

# 모듈형 부유구조물의 고유모드 고찰

## Natural modes of modularized floating structures

김병완† · 홍사영\* · 경조현\* · 조석규\*

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

**Key Words** : floating structures(부유구조물), module unit(모듈유닛), natural mode(고유모드), static response(정적응답)

### ABSTRACT

This paper investigates the natural modes and static responses of modularized floating structure. As an example structure, a floating parking place(120m×60m) is considered. In the evaluation of natural modes and static responses, numerical equations are formulated by FEM(Finite Element Method) and the natural modes are solved by subspace iteration method. By comparing responses of structures of various sizes of module unit, the effect of unit size is also investigated.

### 1. 서론

대체 해양구조물로서 최근 널리 연구되고 있는 부유식 해상구조물은 구조물 하부의 해수순환을 방해하지 않고 해저에 부착되는 지지구조물이 요구되지 않으므로 환경 및 시공 측면에서 다양한 장점이 있다. 그러한 부유구조물의 실제 시공 수단으로서 대규모 유닛을 제작한 후 해상에서 용접 등의 방법으로 접합하는 일체형 제작 방식을 고려할 수 있다. 그러나 그러한 일체형 구조물은 대규모 유닛의 제작이 현실적으로 어렵고 시공이 난이하며 사후 재활용이 까다로울 수 있는 문제점을 내포한다. 그러한 일체형 구조물의 단점을 해결하는 방안으로서 모듈형 부유구조물이 제안되어 적용성을 고찰한 바 있다<sup>(1)</sup>. 모듈형 부유구조물은 소규모 모듈유닛을 미리 제작한 후 커넥터로 결합하여 시공할 수 있다. 이때, 모듈유닛의 규격화가 가능하고 커넥터를 본체와 분리할 수 있으므로 제작 및 공급의 용이성, 시공의 편리성, 분리 및 재활용 가능성 등의 장점을 기대할 수 있다. Fig. 1은 모듈형 부유구조물 및 커넥터에 대한 개념도를 나타낸다.

본 연구의 목표는 그러한 모듈형 부유구조물의 고유진동수와 정적응답을 해석함으로써 동적특성과 정적응답 수준을 고찰하는데 있다. 또한, 모듈유닛의 크기를 변화시켜 해

는데 있다. 예시 구조물로서 길이 120m, 폭 60m의 해상주차장을 대상으로 해석을 수행하였으며 모듈유닛의 크기를 변화시키면서 고유진동수, 모드형상, 정적하중에 의한 처짐 및 응력 등을 고찰하였다.

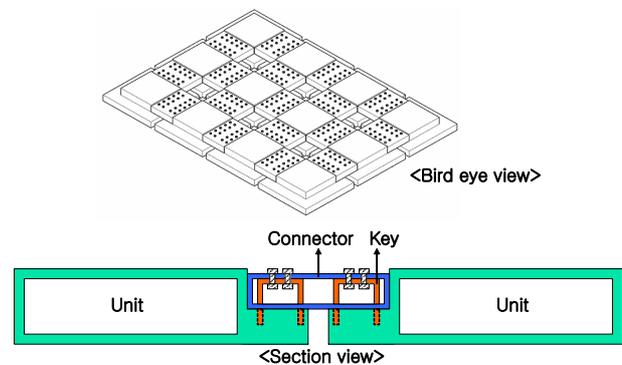


Fig. 1 Sketch of floating modularized structure

### 2. 예시구조물 제원

해석 대상이 된 예시구조물은 길이가 120m이고 폭이 60m인 부유식 해상주차장으로서 철근콘크리트 박스형 모듈을 강박스형 커넥터로 연결하여 제작한 것으로 가정하였다. 구조물에 작용하는 정하중으로서 구조물의 자중과 주차된 차량의 무게를 고려하였다. 일체형 구조물과 모듈형 구조물의 고유모드 및 정적응답을 비교하였으며 아울러 모듈유닛의 크기를 30m×30m, 10m×10m 등으로 변화시켜 결과를 비교함으로써 모듈유닛의 크기에 따른 효과를 고찰하였

† 한국해양연구원 해양시스템안전연구소  
E-mail : kimbw@moeri.re.kr  
Tel: (042) 888-7524, Fax : (042) 888-7519

\* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소  
석을 수행함으로써 모듈유닛의 크기에 따른 거동을 비교하

다. Table 1은 예시구조물의 제원과 정하중조건 등을 나타낸다.

