

접합부의 강도를 고려한 부유식 구조물의 고유모드 및 응답 해석 Natural Mode and Response Analyses of Floating Structures Considering Connections

김병완*·경조현**·홍사영**·조석규**·이인원***

Byoung Wan Kim, Jo Hyun Kyoung, Sa Young Hong, Seok Kyu Cho and In Won Lee

Key Words : Floating Structure(부유식 구조물), Natural Mode(고유모드), Connection(접합부)

ABSTRACT

Natural modes and responses of floating structures under wave loads are analyzed by direct method considering the stiffness of unit connections. Two types of connection such as tandem connection and side by side connection are considered in numerical examples. By analyzing natural modes and connection forces, influences of connection stiffness on responses of floating structures are investigated.

1. 서론

최근, 친환경적인 해상구조물의 형태로써 부유식 구조물에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있다. 부유식 구조물은 일반적으로 대형 구조물이므로 도크 또는 육상에서의 일체형 시공은 어려우며 해상에서 다수의 유닛을 결합하여 시공하게 된다. 따라서, 파랑하중을 받는 부유식 구조물에 있어서 유닛과 유닛의 접합부에 발생하는 하중은 접합부의 강도에 따라 민감하게 변화한다. 그러므로, 부유식 구조물의 실제에 있어서 접합부의 강도를 평가하고 그에 따른 응답 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구의 목적은 접합부의 강도에 따른 부유식 구조물의 고유모드 및 접합부 하중의 특성을 파악하고 고유모드 특성과 접합부 하중 사이의 연관성을 고찰하는 데에 있다.

2. 운동방정식의 정식화

파랑하중을 받는 부유식 구조물의 해석에 있어서 구조물의 유연성이 무시될 수 없을 경우 유체와 구조물의 상호작용이 고려되어야 한다. 유체와 구조의 상호작용 해석을 위한 수치적 방법으로는 직접법⁽¹⁾, 모드법⁽²⁾, 고유함수법⁽³⁾ 등이 있으며 본 연구에서는 직접법을 적용하였다. 직접법의 과정을 요약하면 다음과 같다. 유체 유동은 식 (1)의 라플라스 방정식과 식 (2)의 자유표면 방정식으로부터 묘사할 수 있다. 식 (1), (2)에서 ϕ_I 는 입사포텐셜, ϕ_S 는 산란포텐셜, ϕ_R 은 방사포텐셜을 나타내며 ω 는 입사파의 진동수를 나타낸다.

$$\nabla^2 \phi_I = 0, \quad \nabla^2 \phi_S = 0, \quad \nabla^2 \phi_R = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_S = 0, \quad \frac{\partial \phi_R}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_R = 0 \quad (2)$$

구조물의 운동방정식은 유한요소법을 이용하여 식 (3)과 같이 구성할 수 있으며 $[M]$, $[K]$, $\{w\}$ 는 각각 질량행렬, 강성행렬, 변위벡터를 나타내며 $\{N\}$ 은 형상함수벡터, p 는 압력을 나타낸다.

$$(-\omega^2[M] + [K])\{w\} = \sum_{\text{element}} \{N\} p ds \quad (3)$$

한편, 구조물과 유체가 접하는 면에서는 식 (4)와 같은 속도 적합 조건과 식 (5)의 압력 조건이 성립한다. 식 (4)와 (5)에서 w_z 는 구조물의 수직변위를 나타낸다.

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial z} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial z}, \quad \frac{\partial \phi_R}{\partial z} = -i\omega w_z \quad (4)$$

$$p = i\omega\rho(\phi_I + \phi_S + \phi_R) - \rho g w_z \quad (5)$$

식 (1)~(5)를 연립하면 식 (6)과 같이 상호작용 해석을 위한 최종 방정식이 수립된다. 식에서 $[M_w]$ 는 부가질량행렬, $[C_w]$ 는 유체역학적 감쇠행렬, $[K_w]$ 는 부력스프링 행렬, $\{f\}$ 는 파랑하중 벡터를 나타낸다.

$$(-\omega^2[M + M_w] - i\omega[C_w] + [K + K_w])\{w\} = \{f\} \quad (6)$$

부유 구조물의 접합부의 강도를 고려할 경우 식 (6)의 수정이 요구되며 본 연구에서는 3자유도 스프링요소를 도입하여 운동방정식의 강성행렬을 수정하였다. 만일, i 번째 절점과 j 번째 절점이 전단스프링으로 연결될 경우 강성행렬의 해당 요소는 다음과 같이 수정된다.

$$K(i, i)_{new} = K(i, i) + K_z, \quad K(i, j)_{new} = K(i, j) - K_z \quad (7)$$

$$K(j, i)_{new} = K(j, i) - K_z, \quad K(j, j)_{new} = K(j, j) + K_z$$

K_z 는 전단스프링의 스프링상수이다. 회전스프링이 연결될 경우에도 동일한 과정을 거친다.

