

초대형 부유식 해양구조물에 작용하는 유체력 추정에 관한 근사계산법의 연구

박 노 식*

(97년 1월 17일 접수)

A Study on the Approximation Method of the Hydrodynamic Forces on the VLFS

Ro-Sik Park*

Key Words : VLFS(Very Large Floating Structures : 초대형 부유식 해양구조물), Hydrodynamic Interaction(유체역학적 상호간섭), Free Surface Effects(자유표면효과), Diffraction Effects(산란파영향)

Abstract

This study is to develop a practical calculation method of hydrodynamic forces and motion response on very large floating structures consisted of multiple legs. To investigate the effect of hydrodynamic interaction and of free surface on the responses of very large floating structures in regular waves, four kind of models are considered, ie. 1, 4, 64, 21248 column with footing. Based upon the results of this study, it is found that the middle parts of very large floating structures have small diffraction effects. Therefore only out side parts are used to determine the hydrodynamic forces for taking into account the effects of interaction.

제 1 장 서 언

초대형 부유식 해양구조물은 다목적 이용을 위하여 상부구조물의 면적이 크고 이것을 지지하는 부유체도 무수히 많은 것이 일반적이다.¹⁾ 이와 같은 초대형 부유식 해양구조물을 기상 및 해상조건이 나쁜 外洋에 설치하는데는 구조물의 실현 가능성, 이동성 및 안전성 등에 대한 검토가 필요하며,

이 경우 해양구조물에 작용하는 유체력 및 파랑중에 있어서 동요응답특성을 간편하고 정도 높게 예측할 수 있는 방법의 확립은 이들 검토의 기초가 되는 중요한 과제중의 하나이다. 반점수식 석유굴착장치등 기존의 부유식 해양구조물에 관한 유체력 및 파랑중 운동응답특성의 추정법은 일반적으로 J. P. Hooft가 제안한 strip 법이 이용되고 있으며 많은 연구에 의해 검증되고 있다.²⁾ 그러나 이

* 울산대학교 조선해양공학부

들 구조물들은 본 연구에서 계획하고 있는 초대형 해양구조물에 비하여 매우 소규모인 부유식 구조물로서 지지 부유체의 수도 매우 적다. 이에 종래의 방법을 초대형 해양구조물에 적용하기에는 문제가 있다.

초대형 해양구조물에 작용하는 유체력 및 운동응답의 추정법의 연구는 부유체 공법으로 해상 공항 건조계획이 시작되면서부터 여러 가지 방법이 제안되었다.^{3),4)} 이들은 지지부유체 단독으로 작용하는 유체역학적 힘을 기초로 다수의 지지부유체 사이의 유체역학적 상호간섭효과를 검토하여 부유체 전체에 작용하는 힘을 조합하는 방법이며, 그 밖에 힘의 조합을 건조단위에 상당하는 부분 부유체에 적용하고, 실험 등에 의한 검토를 행하여 적용 범위를 확장하는 방법이다. 大川豊, 他⁵⁾는 해양구조물의 하중조건에 따라 지지부유체의 형상을 변화시킬 필요가 있다고 생각하여 형상이 다른 지지부유체의 조합에 의한 간섭영향이 복잡한 조건에 대하여 계산하여 간섭을 포함하는 유체력 계산의 정도를 향상시키려 하였다.

최근에는 유체역학적 간섭영향을 고려하는 3차원 특이점 분포법 및 유한요소법 등을 이용하여 추정정도를 향상시키고 있다. 그러나 초대형 부유구조물에 이들 방법들을 적용하기에는 분할요소 수의 한계, 막대한 계산시간 소요 등 실용적이라고는 할 수 없다. 최근에는 탄성의 영향을 고려하여 좀더 정도 높고 실용적인 추정방법이 많은 연구가에 의해서 발표되고 있다.^{6)~11)}

본 연구에서는 초대형 해양구조물에 작용하는 유체력 및 파랑중에 있어서 동요응답특성을 3차원 특이점 분포법을 이용하여 비교적 간단하게 예측할 수 있는 근사계산방법을 연구하였다. 또한 이를 이용하여 초대형구조물의 부분모형 footing이 붙은 column형 1개, 4개, 64개의 부분모형과 21,248개의 초대형 해양구조물에 대하여 유체력 및 운동응답을 추정하여 검토했다. 그 결과 초대형 해양구조물에 작용하는 유체력 및 운동응답 특성을 파악할 수 있었으며, 각 부재요소에 작용하는 동적하중을 추정하는 기초를 마련하였다.

