

論文

대형 부유체식 비축기지의 파랑 응답해석에 관한 연구

박성현* · 최명식* · 고재용** · 임정빈*

*목포해양대학교 해상운송시스템학부 **목포해양대학교 해양시스템공학부

Study on the Wave Response Analysis of the Marine Stockpiling Base of Mega-Floating Offshore Structure Type

S. H. Park* · M. C. Choi* · J. Y. Koo** · J. B. Yim*

*Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

**Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

1. 서론

육지의 자원이 고갈되어가고, 인구증가에 따른 인구밀도의 증가 압력이 높아지는 오늘날 인류의 장래는 각종 해양 잠재자원을 어떻게 효율적으로 개발하여 이용하는가에 달려 있다고 말해진다.1) 해양의 자연자원은 화학자원, 물리자원, 지질자원, 생물자원, 공간자원 등으로 나뉘어진다. 이 중에서 해양 공간 자원의 효율적인 이용의 한가지 방법으로서, Mega-Float의 이용을 들 수 있다.

Mega-Float는 부유체식 해상 공항, 해상 도시, 비축기지, 물류기지, 폐기물처리장, 해상레저시설 등 다양한 분야에 이용될 가능성이 큰 해양구조물으로써 많은 연구가 진행되고 있다.2)~6)

부유체식 해양구조물의 장점으로는 시공상의 편리성, 공사비의 절감, 공사기간의 단축, 해양 생태계에 미치는 영향 및 지진의 영향을 적게 받는 점 등 여러 가지를 들 수 있다.

VLCC 등의 대형 부유체물에 비해 길이와 폭이 매우 크며 면적에 비해 흘수가 얇은 초대형 해양 부유체 구조물의 설계에는, 탄성적인 응답특성이 나타나는 것에 주의할 필요가 있다. 7)~9).

본 연구에서는 대형 부유체식 해상비축기지를 대상 구조물로 하여, 구조물이 규칙파를 받을 경우의 동적 응답의 해석, 응답특성의 파악, 응답에 영향을 주는 각종 인자에 대하여 검토한다

.대형 부유체식 해상비축기지의 파랑에 대한 동적 응답해석에 있어서, 부유체물의 구조부는 폭과 길이에 비하여 깊이가 작

기 때문에, 횡변형이 일어나는 평판 요소로 정식화한 유한요소법을 이용하여 해석하고, 주위의 유체부에 대해서는 비압축성의 완전유체로 간주하여 경계요소법을 이용하여 해석한다. 구조부와 유체부 사이의 운동학적, 동력학적 조건을 접수면에 연성시켜 연성운동방정식을 세우고 이 연성운동방정식을 수치해석하여 파랑중의 응답을 구한다. 또한, 대형 부유체식 해상비축기지의 파랑중 응답특성을 파악하기 위하여 각종 영향인자, 즉 파의 길이, 수심, 입사하는 파의 방향 등이 부유체의 응답에 미치는 영향에 대하여 검토한다.

2. 해석이론

본 연구에서는, Fig. 1(a)와 같은 Mega-float 구조물을 이용한 해상비축기지를 해석 모델로 설정하여 Fig.1(b)와 같이 유한요소 모델로 분할하고 일정수심이 무한하게 퍼져있는 해상에 설치되어 있는 탄성 부유체에 규칙파가 입사하는 경우의 응답특성에 대하여 해석한다. 유체부와 구조부를 각각 정식화한 후, 두 개를 연성시켜 연성방정식을 유도한다. 해석에 있어서는 다음과 같은 가정들을 도입한다.

- (1) 유체는 비점성, 비압축성의 완전유체이고, 유체입자의 운동은 비회전이며, 속도 포텐셜이 정의되어진다.
 - (2) 해저는 평평하고, 해수영역은 무한하게 퍼져있다.
 - (3) 유체의 운동은 선형 진동이론에 지배되고, 변형은 횡만을 고려한다.
 - (4) 해석 대상이 저주파이므로, 유체의 감쇠영향과 비교하여 부유체 자체의 감쇠영향은 매우 작으므로, 이것을 무시한다.
- 이상의 가정으로부터 해석 모델을 정수압에 의해 탄성 지지된 평판에, 유체에 의한 변동압력이 작용하고 있는 문제로 치

* 정회원

** 정회원

환하여 해석한다.

부유체식 해상비축기지 주위의 유체부를 경계요소법을 이용하여 정식화한다¹⁰⁾.