식 (6)의 해로부터 구조물의 변위를 산출하며 변

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
E-mail : kimbw@kriso.re.kr
Tel : (042) 868-7524, Fax : (042) 868-7519
** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
*** 한국과학기술원

위를 식 (5)에 대입하여 구조물에 작용하는 압력을 구할 수 있다. 또한, 변위의 미분을 통해 응력, 분포 모멘트, 분포전단력 등을 산출한다. 접합부에 작용하는 전단력 및 휨모멘트는 접합선 상에서 분포전단력과 분포휨모멘트를 적분하거나 압력 및 관성력의 동적평형 조건을 도입함으로써 계산할 수 있다.

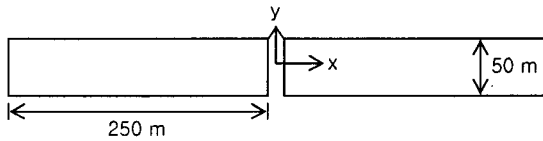
한편, 구조물의 고유모드는 식 (8)과 같은 고유치 문제를 풀어내어 산출할 수 있으며 고유치해법으로는 Lanczos 방법⁽⁴⁾, 부분공간반복법⁽⁵⁾ 등이 있으며 본 연구에서는 부분공간반복법을 적용하였다.

$$[K]\{u\} = \omega^2[M]\{u\} \quad (8)$$

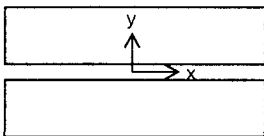
식 (8)에서 $\{u\}$ 는 모드형상을 묘사하는 고유벡터이고 ω 는 고유진동수이다.

3. 수치해석

수치해석은 2개의 유닛이 결합된 부유식 구조물을 대상으로 수행하였다. 고려 대상이 된 구조물은 두 가지로서 첫 번째는 두 유닛이 직렬로 연결된 형태이고 또 하나는 두 유닛이 나란하게 연결된 형태이다. 예제 구조물의 형상, 제원 및 해석조건을 그림 1과 표 1에 정리하였다.



(a) 직렬 연결 구조물



(b) 병렬 연결 구조물

그림 1. 예제 구조물의 형상

표 1. 예제 구조물의 제원

수심 (m)	30
흘수 (m)	2
I/B (m^3)	0.667
탄성계수 (Pa)	2.06×10^{11}
포아송비	0.3
해수 밀도 (kg/m^3)	1025
입사각 (도)	0, 22.5, 45, 67.5, 90
입사파 진동수 (rad/sec)	0.2~8.0

접합부의 스프링강도는 표 2와 같이 네 단계로 구분하여 해석을 수행하였다. 표 2에서 K_z 는 전단 스프링 상수이며 K_{ϕ} 는 x축 중심 회전스프링 상수

로서 직렬 구조물의 경우 비틀림스프링 상수에 해당하고 병렬 구조물의 경우 휨스프링 상수에 해당한다. K_{ϕ} 는 y축 중심 회전스프링 상수로서 직렬 구조물의 경우 휨스프링 상수에 해당하고 병렬 구조물의 경우 비틀림스프링 상수에 해당한다.

표 2. 예제 구조물 접합부의 스프링강도

Springs	K_z (MN/m)	$K_{\phi x}$ (GN-m/rad)	$K_{\phi y}$ (GN-m/rad)
Spring 1	10	10	10
Spring 2	50	50	50
Spring 3	100	100	100
Spring 4	1000	1000	1000

