

부유체식 Container Yard에 관한 연구

박성현* · 박석주** · 고재용***

* 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

** 한국해양대학교 해양시스템공학부 교수

*** 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

A Study on the Container Yard of Mega-Float Offshore Structure Type

Sung-Hyeon Park* · Sok-Chu Park** · Jae-Yong Ko**

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

** Division of Ocean System Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

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

요 약 : 우리나라가 세계 물류기지의 중심 국으로 발전하기 위해서는 날로 급증하고 있는 물류량을 처리하기 위한 항만의 건설이 시급한 과제이다. 국토가 좁고 대도시에 인구가 집중하고 있으나 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있는 우리나라의 경우에는 해양공간개발이 필요하다. 증가하는 물류량을 처리할 수 있는 항만의 건설을 위하여 본 연구에서는 초대형 부유체식 컨테이너 야드를 제안하고, 해상에 설치되는 초대형 부유체식 컨테이너 야드가 파의 길이, 해역의 수심, 입사하는 파의 방향 등에 따라서 어떠한 응답특성을 나타내는지 파악한다.

핵심용어 : 국제 물류, 초대형 부유체식 구조물, 항만개발, Container Yard, 응답특성

Abstract : Recently, mega-float offshore structure is studied as one of the effective utilization of the ocean space. And mega-float structure are now being considered for various applications such as floating airports, container yard, offshore cities and so on.

This mega-float structure is relatively flexible compared with floating structures like large ships. When we estimate dynamic responses of these structures in waves, the elastic deformation is important, because vertical dimension is small compared with horizontal. The analysis of the dynamic response as it receives regular wave is studied. The finite element method is used in the analysis of structural section of this model. And the analysis is carried out using the boundary element method in the fluid division. In order to know the characteristics of the dynamic response of the mega-float structures, effects of wavelength, water depth, and wave direction on dynamic response of the floating structure are studied by use of numerical calculation.

Key words : mega-float offshore structure, container yard, finite element method, boundary element method, characteristics of the dynamic response

1. 서 론

세계무역 교역량의 90% 이상이 해상운송에 의하여 이루어지고 있다. 날로 증가하고 있는 물류량을 신속하게 처리하기 위하여 선박을 대형화, 고속화, 전용화 형태로 만들어가고 있으며, 세계 각 국에서는 자동화된 대형 컨테이너 야드 건설을 계속적으로 추진하고 있다.

우리나라도 동북아 물류거점 국가로 발전하기 위해서는 급증하고 있는 물류량을 신속하게 처리하기 위한 항만 부두건설이 필연적으로 요구되고 있다.

특히 향후 국제 물류들의 흐름이 컨테이너에 의한 수송으로 이루어 질 것으로 예상되는바 늘어나는 컨테이너 물량을 처리하기 위한 컨테이너 전용 부두의 건설이 시급하다.

또한 국토가 좁고 평지가 작으며, 인구가 대도시에 집중하

고, 토지이용에 한계성을 가지고 있으나 다행스럽게도 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있는 우리나라에서는 해양공간의 개발은 더욱더 절실하다고 말할 수 있다.

해양공간을 개발하는 방법으로는 바다를 매립하는 매립식 방법과 최근에 연구가 활발하게 진행되고 있는 초대형 해양 부유체 구조물을 이용하는 방법이 있다.

최근, 초대형 해양 부유체 구조물은 부유체식 해상 공항, 컨테이너 야드, 해상 도시 등에 이용되어질 가능성이 큰 해양구조물로써 많은 연구가 진행되고 있다.(박, 2000), (박, 2001), (平山次清, 1995), (矢後清和, 1997), 永田修 ; 1997).

본 연구에서는 초대형 부유체식 구조물을 컨테이너 야드에 사용하는 방안을 제시하고 그에 따른 장점과 기대효과에 대하여 논한다. 특히 초대형 부유체식 컨테이너 야드를 설치하였을 경우 파도에 의한 응답특성을 파악한다.