유체영역 내부에는, 완전유체, 비회전 흐름을 가정하고, 유체의 운동을 속도 포텐셜을 이용하여 표현한다.

본 연구의 해석 모델에 있어서 유체력의 성분은, 입사파에 의한 포텐셜, 반사파에 의한 포텐셜(Diffraction 문제), 운동하는 물체에 의해서 발생하는 방사파에 의한 포텐셜(Radiation 문제) 등 3개의 포텐셜에 의한 것으로 간주한다.

여기에서, 입사파에 의한 포텐셜은 입력이 되고, 기지함수로서 임의로 주어진다. 나머지 두 개의 포텐셜에 대해서는 경계치 문제를 풀어서 구하고, 위 세 개의 포텐셜 성분의 합으로 유체력을 나타낸다.

유체장의 전 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = Re[\phi(x, y, z) e^{-i\omega t}] \quad (1)$$

여기서, ω = 조화운동의 원진동수,

$\phi = \phi_i + \phi_d + \phi_r$ 로서 속도 포텐셜

ϕ_i = 입사파에 의한 포텐셜,

ϕ_d = 반사파에 의한 포텐셜

ϕ_r = 방사파에 의한 포텐셜.

부유체가 운동도 하지 않고 변형도 없을 경우, 반사파에 의한 속도 포텐셜 ϕ_d 를 구한다. 위의 문제에서는, 부유체가 강체로써 운동과 변형이 없다고 가정하므로 순수한 유체영역만의 경계치 문제가 된다. 경계치 문제는 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla^2 \phi_d = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial z} = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_B (z = -h) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial n} + \frac{\partial \phi_i}{\partial n} = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_H \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial n} - \nu \phi_d = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_F (z = 0) \quad (5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_d}{\partial n} - i\nu \phi_d \right) = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_\infty \quad (6)$$

여기서 n = 유체영역에 대한 외향법선,

$$\nu \equiv \frac{\omega^2}{g} = k \tanh(kh), \quad g = \text{중력가속도}, \quad k =$$

파수, h = 수심

위의 (2)식의 라플라스 방정식은 유체영역 Ω 내의 지배방정식이고, (3)식은 일정수심 h 에서의 경계조건, (4)식은 부유체 하면에서의 물체 표면 경계조건, (5)식은 선형화된 자유표면 조건, (6)식은 무한 원방에서의 거동을 나타내는 방사조건이다.

위의 경계치 문제를 풀어서 반사파에 의한 포텐셜 ϕ_d 를 구

한다.

부유체를 탄성체로 간주하고, 부유체의 운동 및 변형에 의해서 발생하는 방사파의 속도 포텐셜 ϕ_r 을 구한다. 이 문제의 경우, 경계치 문제는 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi_r = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_r}{\partial z} = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_B (z = -h) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_r}{\partial n} = V_n \quad (\text{물체의 } n\text{-방향 속도}) \quad \text{on} \quad \Gamma_H \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_r}{\partial n} - \nu \phi_r = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_F (z = 0) \quad (10)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_r}{\partial n} - i\nu \phi_r \right) = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_\infty \quad (11)$$

(10)식의 부유체 저면의 경계조건을 제외하고는 Diffraction 문제와 동일하다.

이 경계치 문제를 경계요소법을 이용하여 적분 방정식으로 치환한 후 방사파에 의한 속도 포텐셜 ϕ_r 을 구한다.