**Table 1** Particulars of example structure

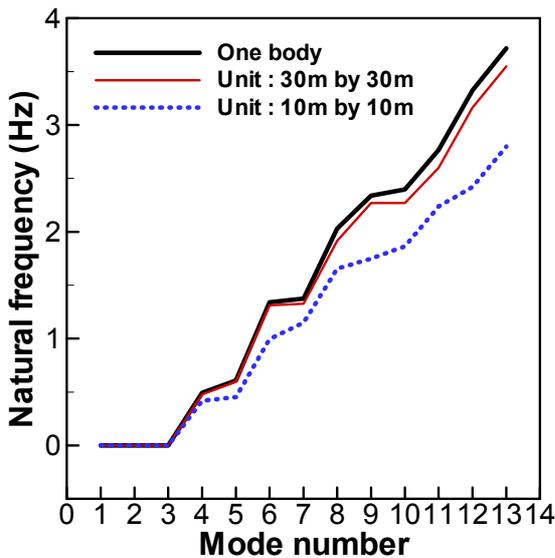
용도	해상주차장 (주차능력: 276대)		비고
본체 제원	구조형식	철근콘크리트 박스	
	길이×폭 (m×m)	120×60	2,178 평
	높이 (m)	3	
	두께 (m)	0.185	
	철근배치 (ea/m)	26	D25
커넥터 제원	단위폭 횡강도 (I/B) (m <sup>3</sup> )	0.04	
	구조형식	강박스	
	높이 (m)	2	
	두께 (m)	0.015	
정하중 조건	단위폭 스프링강도 (N-m/m)	4.0585×10 <sup>9</sup>	
	자중 (ton)	11,299	하부구조+커넥터
	활하중 (ton)	1,800	3ton 기준 600대
	계 (ton)	13,099	틀수: 2m

### 3. 예시구조물의 고유모드 고찰

예시 구조물의 고유모드는 식 (1)과 같은 고유치문제 방정식의 해로부터 산출할 수 있다.

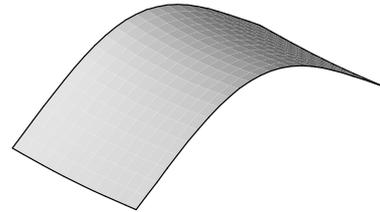
$$[K]\{u\} = \omega^2[M]\{u\} \quad (1)$$

식 (1)에서 [K]는 강성행렬, [M]은 질량행렬, {u}는 모드형상 벡터,  $\omega$ 는 고유진동수이다. 방정식의 정식화는 여러 가지 방법으로 가능하나 본 연구에서는 Mindlin 평판요소를 도입한 유한요소법<sup>(2)</sup>을 이용하였다. 방정식의 해, 즉 고유진동수와 모드형상 벡터를 구하는 고유치 해법 또한 여러 가지가 있으며 본 연구에서는 비교적 널리 사용되고 있는 부분공간반복법<sup>(3)</sup>을 이용하였다.

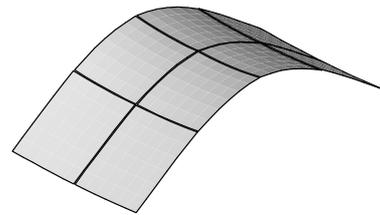


**Fig. 2** Natural frequencies of example structure

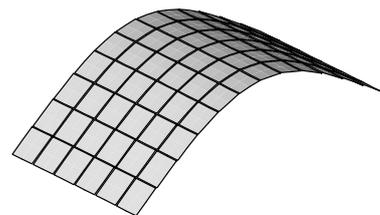
고유모드 해석 결과가 Figs. 2~8에 제시되어 있다. Fig. 2는 예시구조물의 고유진동수를 나타내고 Figs. 3~8은 예시구조물의 모드형상으로서 휨모드 및 비틀림모드에 해당하는 형상을 제시하고 있다. 일체형 구조물인 경우, 모듈유닛의 크기가 30m×30m인 경우, 모듈유닛의 크기가 10m×10m인 경우 등을 비교하였다. 예시구조물의 제 1, 2, 3 모드는 평판의 3자유도 강체모드로서 고유진동수는 모두 0이다. 제 4모드는 휨 변형과 관계된 모드이고 제 5 모드는 비틀림 변형과 관련된 모드이다. 모듈유닛의 크기가 작을수록 고유진동수 값이 다소 작음을 알 수 있는데 그것은 모듈이 작을수록 접합부가 많아져 커넥터의 영향이 커지기 때문이다. 반면, 모듈유닛의 크기가 작아지더라도 모드형상은 크게 변하지 않음을 알 수 있는데 그것은 예시구조물에 적용된 커넥터의 스프링 강도가 충분히 커서 모듈 간의 연속성이 확보된 것을 의미한다.



**Fig. 3** Bending mode shape of example structure (one body)



**Fig. 4** Bending mode shape of example structure (unit size = 30m×30m)



**Fig. 5** Bending mode shape of example structure (unit size = 10m×10m)

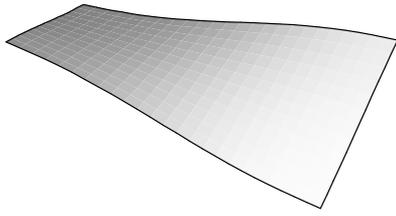


Fig. 6 Torsion mode shape of example structure (one body)

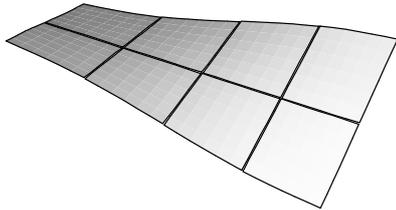


Fig. 7 Torsion mode shape of example structure (unit size = 30m×30m)

