



# 부유구조물의 특징과 탄성 구조응답 해석방법



임 채 환\*

## 1. 서 언

육지공간의 활용이 사회적 경제적 측면에서 점점 어려워지고 절대공간도 점차 부족하여짐에 따라 넓은 해양으로 눈을 돌리게 되었으며, 해양공간 이용이라는 측면에서 부유구조물의 이용 검토와 건조 사례가 늘어나고 있는 추세이다. 이렇게 제안된 부유구조물은 기존의 해양 자원 탐사와 시추를 위한 해양구조물로부터 선착장, 화물 선적장, 거주시설, 발전소, 소각장, 길이가 수 km에 이르는 해상공항 등으로 기능도 매우 다양하다.

해상에서 구조물이 제 기능을 발휘하려면 의도하는 위치에 구조물이 고정되어 있어야 하며 구조물에 작용하는 하중에도 구조물의 일생 동안 견뎌야 한다. 소형 부유구조물은 종래의 부유구조물의 설계 방법, 하중 추정 및 구조해석 방법을 그대로 이용하면 되지만 구조물의 크기가 커지면 이러한 방법을 직접 이용하기에는 곤란한 점들이 많다. 우선 구조물의 운동특성이 강제운

동이 아니라 탄성운동이 되기 때문에 설계인자들이 달라지고 해석 방법도 달라지게 되기 때문이다.

구조물이 해상에 고정되면 여러가지로 환경에 영향을 미친다. 해양의 생태계가 파괴되지 않도록 조류의 흐름을 막지 않아야 하며, 생물의 생존에 필요한 태양광을 막지 않아야 한다. 또한 구조물의 건설로 인하여 생물들의 활동영역이 줄어드는 것도 최소한으로 하여야한다. 가장 이상적인 부유구조물은 환경에 순응하는 구조물을 설계하는 것일 것이다. 구조물에서 배출되는 폐수와 오수 등의 처리와 구조물의 강도가 약하여 구조물이 파손되어 환경을 오염시키는 일이 없어야 할 것이다.

한국기계연구원에서는 이러한 부유구조물 제작을 위한 기술개발을 위하여 6개년 계획으로 '해양공간이용 대형 복합플랜트 개발' 프로젝트를 산업계, 학계, 연구계와 협동하여 1996년부터 수행하고 있다<sup>1)</sup>. 2차년도까지는 부유구조물과 플

\* 한국기계연구원 구조시스템연구부, 선임연구원

랜트 설계를 위하여 기초연구와 설계를 병행하고 있고, 3차년도에는 실험용 부유구조물을 제작하고 소각로와 담수화 플랜트를 그 부유구조물에 탑재하여 실제 해상에서 운용하면서 각종 자료를 취득할 예정이다.

본고에서는 부유구조물의 특징을 살펴보고 부유구조물에 작용하는 하중과 파랑에 의한 구조응답 추정법 등에 대하여 살펴보기로 한다.

**2. 부유구조물의 구조적 특징**

부유구조물의 기능은 다양하여 현재까지 건설된 예는 해상공항, 원자력 발전소, 화력 발전소, 선착장 등이 있다. 그 크기도 길이가 수km나 되는 대형으로부터 수십m까지의 소형으로 기능에 따라 크기도 크게 다르다.

부유구조물의 특성은 크기에 따라 크게 달라진다. 우선 설계에 고려하여야 하는 운동성능이 소형에서는 강체운동으로 나타나고 대형에서는 탄성운동으로 나타난다. 이러한 운동특성의 차이에 따라 소형 부유구조물의 설계에서는 강체의 움직임이 파도와외의 공진을 회피하여 좋은 운동성능을 나타나게 할 수 있도록 질량 분포와 형상 설계를 하여야한다. 각 구조부재의 치수는 하중에 견딜 수 있는 충분한 강도와 상부에 설치된 각종 기구들이 제 성능을 발휘할 수 있도록 충분한 강성을 지니도록 결정된다. 따라서 구조부재의 치수 결

정은 운동성능과는 거의 독립적으로 이루어진다. 구조물의 질량분포는 상세설계가 이루어진 후에 결정되기 때문에 실제 설계에서는 운동성능 설계와 구조설계는 종래의 실적을 이용하여 실시하고 design spiral에 따라 조정한다.

