

모듈형 부유구조물의 적용성 연구

김병완* · 홍사영* · 경조현*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양플랜트연구사업단

Investigation on Applicability of Modularized Floating Structure

BYOUNG WAN KIM*, SA YOUNG HONG* AND JO HYUN KYOUNG*

*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Floating Structure 부유구조물, Modularized Structure 모듈형 구조물, Direct Method 직접법

ABSTRACT: This paper investigates the applicability of modularized floating structure. A floating parking place is considered as an example of modularized structure. It is assumed that the example structure is composed of reinforced concrete box modules and steel connectors. By analyzing stresses of the structure under static and wave loads, the optimal stiffness of the module is determined. In the numerical calculation, the direct method is used. Economical effectiveness of the modularized structure is also evaluated by analyzing cost for materials, manufacture and installation.

1. 서 론

해상 시설물의 구조형식으로서 최근 널리 연구되고 있는 부유구조물은 구조물 하부의 해수순환을 방해하지 않고 해저에 부착되는 지지구조물이 필요없는 등 환경 및 시공 측면에서 여러모로 잇점이 있다. 그러한 부유구조물을 실제 해상구조물에 적용하려는 시도가 이루어지면서 부유식 공항, 부유식 이동기지, 부유식 마리나리조트, 부유식 컨테이너터미널 등이 국내외 연구를 통해 설계된 바 있다. 부유구조물의 시공 방법으로서 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. 본 연구에서는 일체형 구조물의 대안으로서 모듈형 부유구조물을 제안하고자 한다. 모듈형 부유구조물은 규격화된 소규모 모듈 들을 미리 제작한 후 분리 가능한 커넥터 등을 이용하여 결합하는 방식으로 시공되는 구조물로서 규격화된 소규모 모듈을 이용하므로 제작 및 공급이 용이하며 시공이 편리하며 분리 및 재활용이 가능한 장점을 기대할 수 있다. Fig. 1은 모듈형 부유구조물 및 커넥터의 일례를 개념적으로 도시하고 있다.

본 연구의 목표는 그러한 모듈형 부유구조물의 예시구조물을 선정하여 최적설계 및 경제성 분석을 수행함으로써 그 적용성을 평가하는데 있다. 본 연구에서는 예시구조물로서 부유식 해상주차장을 고려하였으며 정하중 및 파랑하중에 따른 응답을 고찰하여 최적강도를 도출하고 도출된 재원으로부터 재료비, 제작비, 설치비 등의 시공비용을 산출하여 경제성을 고찰하였다.

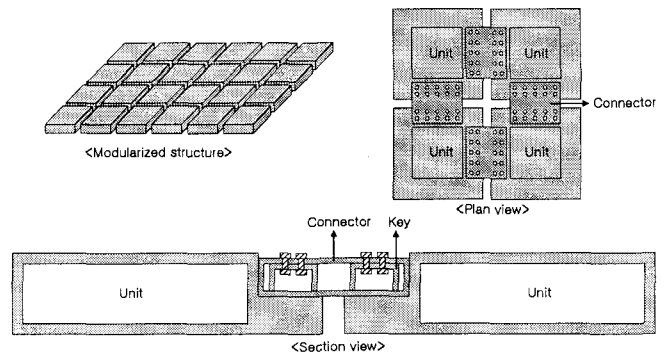


Fig. 1 Sketch of modularized floating structure and connection

2. 부유구조물의 응답해석

부유구조물을 설계하기 위해서는 파랑에 대한 응답 해석이 필수적이다. 부유구조물의 응답해석 기법으로서 모드법(Maeda et al., 1995; Kashiwagi and Furukawa, 1997), 고유함수법(Kim and Ertekin, 1998; Hong et al., 2003), 직접법(Yago and Endo, 1996; Yasuzawa et al., 1997) 등이 있으며 모드법과 고유함수법은 수치적으로 매우 효율적인 반면 적용이 가능한 구조물의 형상과 강성분포가 제한되어 있다. 직접법은 계산용량이 많아 계산시간면에서 비효율적이지만 불규칙한 형상과 강성분포의 구조물을 쉽게 해석할 수 있는 잇점이 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 구조물은 모듈과 모듈 사이에 커넥터가 부착되어 강성분포가 불규칙하므로 응답해석 기법으로서 직접법을 이용하였다.