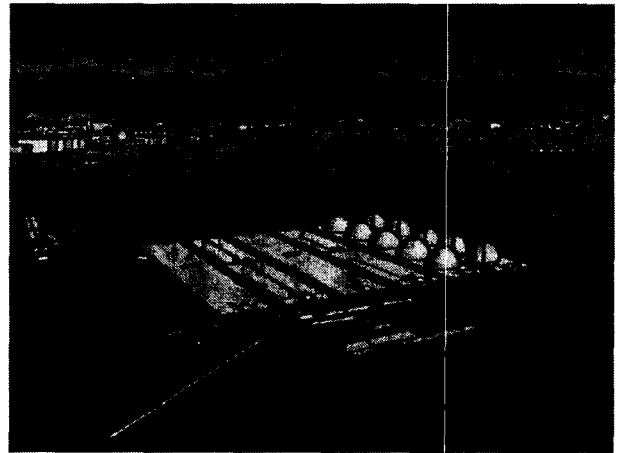


Fig.1(a) : Marine stockpiling base of mega-floating offshore structure

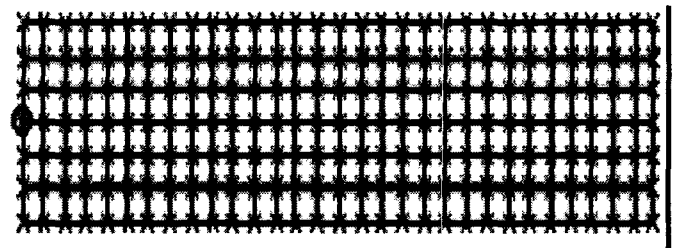


Fig.1(b) : FEM model of floating type marine stockpiling base for analysis

부유체식 해상비축기지의 구조부는 유한요소법을 이용하여

정식화하고, 가상일의 원리로부터 운동방정식을 유도한다(11). 구조부의 각 유한요소는 휨변형이 일어나는 장방형 평판요소로 간주한다.

요소 절점 변위 벡터 $\{\nu\}_e$ 를 이용하여, 부유체 구조물의 휨 변위를 나타내면,

$$V = N_w \{\nu\}_e \quad N_w = \text{형상함수} \quad (12)$$

$$\{\nu\}_e = [w_1 \theta_{x1} \theta_{y1} \cdot \cdot \cdot w_4 \theta_{x4} \theta_{y4}]^T$$

일반적인 평판의 휨진동에 이용하는 유한요소법이므로 상세한 정리는 생략한다.5)

유한요소법을 휨 진동을 일으키는 평판에 적용하고, 가상일의 원리로부터 운동방정식을 유도하면, 최종적으로 다음과 같은 방정식이 얻어진다.

$$[K]\nu + [M]\dot{\nu} = \{f\} \quad (13)$$

여기서, $[K]$ 는 부유체 구조물의 강성 매트릭스, $[M]$ 은 부유체 구조물의 질량 매트릭스, ν 는 변위벡터, $\{f\}$ 는 외력 벡터

3. 해석결과와 고찰

Table1에 나타난 모델을 대상으로 파랑중의 동적 응답을 해석하여, 본 해석방법의 유효성을 검토한다. 또한, 부유체식 해상비축기지 구조물의 파랑에 대한 응답특성을 파악하기 위하여, 각종 영향인자, 즉 파장, 수심, 입사하는 파의 방향 등이 응답에 미치는 영향에 대하여 검토한다. 해석모델을 Fig.1과 같이 사각형 유한요소로 분할하여 계산을 하였다.

Table1 : Dimensions of the stockpiling base structure model for analysis

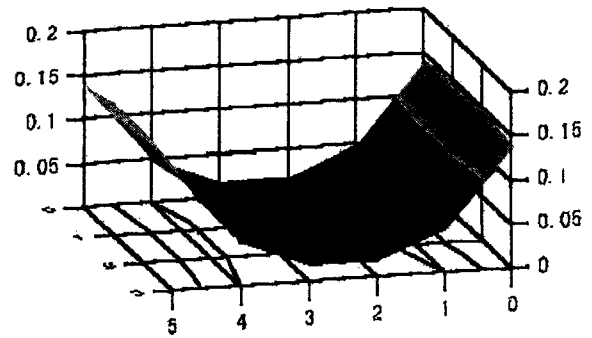
Dimension	Model
Length (L)	500 (m)
Breadth (B)	150 (m)
Flexural Rigidity (EI)	2.0500E+05 (N/m ²)
Density of Sea Water(ρf)	1.025E+03 (kg/m ³)
Gravity Acceleration (g)	9.81 (m/s ²)
Poisson's Ratio (ν)	0.300
Thickness of Plate (t)	1.00 (m)
Density of Plate (ρb)	7.8600 (kg/m ³)

3.1 파장과 응답과의 관계

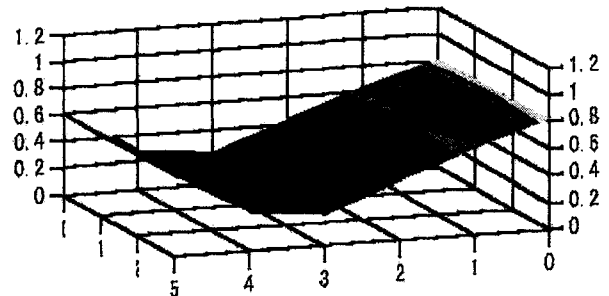
입사하는 파의 길이가 응답에 미치는 영향을 파악하기 위

해 부유체 길이와 파장의 비(L/λ)를 $L/\lambda = 2.5, 1.0, 2.0$ (m)로 바꾸어가며 계산을 하였다. 해석 결과를 보면 $L/\lambda = 1.0$ 을 경계로 응답의 상태가 변화한다.