한편 대형 부유구조물의 설계에서는 탄성응답이 좋은 운동특성을 얻기 위하여 질량 분포와 부유체 형상 이외에도 새로운 설계 파라미터인 전체강성 즉 굽힘강성, 전단강성을 고려하여 하중에 견딜 수 있는 충분한 강도와 강성을 지니는 동시에 전체강성은 좋은 동적 응답특성을 구현할 수 있도록 설계되어야 한다. 기본계획, 초기 구조설계 단계에서 전체강성을 고려하여 구조블록 등의 배치를 고려할 필요가 있다. 대형 부유구조물에서는 계류장치가 운동성능상 위치 유지뿐만이 아니고 강도설계에도 고려하여야 하기 때문에 구조설계에 부유구조물과 계류시스템을 일체로 보고 설계를 하여야 한다. 이와 같은 구조물의 크기에 따른 구조물의 특성을 Table 1에 나타내었다<sup>2)</sup>.

**3. 부유구조물의 종류**

부유구조물은 요구되는 기능에 따라 여러 가지 형식을 취할 수 있다. 현재 이용되고 있는 형태는 Table 2에 보인 것과 같이 폰툰(pontoon)형, 반잠수식(semi-submersible)형, 하부구조물이 있는 반잠수식(semi-submersible with lower hull)형 등으로 크게 3가지로 나눌 수 있다.

Table 1 Characteristics of floating barges<sup>2)</sup>

Size of floating structures	Motion characteristics	Factors influencing dynamic response	Structural design
Small	rigid body motion	configuration mass distribution	strength sufficient rigidity
Large	elastic motion	configuration mass distribution rigidity	strength rigidity fo good elastic response

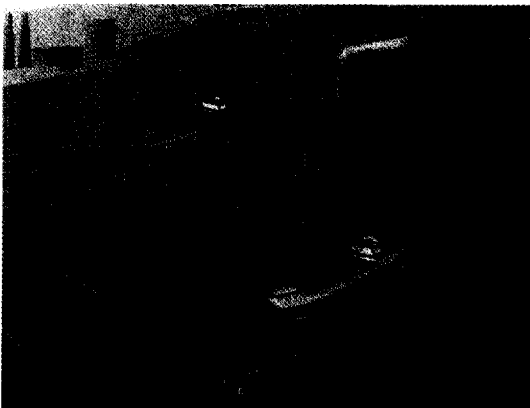


Fig. 1 Artistic view of an floating structure.

Table 2 Three types of floating structures

	Pontoon type	Semi-submersible	Semi-submersible with lower hull
Configuration	simple	complicated	complicated
Construction cost	low	high	high
Influence of wave	big	small	small
Pay load	large	small	medium
Righting moment	large	small	small
Bending rigidity	small	medium	large
Heave natural frequency	high	low	low

폰툰형은 형상이 다른 형식의 구조물 보다 단순하기 때문에 건조비가 상대적으로 적게 든다. 반면에 수면과 접촉하는 면적이 크기 때문에 파도에 의한 영향을 크게 받아 구조물의 움직임이 크다는 단점이 있다. 그러나 부력이 크기 때문에 적재중량과 복원력은 크다는 장점이 있다. 급험강성은 폰툰형이 작고 상하운동의 고유진동수는 크다. 반잠수식형과 하부구조물이 있는 반잠수식형 구조물의 특징은 폰툰형과는 거의 반대의 성질을 가지고 있다. 이러한 각 구조물의 형태에 따른 특징을 이용하여 구조물의 기능상 요구조건에 알맞은 형태를 취할 수 있다.

#### 4. 부유구조물에 작용하는 하중

자연환경에 의해서 부유구조물에 작용하는 하중은 파랑하중, 풍하중, 조류력, 지진에 의한 하중 등이 있다. 그 중 파랑하중의 추정은 다음 절에서 논하기로 하고 이 절에서는 나머지 하중에 대해서 논하기로 한다.

##### 4.1 풍하중

구조물이 받는 풍하중은 압력저항과 마찰저항으로 나눌 수 있다. 물체 표면에 작용하는 압력을 전 표면적에 대하여 적분하여 얻는 저항이 압

력저항이고 물체 표면의 마찰력에 의한 저항이 마찰저항이다.