직접법을 통한 응답해석 운동방정식은 다음의 과정으로 수립한다. 구조물의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

제1저자 김병완 연락처: 대전광역시 유성구 장동 373-1

042-868-7524 kimbw@moeri.re.kr

$$(-\omega^2[M] + [K])\{w\} = \sum_e \int \{N\} p ds \quad (1)$$

[M]과 [K]는 각각 질량행렬, 강성행렬로서 유한요소법 등을 통해 구성할 수 있다. {w}는 변위벡터이고 {N}은 형상함수이며 p는 압력, ω는 파도의 진동수이다. 첨자 e는 유한요소 상에서의 계산을 의미한다. 구조물 주위의 유체유동은 식 (2)의 라플라스 방정식과 식 (3)의 베르누이 방정식으로부터 묘사된다.

$$\nabla^2(\{\phi_I\} + \{\phi_S\} + \{\phi_R\}) = \{0\} \quad (2)$$

$$\{p\} = i\omega\rho(\{\phi_I\} + \{\phi_S\} + \{\phi_R\}) - \rho g\{w_z\} \quad (3)$$

{φ_I}, {φ_S}, {φ_R}는 각각 입사파, 산란파, 방사파 포텐셜로서 이 중 방사파는 구조물과의 접합면에서 식 (4)와 같은 속도적합 조건을 만족한다.

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

식 (4)의 우변에서 {w_z}는 구조물의 수직변위로서 풀어내야 할 미지수이므로 기지수로 변환해야 하며 직접법에서는 그 방법으로서 식 (5)와 같은 변환을 이용한다.

$$\{\phi_R\} = [\Phi_R]\{w_z\} \quad (5)$$

식 (5)에서 [Φ_R]은 물리적으로 단위운동포텐셜을 나타내며 식 (5)를 식 (4)에 대입함으로써 식 (6)과 같은 새로운 경계치 방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial [\Phi_R]}{\partial z} = -i\omega[I] \quad (6)$$

식 (2) 및 (6)의 해는 고차경계요소법 등으로 산출할 수 있다. 식 (1), (3), (5) 등을 조합하면 식 (7)과 같은 유체-구조 상호작용 운동방정식을 최종적으로 수립할 수 있다.

$$(-\omega^2[M] - \omega^2[M_w] - i\omega[C_w] + [K] + [K_w])\{w\} = \{f\} \quad (7)$$

식 (7)에서 [M_w], [C_w], [K_w], {f}는 각각 부가질량행렬, 감쇠행렬, 부력스프링행렬, 기진력벡터 등으로서 식 (8)~(11)과 같다.

$$[M_w] = -\sum_e \int \frac{\rho}{\omega} \{N\} \{N\}^T \text{Im}[\Phi_R]_e ds \quad (8)$$

$$[C_w] = \sum_e \int \rho \{N\} \{N\}^T \text{Re}[\Phi_R]_e ds \quad (9)$$

$$[K_w] = \sum_e \int \rho g \{N\} \{N\}^T ds \quad (10)$$

$$\{f\} = \sum_e \int i\omega\rho \{N\} \{N\}^T ds (\{\phi_I\} + \{\phi_S\}) \quad (11)$$

본 연구에서 고려되는 구조물은 커넥터가 존재하므로 커넥터의 특성이 운동방정식에 고려되어야 하며 커넥터를 스프링으로 묘사하여 식 (7)의 강성행렬에 반영하는 방법을 이용할 수 있다. 본체 구조물의 수치격자 상에서 i번째 절점과 j번째 절점이 스프링으로 연결될 경우 해당하는 강성행렬의 항은 다음과 같이 수정한다.

$$\begin{aligned} K(i,i)_{new} &= K(i,i) + K_s \\ K(i,j)_{new} &= K(i,j) - K_s \\ K(j,i)_{new} &= K(j,i) - K_s \\ K(j,j)_{new} &= K(j,j) + K_s \end{aligned} \quad (12)$$

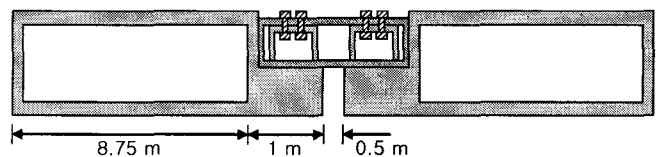
K_s는 스프링강도로서 커넥터의 특성에 따라 전단강도, 휨강도, 비틀림강도 등으로 표현된다.

3. 예시구조물 최적설계 및 경제성 검토

본 연구에서는 모듈형 부유구조물의 예시구조물로서 길이가 120m이고 폭이 60m인 부유식 해상주차장을 고려하였다. 10m×10m의 철근콘크리트 박스형 모듈 72개를 강재 커넥터로 연결하여 여수 엑스포 지역에 설치한 것으로 가정하였으며 설계 하중으로서 사하중, 활하중 등의 정하중과 파랑하중을 고려하였다. 구조물의 제원과 설계조건 등을 Table 1에 정리하였다. 모듈 연결부는 두께 1.5cm의 강박스 커넥터를 이용하여 Fig. 2와 같이 구성하였으며 등가의 휨스프링 강도는 단위 길이당 4.0585×10⁹ N/rad이다.