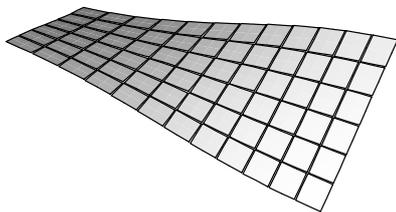


Fig. 8 Torsion mode shape of example structure (unit size = 10m×10m)

#### 4. 예시구조물의 정적응답 고찰

예시구조물의 경우 모듈유닛 및 커넥터 등의 자중과 주차 차량의 무게 등으로 인해 정적 처짐이 발생하며 그에 따라 본체 및 커넥터에 응력이 발생한다. 정적응답은 식 (2)의 평형방정식을 풀어냄으로서 산출할 수 있다.

$$([K] + [K]_b)\{w\} = \{f\} \quad (2)$$

식 (2)에서  $[K]$ 는 평판의 강성행렬,  $[K]_b$ 는 부력스프링에 따른 강성행렬,  $\{w\}$ 는 변위 벡터,  $\{f\}$ 는 정하중에 따른 하중벡터이다. 고유모드 해석의 경우와 마찬가지로 방정식의 정식화는 유한요소법을 적용하였으며 방정식의 풀이는 널리 알려진 LDL<sup>T</sup> 분해 방법을 이용하였다.

Fig. 9는 예시구조물의 정적 처짐을 도시한 것으로서 길

이방향 중심선의 처짐 형상을 비교하고 있다. 세 경우 모두 평균적인 처짐은 홀수 값인 2m로서 동일하나 처짐 곡선의 곡률은 서로 다름을 알 수 있다. 즉, 모듈형 구조물의 경우 접합효과로 인해 하중의 전달이 다소 차단되므로 일체형 구조물에 비해 처짐 곡률이 작으며 모듈유닛의 크기가 작을수록 그러한 하중 차단 효과가 더 커져서 곡률이 더욱 작음을 알 수 있다. Table 2는 정적 처짐에 따라 발생하는 응력을 제시하고 있다. 표에서 'Concrete'는 모듈의 콘크리트 박스 연단부에 발생하는 압축응력을 의미하며 'Compressive steel'과 'Tensile steel'은 압축 철근부 및 인장 철근부에 발생하는 응력을 나타낸다. 'Connector'는 강박스로 구성된 커넥터 연단에서의 응력을 의미한다. 모듈형 구조물의 경우 일체형 구조물에 비해 곡률이 작으므로 응력 또한 작음을 알 수 있다. 또한, 모듈유닛의 크기가 작을수록 곡률이 더 작아지므로 응력이 더욱 감소됨을 알 수 있다. 즉, 정적 안전성에 있어서 모듈유닛의 크기가 작을수록 더 유리함을 의미한다. 물론, 모듈유닛의 크기가 작을수록 커넥터 소요량이 더욱 많아지므로 시공 및 비용 문제가 추가적으로 발생할 수 있으며 그에 대한 추후 연구가 필요하다.

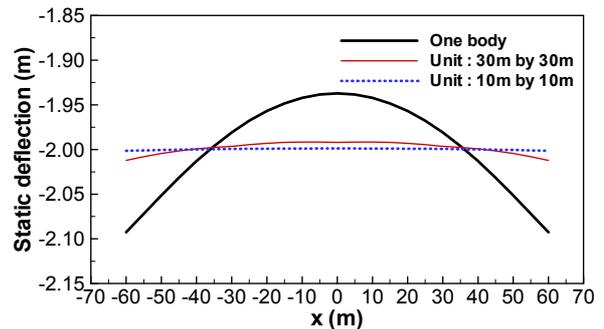


Fig. 9 Static deflection of center line of example structure

Table 2 Stresses of example structure under static load (unit = MPa)

Cases	Concrete	Compressive steel	Tensile steel	Connector
One body	1.819	12.225	58.531	-
Unit size 30m×30m	0.569	3.823	18.304	3.248
Unit size 10m×10m	0.089	0.600	2.874	0.228

#### 5. 결론

본 연구에서는 모듈형 부유구조물의 고유모드와 정적응답을 고찰하고 모듈유닛의 크기에 따른 거동을 비교하였다.

길이가 120m이고 폭이 60m인 부유식 해상주차장을 대상으로 해석을 수행하였으며 해석 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 모듈유닛의 크기가 작을수록 고유진동수는 다소 작지만 커넥터의 스프링 강도로 인해 모듈 간의 연속성이 확보되므로 모드형상은 크게 변하지 않는다.
- (2) 정적응답에 있어서 모듈유닛의 크기가 작을수록 처짐의 곡률이 작아서 구조물에 발생하는 응력이 작다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- (1) 김병완, 홍사영, 경조현, 2006, "모듈형 부유구조물의 적용성 연구," 한국해양공학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp.237~240.
- (2) Donea, J. and Lamain, L.G., 1987, "A Modified Representation of Transverse Shear in  $C^0$  Quadrilateral Plate Elements," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.63, pp.183~207.
- (3) Bathe, K.J. and Ramaswamy, S., 1980, "An Accelerated Subspace Iteration Method," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.23, pp.313~331.