압력저항은 다음 식으로부터 구한다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \sin \alpha \quad (1)$$

여기서  $C_D$ 는 형상저항계수,  $\rho$ 는 공기밀도,  $A$ 는 바람을 받는 물체 표면적,  $U$ 는 풍속,  $\alpha$ 는 바람의 방향과 물체표면이 이루는 각도이다.

마찰저항은 다음 식으로부터 구한다.

$$F_f = \frac{1}{2} C_f \rho S U^2 \cos^2 \alpha \quad (2)$$

여기서  $C_f$ 는 마찰저항계수,  $S$ 는 구조물의 표면적이다.

일반적으로 마찰저항은 압력저항 보다 아주 작아 무시 할 수 있지만, 표면적이 큰 대형 부유구조물에서는 무시 할 수 없다.

##### 4.2 조류력

조류는 간만의 차에 의하여 발생하는 해수의 수평운동이다. 따라서 조류는 시간에 따라 주기적으로 나타난다.

폰툰형 부유구조물에서는 조류에 의한 외력은 마찰저항으로 나타난다.

$$F_F = \frac{1}{2} C_F \rho S V^2 \quad (3)$$

여기서  $C_F$ 는 Reynolds수에 의존하는 마찰저항계수,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $S$ 는 부유구조물 바닥의 면적,  $V$ 는 부유구조물 바닥에서의 조류속도이다.

반잠수식 부유구조물에서는 개개의 column 및 footing에 작용하는 유체력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho D h V^2 \quad (4)$$

여기서  $C_D$ 는 Reynolds수에 의존하는 형상저항계수,  $D$ 는 column의 직경,  $h$ 는 column의 높이,  $V$ 는 조류속도이다.

### 4.3 지진하중

해저에서 발생하는 지진의 종류로는 대개 진파(tsunami)와 해진(seaquake)의 2가지로 분류한다. 진파는 해저가 융기 또는 침강이 발생하여 해수의 움직임이 사방으로 퍼져나가 해안에 도달하면 매우 큰 파도로 되는 현상이다. 진파는 진앙지 부근에서 파고가 수m, 파장이 수십~수백 km의 파도이다. 해진은 해저 땅속에서 지진이 발생하여 그 움직임이 해수를 통하여 전달되고 해수표면에서는 해수가 수직운동을 하는 현상이다.

해진은 구조물에 충격하중을 가하며 해수에 대하여 수직방향으로 작용한다. 해진에 의한 동압력으로 간단하게 압력을 추정하는 방법은

$$P = \rho d a \tag{5}$$

$P$ 는 해수밀도,  $d$ 는 부유구조물 바닥의 깊이,  $a$ 는 해저바닥에서의 가속도이다.

지진의 영향을 정확하게 추정하기 위해서는 과거에 발생한 지진 기록을 바탕으로 부유구조물 설치지역에 대한 영향을 검토하고 재현기간을 고려하여 통계처리를 하여야 한다.

### 5. 탄성응답 해석법

부유구조물의 크기가 커지면 구조응답은 탄성운동으로 나타나게 되기 때문에 부유구조물의 강제운동을 가정하여 추정한 구조응답은 오차가 커지게 된다. 탄성운동을 고려하기 위해서는 유체장을 포함하여 정식화를 수행해야 되고 유체 영역의 운동을 기술하는 위치와 구조영역에서 운동을 기술하는 위치가 다르기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

본 절에서는 부유구조물이 대형으로 되어 구조물의 깊이가 길이나 폭에 비하여 아주 작은 경우

에 대하여 파도에 의한 구조물의 거동을 해석하기 위한 과정을 살펴보기로 한다.

대형 부유구조물의 구조응답 해석을 위한 방법에는 여러가지가 있으나 본고에서는 참고문헌<sup>3)</sup>에서 보인 방법을 따르기로 한다. 이 방법에서는 부유구조물 표면에서 유체압력을 구하기 위하여 압력분포법을 사용하고 구조물의 움직임을 구하기 위하여 공기중에서의 모달벡터와 유한요소법을 사용하였다.