Table 1 Design condition of example structure

구조물 용도	해상주차장 (주차능력: 276대)		비고
	길이×폭 (m×m)	120×60	
구조물 조건	유닛 개수	72	유닛 크기: 10m×10m
	높이 (m)	3	구조형식: 철근콘크리트 박스
	단위폭 강도(I/B) (m ³)	0.01~0.10	
정하중 조건	사하중 (ton)	11,299	자중 (하부구조+커넥터)
	활하중 (ton)	1,800	차량 (3ton 기준 600대)
	계 (ton)	13,099	흘수: 1.9411m → 2m
파랑하중 조건	주기 (sec)	4~15	
	파고 (m)	1	여수 엑스포 지역 태풍 시 황내 파고
	파향 (deg)	0, 45, 90	
	수심 (m)	8	여수 엑스포 지역 평균 수심



구조형식	강박스
높이 (m)	2
두께 (m)	0.015
단위길이 스프링강도 (N-m/rad/m)	4.0585×10 ⁹

Fig. 2 Particulars of connection part of example structure

응답 해석 결과가 Figs. 3~6에 제시되어 있다. Fig. 3은 커넥터에 발생하는 최대응력을 나타낸다. 모든 강도 수준에 대하여 허용치보다 작은 응력이 발생하므로 구성된 연결부는 적절한 것으로 보인다. Fig. 4는 철근콘크리트 박스의 콘크리트 연단부에서 발생하는 최대응력을 제시한 것으로서 모든 강도에 대해 허용치보다 작음을 알 수 있다. Fig. 5는 압축부 철근에 발생하는 최대응력을 제시한 그림으로서 마찬가지로 모든 강도 수준에서 허용치보다 작음을 알 수 있다. Fig. 6은 인장부 철근에 발생하는 최대응력을 제시하고 있다. 인장부 철근응력의 경우 단위폭 강도 0.03m^3 이하에서 허용응력을 초과하고 0.04m^3 이상에서 허용응력보다 작은 값을 보인다. 따라서 안정성이 확보되는 단위폭 강도의 최적값은 0.04m^3 로 도출되며 그에 따라 요구되는 철근콘크리트 박스 단면의 콘크리트 두께는 18.5cm이고 호칭 D25의 철근이 1m 당 26개가 소요된다.