* 종신회원 shpark@mail.mmu.ac.kr, 061)240-7127

** 정회원 scpark@hanara.maritime.ac.kr, 051)410-4305

*** 정회원 kojy@mail.mmu.ac.kr, 061)240-7129

VLCC 등의 대형 부유체물에 비해 길이와 폭이 매우 크며 면적에 비해 흘수가 얇은 초대형 부유체식 컨테이너 야드의 설계에는 탄성적인 응답특성이 나타나는 것에 주의할 필요가 있다. 또한, 구조물의 변형과 유체력의 상호 간섭작용, 자연 환경으로부터의 여러 가지 영향, 파랑 외력의 영향 등에 대하여 정확하게 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 초대형 부유체식 컨테이너 야드를 대상 구조물로 하여, 구조물이 규칙파를 받을 경우의 동적 응답의 해석, 응답특성의 파악, 응답에 영향을 주는 각종 인자에 대하여 검토한다.

부유체식 컨테이너 야드의 파랑에 대한 동적 응답해석에 있어서, 부유체물의 구조부는 폭과 길이에 비하여 깊이가 작기 때문에, 횡변형이 일어나는 평판 요소로 정식화한 유한요소법을 이용하여 해석하고, 주위의 유체부에 대해서는 비압축성의 이상유체로 간주하여 경계요소법을 이용하여 해석한다.

구조부와 유체부 사이의 운동학적, 동력학적 조건을 접수면에 연성시켜 연성운동방정식을 세우고 이 연성운동방정식을 수치 해석하여 파랑중의 응답 특성을 해석한다. 본 논문의 응답해석법을 이용하여 초대형 부유체식 컨테이너 야드의 파랑중 응답특성을 파악하기 위하여 각종 영향인자, 즉 파의 길이, 설치 해역의 수심, 입사하는 파의 방향 등이 부유체의 응답에 미치는 영향에 대하여 검토한다

2. 초대형 부유체식 해상 컨테이너 야드

육지의 자원이 고갈의 위험에 처해있고, 인구 증가에 따른 육상 인구밀도의 증가가 높아지고 있는 오늘날 무한한 잠재 자원을 가지고 있는 해양 자원을 어떻게 효율적으로 개발하여 이용할 것인가는 우리 인류에게 있어서 매우 중요한 당면과제이다.

해양의 자연자원은 화학자원, 물리자원, 생물자원, 공간자원 등으로 나눌 수 있다. 이 중에서 해양공간자원의 효율적인 이용의 방법으로써는 바다를 매립하여 공간을 활용하는 방법과 최근에 주목을 받고 있는 초대형 해상 부유식 구조물을 이용하는 방법이 있다.

바다를 매립하여 해양공간을 이용하는 기존의 매립방법은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다.

- ① 수심이 깊고 조석간만의 차가 큰 해역에는 매립이 곤란하다.
- ② 매립하여 해양공간을 활용할 수 있는 적절한 해역이 매년 줄어들고 있다.
- ③ 바다를 매립하는 데는 많은 공사비용이 들어가며, 매립지를 이용할 수 있기까지는 많은 기간이 필요하다.
- ④ 서해안 간척지와 같이 해양 생태계와 자연환경 파손의 위험성이 매우 크다.
- ⑤ 지진이 발생했을 경우 위험성이 높다는 등 많은 문제점을 안고 있다.

그러나 초대형 해상 부유식 구조물을 설치하여 해양공간을 이용하는 경우에는 다음과 같은 많은 장점이 있다.