먼저 구조물의 깊이가 다른 길이에 비하여 작기 때문에 구조물은 평판으로 나타낼 수 있다고 가정한다. 그리고 관심 있는 거동은 주로 수직응답이므로 수평면 내의 응답은 무시하기로 한다.

좌표축을 Fig. 1과 같이 수평면을  $xy$ 평면으로 수직방향을  $z$ 축으로 잡는다. 부유구조물의 탄성응답의 진폭이 작고 유체가 비압축성, 비점성이고 유동이 비회전성이면 속도포텐셜이 존재하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z, t) = i\omega [ & (\phi_i(x, y, z) + \phi_D(x, y, z) \\ & + \phi_R(x, y, z)) e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서  $\phi$ 는 입사파 포텐셜(incident wave potential)로서 기지량이고,  $\phi_D$ 는 산란포텐셜(diffraction potential),  $\phi_R$ 은 방사포텐셜(radiation potential)로서 미지량이다.

또한 압력분포와 수직운동에 대하여 다음과 같이 정의한다.

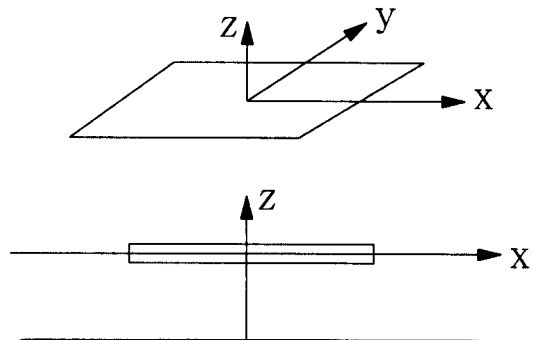


Fig. 2 Coordinate system

$$P(x, y, t) = \text{Re}[-\rho g p(x, y) e^{i\omega t}], \text{ 접수면 (7)}$$

$$Z(x, y, t) = \text{Re}[\zeta(x, y) e^{i\omega t}], \text{ 접수면 (8)}$$

포텐시얼함수  $\phi$ 는 유체 영역에서 Laplace 방정식을 만족시키고 선형자유표면 조건, 구조물 접수면 조건, 해저면 조건, 무한원방 조건을 만족시켜야한다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = 0, \text{ 유체영역 (9)}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - k\phi = 0, \text{ 자유표면 (10)}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ 해저면 (11)}$$

$$\phi \propto R^{-1/2} e^{-ikR}, R = \sqrt{x^2 + z^2}, \text{ 무한원방 (12)}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - k\phi = p, \text{ 접수면 (13)}$$

위의 경계조건 외에 방사포텐시얼과 산란포텐시얼은 구조물 접수면에서 다음 식을 각각 만족시켜야한다.

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial z} = -\xi(x, y) \text{ (14)}$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial z} = -k\phi_I \text{ (15)}$$

천홀수 이론에서는 소스의 크기와 압력을 같이 취급하여 속도포텐시얼은 수면의 압력을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi(x, y, z) = -\iint_{S_n} p(x', y') G(x, y, z; x', y', 0) dx' dy' \text{ (16)}$$

여기서  $G(x, y, z; x', y', z')$ 는 Green 함수로서 Laplace 방정식 (9)와 경계조건식 (10)-(12)를 만족시킨다. 이 속도포텐시얼을 경계조건식 (13)에 대입하면 다음과 같은 적분방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi(x, y, 0)}{\partial z} &= \phi_z = p(x, y) - k \iint_{S_n} p(x', y') \\ &G(x', y', 0; x', y', 0) dx' dy' \end{aligned} \text{ (17)}$$

부유구조물의 접수경계면을  $n$ 개의 패널로 분할하고 패널에서는 변수들이 일정하다고 하면 위 식은 다음과 같이 된다.

$$\{\phi_z\} = [C']\{p\}^T \text{ (18)}$$

여기서,

$$\{\phi_z\}^T = \{\phi_{z1}, \phi_{z2}, \dots, \phi_{zn}\},$$

$$C'_{ij} = \delta_{ij} - k \iint_{S_n} G(x_i, y_i, 0; x'_j, y'_j, 0) dx'_j dy'_j,$$

$\{p\}^T = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다.