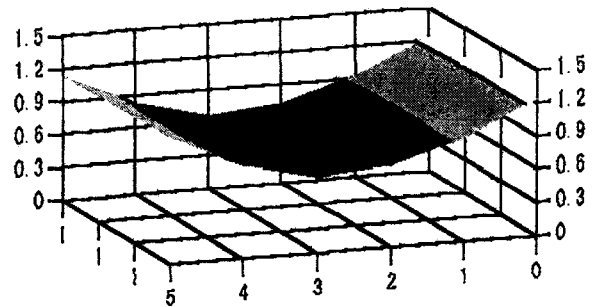
그 경계보다 좌측, 즉 입사파의 파장이 긴 경우에는 파와 같은 응답이 나타나고, 파의 투과측에서도 응답진폭이 크게 나타난다. 역으로 우측에서는 투과측의 응답은 작게 나타난다. 해석 결과는 Fig.2에 나타낸다.



(a) : $L/\lambda = 2.5$ (m)



(b) : $L/\lambda = 1.0$ (m)



(c) : $L/\lambda = 2.0$ (m)

Fig.2 : Change of response by wave length

3.2 수심과 응답과의 관계

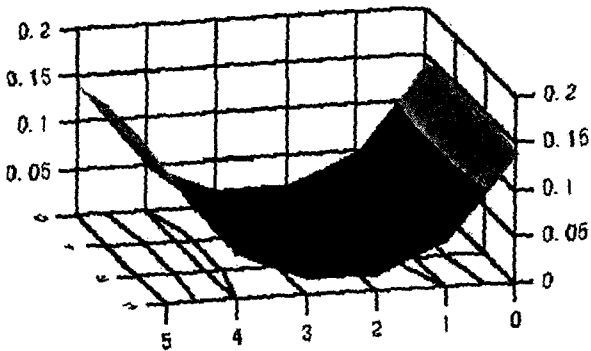
수심이 응답에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수심/파장의 비 $h/\lambda = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ 으로 변화시켜서 계산을 하였다. 해석 결과 수심의 변화에 따른 응답의 차이는 작다고 할 수 있다.

3.3 입사하는 파의 방향과 응답과의 관계

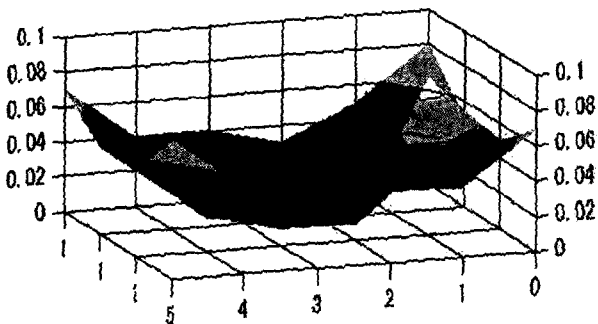
입사하는 파의 방향이 변하면 부유체식 해상비축기지 응답 특성이 어떻게 변화하는가를 파악하기 위하여 $L/\lambda = 2.5$ 의 파를 0, 30, 60, 90도의 각도로부터 입사시켜, 파의 방향에 따른 응답의 특성을 비교 검토한다.

입사하는 파의 방향 변화에 따른 응답의 특성을 Fig. 3에 나타낸다. 입사하는 파의 방향이 변하면 부유체에 비틀림이 발생하고, 응답상태는 파 방향에 따라 다양하게 변한다.

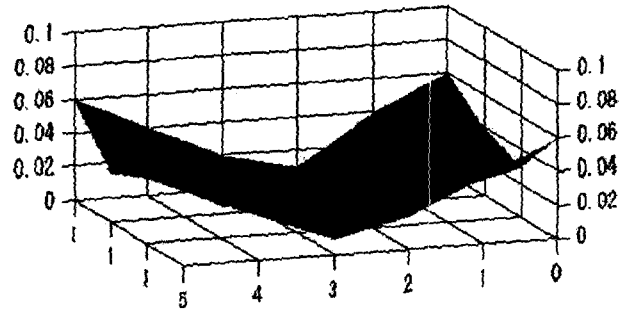
또한, 응답진폭이 최대가 되는 장소가 파의 방향에 따라 변함을 알 수 있다. 입사파의 방향이 부유체의 길이 방향과 다른 경우, 최대 응답이 반드시 입사측에만 나타나는 것이 아니다.