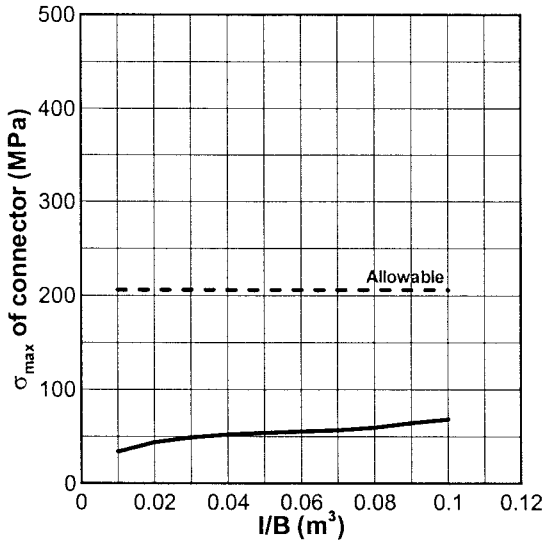


Fig. 3 Stresses of connector

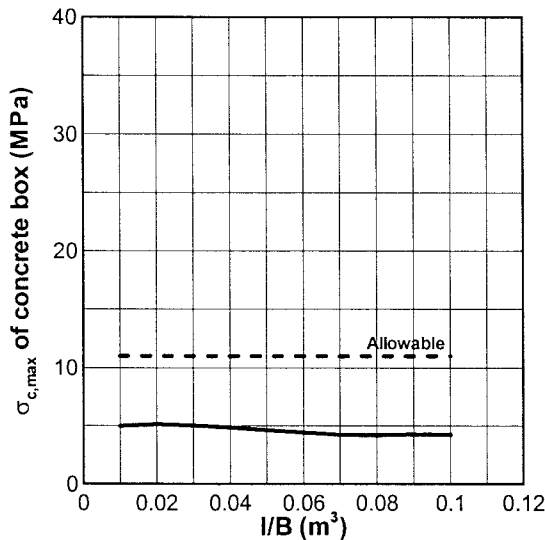


Fig. 4 Stresses of concrete box

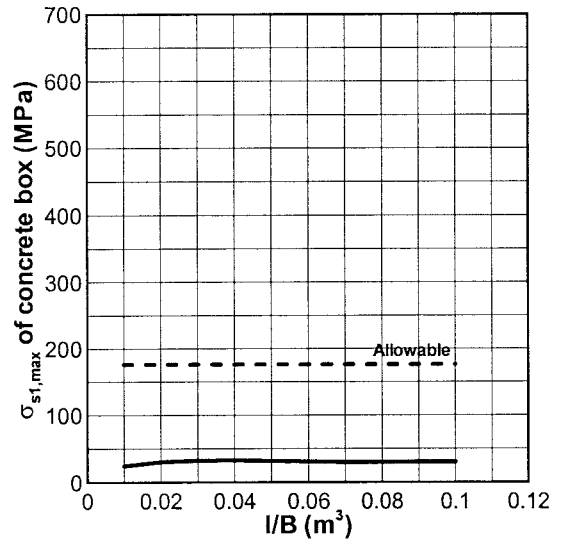


Fig. 5 Stresses of compressive steel bar

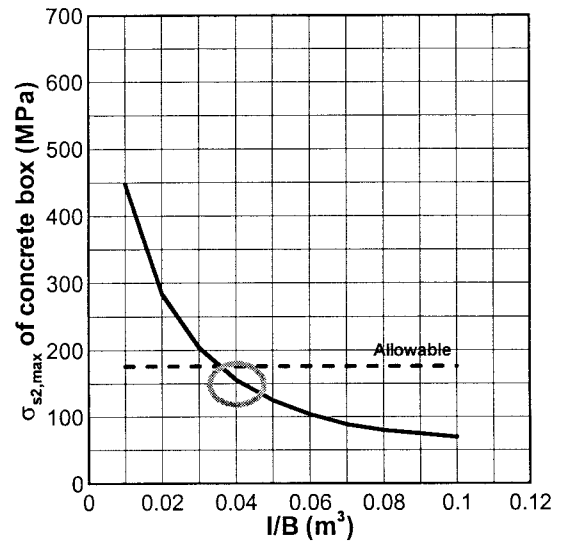


Fig. 6 Stresses of tensile steel bar

Table 2 Construction cost of example structure

구분	단가 (원)	단위	부피 (m³)	무게 (ton)	비용 (원)	비용 (원/평)	
재료비	철근	485,000	ton	1,363	660,847,857	303,420	
	콘크리트	58,310	m³	2,436	142,042,431	65,217	
	보강			1,218	3,544	401,445,144	184,318
	계			3,654	10,631	1,204,335,431	552,955
제작비	61,492	ton			653,703,944	300,140	
설치비	20,262	ton			215,399,553	98,898	
계			3,654	10,631	2,073,438,929	951,992	

설계 결과에 따라 콘크리트와 철근의 요구 수량이 결정되었으므로 재료비, 제작비, 설치비 등 시공비용을 분석할 수 있다. Table 2는 예시구조물의 시공비용을 요약하고 있다. 총 시공비는 약 21억 원으로서 평당 951,992 원이다. 부유구조물의 경우 시공비용이 일반적으로 평당 100만원 이하일 경우 경제성이 있는

것으로 알려져 있으며 본 예시구조물의 경우 평당 시공비가 951,992원으로서 100만원보다 작으므로 어느 정도 경제성을 확보한 것으로 판단한다.

4. 결 론

본 연구에서는 소규모 모듈형 부유구조물의 적용성을 검토하기 위하여 예시구조물을 대상으로 최적설계와 경제성분석을 수행하였으며 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 예시구조물은 길이 120m, 폭 60m의 부유식 해상주차장으로서 10m×10m의 철근콘크리트 박스형 모듈 72개를 강재 커넥터로 연결하여 여수 엑스포 지역에 설치한 것으로 가정하였으며 설계 결과로서 도출된 단위폭당 강도의 최적값은 0.04m³이다.

(2) 예시구조물에 소요되는 재료비, 제작비, 설치비 등 시공비용은 평당 991,952원으로서 평당 백만원 이하이므로 제시한 구조물은 경제성을 적절히 확보한 것으로 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

Hong, S.Y., Kim, J.W., Ertekin, R.C. and Shin, Y.S. (2003).

- "An Eigenfunction-Expansion Method for Hydroelastic Analysis of a Floating Runaway", Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp 121-128.
- Kashiwagi, M. and Furukawa, C. (1997). "A Mode-Expansion Method for Predicting Hydroelastic Behavior of a Shallow-Draft VLFS", Proceedings of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol 6, pp 179-186.
- 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.
- 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.
- 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.
- Yasuzawa, Y., Kagawa, K., Kawano, D. and Kitabayashi, K. (1997). "Dynamic Response of a Large Flexible Floating Structure in Regular Waves", Proceedings of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol 6, pp 187-194.