식 (18)로부터 압력을 구하면

$$\{p\} = [C]\{\phi_z\}^T \text{ (19)}$$

여기서  $[C] = [C']^{-1}$ 이다.

식 (19)를 이용하여 방사포텐시얼과 산란포텐시얼에 의한 압력을 구하고 식 (7)에 대입하면 패널에서의 압력이 다음과 같이 주어진다.

$$\{P\} = \rho g [C] (k\{\phi_z\} - \{\xi\}) e^{i\omega t} \text{ (20)}$$

과에 의한 평판의 운동을 계산하기 위하여 우선 유한요소법으로 계산할 평판의 변위  $w_i(x, y)$ 를 패널에서의 유체의 운동  $\xi(x, y)$ 와 일치시키기 위하여 매트릭스 변환을 시킨다.

마찬가지로  $C_{ij}$ 에 대해서도 변환시킨다.

$$\{\xi\} = [T_1]\{w\} \text{ (21)}$$

$$[C] = [T_2][D] \text{ (22)}$$

따라서 절점하중  $f$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{f\} = \rho g [T_2][D](k\{\phi_i\}) - [T_1]\{w\}e^{i\omega t} \quad (23)$$

평판의 구조해석을 위한 유한요소 해석 방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{u\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (24)$$

$[M]$ 과  $[K]$ 는 각각 질량 및 강성 매트릭스이고  $\{u\}$ 는 절점변위,  $\{f\}$ 는 절점하중이다.

절점변위는 조화운동이고 그 크기는 모달벡터로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{u\} = [q]\{\eta\}e^{i\omega t} \quad (25)$$

여기서  $[q]$ 는 모달벡터,  $\{\eta\}$ 는 모달좌표계(modal coordinate)이다. 모달벡터  $[q]$ 는 다음과 같은 직교성(orthogonality)을 가지고 있다.

$$\begin{aligned} [q]^T [M][q] &= [\delta] \\ [q]^T [K][q] &= [\omega] \end{aligned} \quad (26)$$

여기서  $[\delta]$ 와  $[\omega]$ 는 대각 매트릭스이며 대각요소의 크기는 각각 1과  $i$ 차 고유진동수  $\omega_i$ 다.

식 (23), (25)를 식 (24)에 대입하고

$$\{w\} = [q_i]\{\eta\} \quad (27)$$

를 이용하면

$$\begin{aligned} ([K][q] - \omega^2[M][q] + \rho g [T_2][D][T_1][q_i])\{\eta\} \\ = \rho g k [T_2][D]\{\phi_i\} \end{aligned} \quad (28)$$

이 된다. 식 (28)에  $[q]^T$ 를 곱하고 직교성을 이용하면 다음과 같은 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} ([w] - \omega^2[\delta] + \rho g [q]^T [T_2][D][T_1][q_i])\{\eta\} \\ = \rho g k [q]^T [T_2][D]\{\phi_i\} \end{aligned} \quad (29)$$

위 식으로부터 모달좌표  $\{\eta\}$ 를 구할 수 있고 이를 이용하여 구조물의 응답  $\{u\}$ 와 압력  $[P]$ 를 구할 수 있다.

## 6. 결 언

본고에서는 부유구조물의 특징과 설계시 고려 사항, 작용하는 하중, 구조응답 추정 방법 등을 살펴보았다.

현재 국내에는 해상에 설치된 부유구조물은 아직 없으나 조선소에서 해상 발전플랜트나 담수화 설비 등을 수출한 실적은 있다. 그러나 설계기술의 많은 부분을 외국에 의존하고 있어 부유구조물의 설계 및 동적 구조응답해석 분야에 대한 국내의 많은 연구가 요구된다 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. 정태영외, "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발," 한국기계연구원 보고서, 1997.
2. Suzuki, H. and Yoshida K., "A Consideration on the Dynamics Behavior and the Structural Design of Large Scale Floating Structure," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No. 178, 1995, pp. 473-483 (in Japanese).
3. Takaki, M. and Gu, X., "On Motion of a Huge Floating Structure in Waves," Proceedings of International Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS'96, Hayama, Japan, 1996, pp. 37.1-37.8. 