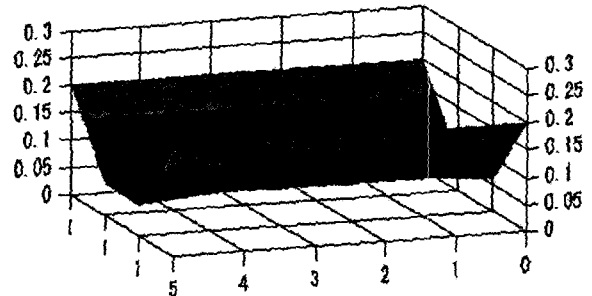
(a) : Wave Direction 0°



(b) : Wave Direction 30°



(c) : Wave Direction 60°



(d) : Wave Direction 90°

Fig.3 : Change of response by wave directions

4. 결론

본 연구에서는 대형 부유체식 해상비축기지를 대상 구조물로 하여, 구조물이 규칙파를 받을 경우의 동적 응답의 해석, 응답특성의 파악, 응답에 영향을 주는 각종 인자에 대하여 검토하였다.

또한 입사파의 길이, 구조물의 강성, 수심, 입사하는 파의 방향 등 응답 특성에 영향을 주는 각종 인자들에 대하여 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유한요소법(FEM) 프로그램을 개발하여 대형 부유체식 해상비축기지의 구조 부분의 해석이 가능하였다.
- (2) 부유체식 해상비축기지 주위의 유체 부분을 해석하기 위하여 경계요소법(BEM) 프로그램을 개발하였다.
- (3) 구조부분 해석을 위한 유한요소법 프로그램과 유체 부분 해석을 위한 경계요소법 프로그램을 통합한 시스템으로 파랑에 대한 동적 응답 특성의 해석이 가능하였다.
- (4) 파장이 응답에 미치는 영향을 조사하기 위하여 부유체의 길이/파장의 비 (L/λ)를 변화시켜서 계산한 결과, L/λ 가 작은 경우에는 파와 같은 응답이 나타나며, 투과측에서도 응답진폭이 크게 나타난다. 또한 L/λ 가 크게 되면 탄성적인

영향이 지배적으로 나타남을 알 수 있었다.

(5) 수심에 의하여 응답특성이 어떻게 변화하는가를 파악하기 위하여, 수심과 파장의 비 (h/λ)를 변화시켜서 계산한 결과, 수심의 변화에 따른 응답의 변화는 적다는 것을 알 수 있었다.

(6) 부유체에 대하여 파의 입사방향이 변하면 부유체에는 비틀림이 발생하고, 응답특성은 입사하는 파의 방향에 따라 다양하게 변한다. 또한 응답진폭의 최대점이 입사파의 방향에 따라 변함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 能澤源石衛門, 兪洪善 : 海洋物理學概論, 효성출판사, 1999, pp97-120.
- [2] 박성현, 박석주 : 大型 浮游海洋構造物の 波浪中 應答의 低減解析에 관한 研究 (第1報), 한국항해학회지, 제24권, 제1호, pp85~96.
- [3] 박성현, 박석주 : Mega-Float의 동적 응답해석에 관한 연구, 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp161~165.
- [4] 박성현, 박석주 : Mega-Float의 동적 특성해석, 한국항해학회 2001년 춘계학술대회 논문집, pp66~70.
- [5] Park Sung Hyeon, Park Sok Chu : Wave Response Analysis and Future Direction of Mega-Float, KIN-CIN Joint Symposium 2001, pp153~168.
- [6] 박성현, 박석주, 고재용 : 부유체식 Container Yard에 관한 연구, 한국항해항만학회지 제27권 제1호, pp49~54.
- [7] 平山次清, 馬 寧, 西尾フラビオ治 : 長壽命型浮体式海上空港の波浪中應答特性, 日本造船學會論文集, 第178号, 1995, pp225~236.
- [8] 矢後清和, 大松重雄, 遠藤久芳 : 淺吃水箱形浮体の波浪中彈性應答について, 日本造船學會論文集, 第182号, 1997, pp307~2317.
- [9] 永田修一, 吉田尙史, 一色浩, 大川豊 : 超大型彈性平板浮体の波浪中舉動解析, 日本造船學會論文集, 第182号, pp285~294, 1997.
- [10] C. J.Garrison : Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures : Three-Dimensional Source Distribution Methods, Numerical Methods in Offshore Engineering, Chapter 3, 1978, pp87~111.
- [11] Maurice Petyt : Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Press, 1990, pp141~293.