- ① 수심이 어느 정도 깊어도 설치가 가능하다.
- ② 공사기간이 상대적으로 짧고 공사비용도 매우 적게 든다.
- ③ 조류의 흐름을 방해하지 않으므로 해양 생태계의 파괴와 자연 환경의 파손에 미치는 영향이 적다.
- ④ 초대형 해상 부유체식 구조물의 내부 공간도 여러 형태로 이용이 가능하다.
- ⑤ 설치 되어있는 기존의 시설과 기능을 가동하면서 확장, 축소, 변경 등이 용이하다.
- ⑥ 지진이 발생하여도 위험성이 적다
- ⑦ 대규모 해상공항, 폐기물 처리장, 비축기지, 해상 물류기지, 해상도시, 해상유류시설, 여객터미널, 해상레저시설 등 다양한 용도로 사용이 가능하다.
- ⑧ 조선산업 분야나 중공업 분야가 발달되어 있는 나라에서는 제작 및 설치가 용이하다.

본 연구에서는 초대형 해상 부유체식 구조물의 다양한 용도 중에서, 날이 급증하고 있는 국제 무역의 물류량을 신속하게 처리할 수 있는 해상 컨테이너 야드의 건설에 적용하는 것을 목표로 한다.

기존의 물류기지와 부두시설의 문제점으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- ① 기존의 물류기지와 부두시설은 대량화 고속화 되어가고 있는 국제 무역의 흐름을 따라 갈 수 있는 시설로는 부족하다.
- ② 물류기지와 부두시설의 부족으로 인하여 선박들의 연안 대기 시간이 길어져 수출·입 물량의 하역과 적화가 신속하게 이루어지지 않고 있다.
- ③ 부족한 부두시설을 확충 할 수 있는 해상구역이 부족하다.
- ④ 컨테이너를 일시적으로 보관할 물류기지들이 도심에 자리 잡고 있어서 대형 컨테이너 수송 차량들이 도심을 경유하게 되어 교통혼잡과 교통사고를 유발하는 경우가 있다.

위와 같은 문제점들을 해결 할 수 있는 방안으로써 초대형 부유체식 해상 컨테이너 야드의 설치가 필요하다.

본 연구에서의 목적은 기존의 물류기지와 부두시설들이 안고 있는 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 초대형 해상 부유체식 해상 국제물류기지를 설치하였을 때, 해상에 설치한 물류기지가 입사하는 파도의 길이, 파도의 방향, 부유체 구조물의 강성, 바다의 수심 등의 동적 하중들에 의하여 어떠한 응답특성을 나타낼 것인가를 파악하는데 있다. 또한 본 연구에서의 결과를 토대로 초대형 해상 부유식 구조물을 이용한 해상공항, 폐기물 처리장, 비축기지, 해상도시, 해상유류시설, 여객터미널, 해상레저 시설 등의 파랑 하중도 해석을 하고자 한다.

2. 응답해석법

본 연구에서는, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 일정수심이 무한

하게 퍼져있는 해상에 설치되어 있는 부유체 컨테이너 야드에 규칙과가 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 이상유체이고, 유체입자의 운동은 비회전이며, 속도 포텐셜이 정의되어진다.
- (2) 부유체의 흘수는 알아서 무시한다.
- (3) 해석은 평평하고, 해수영역은 무한하게 퍼져있다.
- (4) 유체의 운동은 선형 진동이론에 지배되고, 변형은 횡만을 고려한다.
- (5) 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 전환하여 해석한다.

