
11. 김상호 외, 2006, "해상풍력발전용 타워의 강제진동해석에 관한 연구", *한국풍력*