그림 2~11에 해석 결과를 제시하였다. 그림 2와 3은 직렬 및 병렬 구조물의 고유진동수 및 모드형상을 나타내며 그림 4~11은 구조물의 접합부에 발생하는 전단력과 휨모멘트를 파도의 주파수 및 입사각에 따라 제시하고 있다. 그림 2~11에서 'one body'는 접합부가 없는 일체형 구조물의 거동을 나타내며 그림으로부터 스프링강도가 증가함에 따라 접합부가 있는 구조물들의 거동이 일체 구조물의 거동에 수렴함을 알 수 있다. 이론상으로 접합부의 스프링강도가 무한대이면 구조물은 일체 구조물과 동일한 거동을 하게 된다. 직렬 구조물의 경우 접합부의 강도가 스프링 1 및 스프링 2에 해당하는 구조물의 제3모드에서 비틀림 모드가 발생하는 것을 제외하고 전반적으로 접합부의 스프링강도에 관계없이 지배모드가 유사함을 알 수 있는데 그것은 접합선의 길이가 구조물의 길이에 비해 짧아 진동 모드에 영향을 크게 미치지 못하기 때문이다. 또한, 접합부에 발생하는 전단력 및 휨모멘트(그림 4~7)에 있어서도 접합부 강도에 따라 그 크기는 다르지만 입사각이 달라져도 분포 양상은 유사함을 알 수 있다. 한편, 접합부 하중은 주로 저주파 영역에서 크게 발생함을 알 수 있다. 병렬 구조물의 경우 직렬 구조물과 달리 접합선의 길이가 구조물의 길이와 대등하여 구조물의 운동에 미치는 영향이 커 접합부의 스프링강도에 따라 지배모드가 다소 차이가 있음을 알 수 있으며 특히 접합부의 강도가 스프링 1인 구조물의 경우 스프링 강도가 상대적으로 약하여 제1~3모드가 스프링의 3자유도 변형 방향과 관계되는 비틀림 모드, 전단 모드, 휨 모드임을 알 수 있다. 또한, 그림 8~11에서도 알 수 있듯이 접합부에 발생하는 전단력 및 휨모멘트의 분포양상도 입사각에 따라 다르며 특히 스프링 1의 구조물의 경우 다른 접합부의 구조물과 하중 분포가 상당히 다름을 관찰할 수 있다.












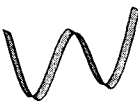



Springs	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
Spring 1	 0.05 Hz	 0.23 Hz	 0.31 Hz
Spring 2	 0.08 Hz	 0.30 Hz	 0.53 Hz
Spring 3	 0.10 Hz	 0.31 Hz	 0.58 Hz
Spring 4	 0.11 Hz	 0.32 Hz	 0.63 Hz
One body	 0.12 Hz	 0.32 Hz	 0.63 Hz

그림 2. 직렬 구조물의 고유진동수 및 모드형상


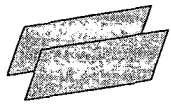
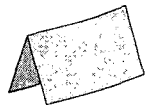
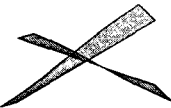
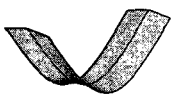
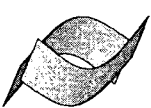
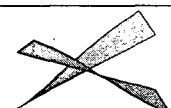
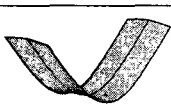
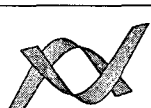


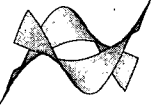

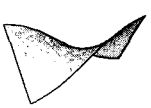
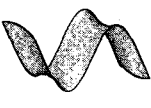
Springs	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
Spring 1	 0.15 Hz	 0.28 Hz	 0.31 Hz
Spring 2	 0.32 Hz	 0.47 Hz	 0.62 Hz
Spring 3	 0.42 Hz	 0.47 Hz	 0.74 Hz
Spring 4	 0.47 Hz	 0.67 Hz	 1.30 Hz
One body	 0.47 Hz	 0.72 Hz	 1.31 Hz

그림 3. 병렬 구조물의 고유진동수 및 모드형상

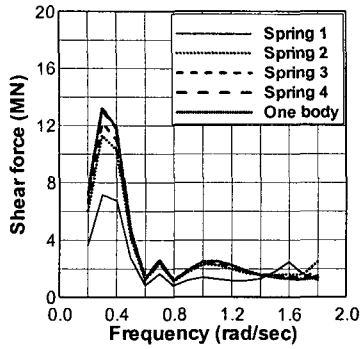


그림 4. 직렬 구조물 접합부의 전단력(입사각=0도)

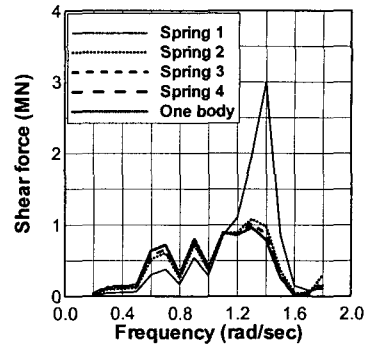


그림 8. 병렬 구조물 접합부의 전단력(입사각=45도)

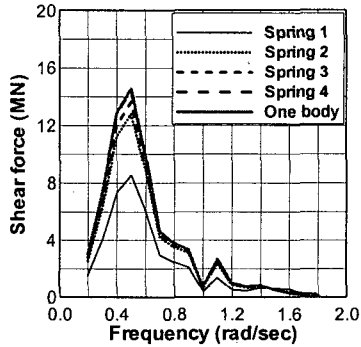


그림 5. 직렬 구조물 접합부의 전단력(입사각=45도)