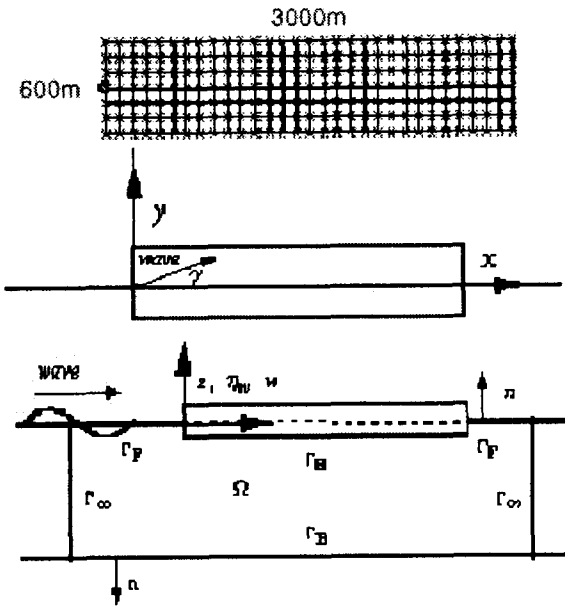


Fig. 1 Container yard model of mega-float type for analysis

Mega-Float 주위의 유체부를 경계요소법을 이용하여 정식화한다(Garridson, 1978)

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, 기지함수로써 임의로 주어진다. 나머지 두 개의 포텐셜에 대해서는 경계치 문제를 풀어 구하고, 위 세 개의 포텐셜 성분의 합으로 유체력을 나타낸다.

유체장의 전 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, ω = 조화운동의 원진동수,

$$\phi = \phi_i + \phi_d + \phi_r \text{ 로서 속도 포텐셜}$$

$$\phi_i = \text{입사파에 의한 포텐셜,}$$

$$\phi_d = \text{반사파에 의한 포텐셜}$$

$$\phi_r = \text{방사파에 의한 포텐셜.}$$

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. Fig.1의 좌표계에서, 경계치 문제는 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

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

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

여기서 n = 유체영역에 대한 외향법선,
 $\nu \equiv \frac{\omega^2}{g} = k \tanh(kh)$, g = 중력가속도, k = 파수, h = 수심을 나타낸다.

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 구한다.

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

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

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

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

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

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

(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.

Mega-Float의 구조부는 유한요소법을 이용하여 정식화하고, 가상일의 원리로부터 운동방정식을 유도한다. 구조부의 각 유한요소는 횡변형이 일어나는 장방형 평판요소로 간주한다.

요소 절점 변위 벡터 $\{\nu_{GHT}\}$ 를 이용하여, 부유체 구조물의 횡 변위를 나타내면

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

$$\{\nu_{GHT} = [w_1 \theta_{x1} \theta_{y1} \dots w_4 \theta_{x4} \theta_{y4}]^T$$

일반적인 평판의 횡진동에 이용하는 유한요소법이므로 상세한 정리는 생략한다.(Petyt, 1990)

유한요소법을 횡 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 벡터를 나타낸다.

3. 응답해석 결과 고찰

Table 1 Dimensions of container yard for analysis

Dimension	Model A
Length (L)	3000 (m)
Breadth (B)	600 (m)
Water depth (h)	8 (m)
Flexural rigidity ($E I$)	4.870E+10 ($N m^2$)
Density of sea water (ρf)	1.025E+03 ($\frac{kg}{m^3}$)
Gravity acceleration (g)	9.81 ($\frac{m}{s^2}$)
Poisson's ratio (ν)	0.3
Thickness of plate (t)	2 (m)
Density of plate (ρb)	7.850E+02 ($\frac{kg}{m^3}$)

Table1에 나타낸 모델(Model A)을 대상으로 파랑중의 응답을 해석하여, 본 해석방법의 유효성을 검토한다. 또한, Mega-Float의 파랑에 대한 응답특성을 파악하기 위하여, 각종 영향인자, 즉 파장, 수심, 입사하는 파의 방향 등이 응답에 미치는 영향에 대하여 검토한다. 해석모델을 Fig.1과 같이 총 절점수 217, 총요소수 180으로 분할하여 계산을 하였다.

부유체식 컨테이너 야드의 응답해석에 사용한 프로그램은 박성현-박석주(박, 박, 2000)의 연구에서 개발한 것을 변경하여 사용하였다.

3.1 입사파의 파장과 응답 특성

입사하는 파의 길이가 응답에 미치는 영향을 파악하기 위해 부유체 길이와 파장의 비(L/λ)를 바꾸어가며 계산을 하였다. 파장과 부유체의 중심선상의 대표적인 3점 ($x=0, x=1500, x=3000$)파의 응답진폭의 관계를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2의 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.