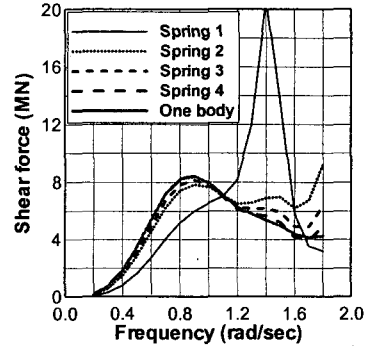


그림 9. 병렬 구조물 접합부의 전단력(입사각=90도)

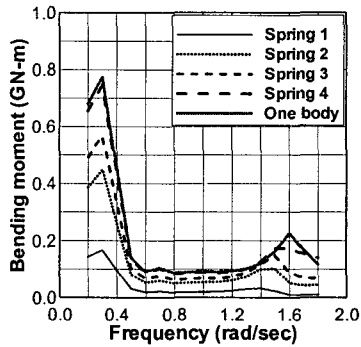


그림 6. 직렬 구조물 접합부의 휨모멘트(입사각=0도)

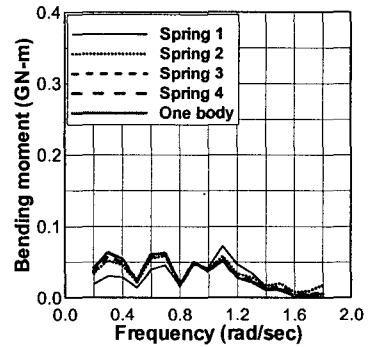


그림 10. 병렬 구조물 접합부의 휨모멘트(입사각=45도)

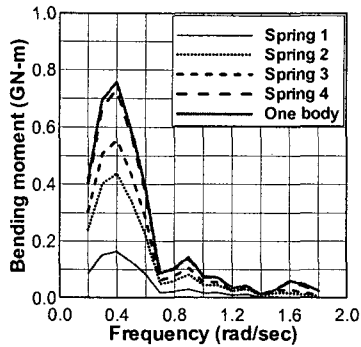


그림 7. 직렬 구조물 접합부의 휨모멘트(입사각=45도)

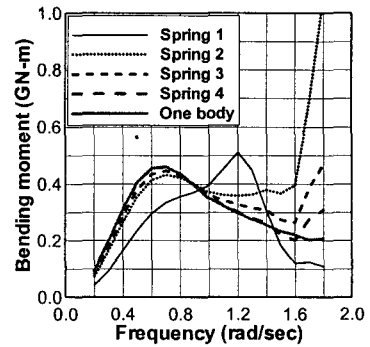


그림 11. 병렬 구조물 접합부의 휨모멘트(입사각=90도)

4. 결 론

본 연구에서는 파랑하중을 받는 부유식 구조물에 대하여 접합부의 강도에 따라 고유모드 특성을 파악하고 접합부에 발생하는 하중의 특성을 고찰하였다. 수치해석 대상이 된 구조물은 유닛이 직렬 및 병렬로 연결된 구조물로서 연결 형태에 따른 응답 특성의 차이를 더불어 논의하였다.

직렬 구조물의 경우 접합선의 길이가 구조물의 길이에 비해 짧아 진동 모드에 영향을 크게 미치지 못하므로 스프링강도에 관계없이 지배모드가 유사하며 파도의 입사각이 달라도 접합부에 발생하는 전단력 및 휨모멘트의 분포 양상은 유사하다. 반면, 병렬 구조물의 경우 접합선의 길이가 구조물의 길이와 대등하여 구조물의 운동에 미치는 영향이 크므로 스프링강도에 따라 지배모드가 다소 다르며 접합부에 발생하는 전단력 및 휨모멘트의 분포 양상도 입사각에 따라 다르다.

후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 해양수산 연구개발과제인 '초대형 부유식 해상구조물 기술개발' 사업의 일부로 수행되었음을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

(1) Yago, K. and Endo, H., 1996, "On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.180, pp.341~352.

(2) Maeda, H., Masuda, K., Miyajima, S. and Ikoma, T., 1995, "Hydroelastic Responses of Pontoon Type Very Large Floating Offshore Structures," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.178, pp.203~212.

(3) Kim, J.W. and Ertekin, R.C., 1998, "An Eigenfunction-Expansion Method for Predicting Hydroelastic Behavior of a Shallow-Draft VLFS," *Proceedings of the 2nd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*, pp.47~59.

(4) Lanczos, C., 1950, "An Iteration Method for the Solution of the Eigenvalue Problem of Linear Differential and Integral Operators," *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, Vol.45, No.4, pp.255~282.

(5) Bathe, K.J. and Ramaswamy, S., 1980, "An Accelerated Subspace Iteration Method," *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.23, pp.313~331.