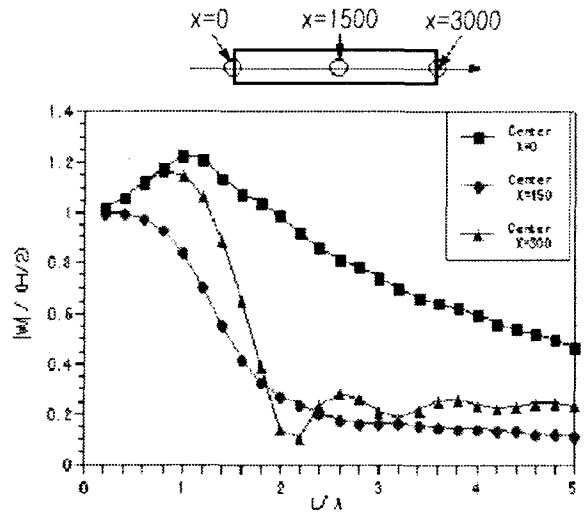


Fig. 2 Characteristics of response by wave length

3.2 설치 해역의 수심과 응답 특성

수심이 응답에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Model A에 $L/\lambda = 4.0$ 의 파를 입사시켜, 수심변화에 따른 응답특성을 검토한다.

수심/파장의 비 $h/\lambda = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ 으로 변화시켜서 계산을 하였다. 해석결과를 Fig.3에 나타낸다. 결과를 보면, 수심의 변화에 따른 응답의 차이는 작다고 할 수 있다.

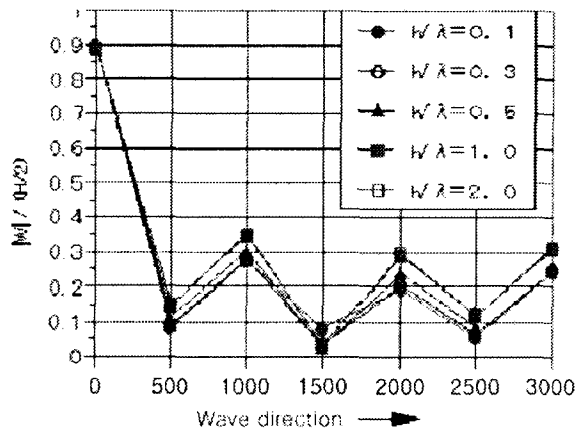


Fig. 3 Characteristics of response by water depth

3.3 입사파의 방향과 응답 특성

입사하는 파의 방향이 변하면 초대형 부유체식 컨테이너 야드의 응답특성이 어떻게 변화하는가를 파악하기 위하여 Model A에 $L/\lambda = 4.0$ 의 파를 0, 30, 60, 90도의 각도로부터 입사시켜, 파의 방향에 따른 응답의 특성을 비교 검토한다.

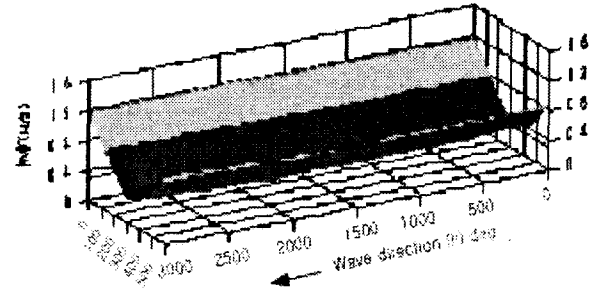
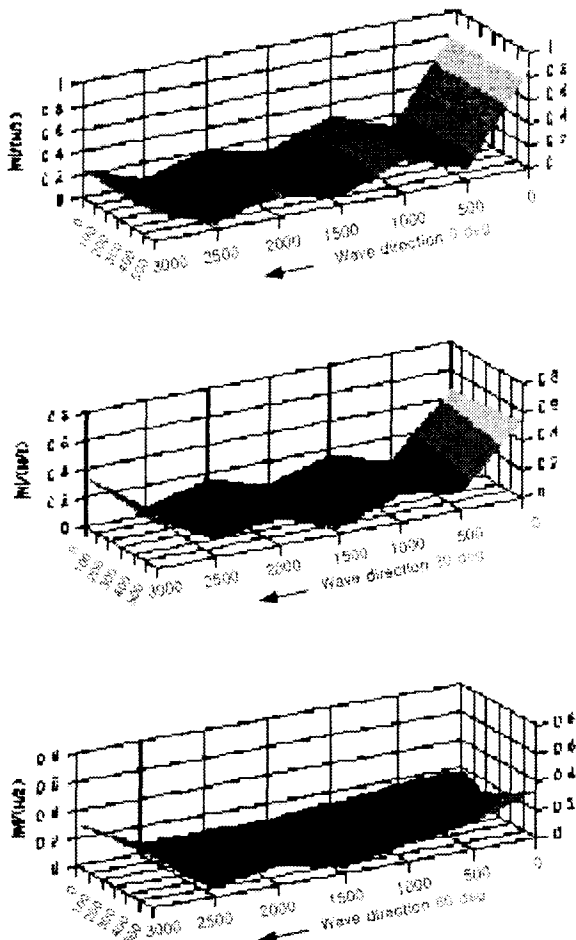


Fig. 4 Characteristics of response by wave directions

입사하는 파의 방향 변화에 따른 응답의 특성을 Fig. 4에 나타낸다. 입사하는 파의 방향이 변하면 부유체에 비틀림이 발생하고, 응답상태는 파 방향에 따라 다양하게 변한다.

또한, 응답진폭이 최대로 되는 장소가 파의 방향에 따라 변함을 알 수 있다. 입사파의 방향이 부유체의 길이 방향과 다른 경우, 최대 응답이 나타나는 곳이 반드시 입사축이지는 않다.

4. 결 론

기존의 물류기지와 부두시설들이 안고 있는 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 초대형 해상 부유식 해상 국제물류기지를 설치하였을 때, 해상에 설치한 물류기지가 입사하는 파도의 길이, 파도의 방향, 부유체 구조물의 강성, 바다의 수심 등의 동적 하중들에 의하여 어떠한 응답특성을 나타낼 것인가를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.

참 고 문 헌

- [1] 박성현, 박석주(2000), 대형 부유해양 구조물의 파랑 중 응답의 저감에 관한 연구(제1보), 한국항해학회지, 제24권제1호, pp85~95.
- [2] 박성현, 박석주(2001), Mega-Flaot의 동적 응답해석에 관

- 한 연구, 한국소음진동공학회 2001 춘계 학술대회 논문집, pp161~165.
- [3] 박성현, 박석주(2001), *Wave Response Analysis and Future Direction of Mega-Float*, 한국항해학회 KIN-CIN Joint Symposium 2001, pp153~168.
- [4] 박성현, 박석주(2001), Mega-Float의 동적 특성해석, 한국항해학회, 2001 춘계학술대회 논문집, pp66~70.
- [5] 平山次清, 馬 寧, 西尾フラビオ治(1995), 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, pp225~236.
- [6] 矢後清和, 大松重雄, 遠藤久芳(1997), 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, pp307~2317.
- [7] 永田修一, 吉田尙史, 一色浩, 大川豊(1997), 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.
- [8] C. J.Garrison(1978), *Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures : Three-Dimensional Source Distribution Methods*, Numerical Methods in Offshore Engineering, Chapter 3, pp87~111.
- [9] Maurice Petyt(1990), *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*, Cambridge University Press, pp141~293.
-
- 원고접수일 : 2002년 10월 17일
원고채택일 : 2003년 2월 17일