제 2 장 유체력 및 운동응답

본 장에서는 연구 방법의 기초가 되는 특이점 분포법을 이용한 유체력 및 운동응답계산에 대하여 간단히 설명한다.

2.1 유체력

좌표계를 Fig. 1에 표시한 것처럼 x-y평면을 정지수면에 일치하게 취하고, 연직상방을 z축의 정방향으로 한다. 부유체가 비접성, 비압축성 완전유체 중에서 원진동수 ω 로 정현운동하고 있을 때의 유동장은 일반적으로 속도 potential $\Phi = \text{Re}\{\phi e^{i\omega t}\}$ 로 표시되어, 이 속도 potential ϕ 는 다음의 방정식 및 경계조건을 만족하지 않으면 안된다.

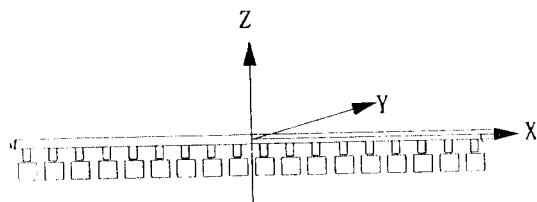


Fig. 1 Constructions of VLFS and coordinate system

Laplace 방정식

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

자유표면조건

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K\Phi = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (2)$$

수저조건

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z= -\infty \quad (3)$$

발산조건

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \Phi R^{-\frac{1}{2}} (\partial \Phi / \partial R - iK\Phi) \rightarrow 0 \quad (4)$$

물체표면조건

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = f_n \quad (5)$$

지금, 경계조건(2)~(4)식을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 Green 함수 $G(x, y, z; x', y', z')$ 라 놓으면, 속도 potential $\phi(P)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\phi(P) = \iint_S \sigma(Q) G(P, Q) ds(Q) \quad (6)$$

(6)식의 양변을 법선방향으로 미분하고, 점 P를 물체표면 S로 접근시키면 다음 식과 같은 적분 방정식을 얻는다

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi(P)}{\partial n} &= -2\pi\sigma(P) \\ &+ \int \int_S \sigma(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) ds(Q) \end{aligned} \quad (7)$$

단, (7)식의 Green 함수 G는 무한수심의 경우 다음과 같이 표시된다

$$\begin{aligned} G(P, Q) &= \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + 2K \oint_0^\infty \frac{e^{K(z+z')J_0(kR)}}{k-K} dk \\ &+ i2\pi K e^{K(z+z')} J_0(KR) \end{aligned} \quad (8)$$

(7)식은 source의 세기 $\sigma(Q)$ 을 미지수로 하는 적분방정식이며, 좌변의 $\frac{\partial \phi(P)}{\partial n}$ 은 물체표면 조건식으로 주어지기 때문에 미지수 $\sigma(Q)$ 를 구하는 것이 가능하다. 따라서 $\sigma(Q)$ 를 (6)식에 대입하면 속도 potential $\phi(P)$ 가 구해진다. 속도 potential ϕ 가 구해지면, j mode의 동요를 하고 있을 때의 단위진폭 속도 potential을 ψ_j ($j=1, 2, \dots, 6$)라 놓으면 부가질량 A_{ij} 및 조파감쇠계수 B_{ij} 는 각각 다음과으로부터 구해진다.

$$A_{ij} = -\rho Re [\int \int_S \psi_j \cdot n_i ds] \quad (9)$$

$$B_{ij} = \rho \omega Im [\int \int_S \psi_j \cdot n_i ds] \quad (10)$$

부가질량 및 조파감쇠계수는 다음과 같이 무차원화한다.

$$\overline{A_{ij}} = A_{ij} / \rho \nabla \quad (11)$$

$$\overline{B_{ij}} = B_{ij} / \rho \omega \nabla \quad (12)$$

단

$$\begin{vmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{vmatrix} = n, \quad \begin{vmatrix} n_4 \\ n_5 \\ n_6 \end{vmatrix} = r \times n \quad (13)$$

이다. n 은 물체표면의 단위 외향법선 vector, r 은 물체표면상의 점의 위치vector이다. 또한 규칙파 중에 부유체가 고정되어 있을 때 반사파의 속도 potential, 즉 diffraction potential 을 ϕ_r 라 하면, (5)식에 있어서 $\partial \phi_r / \partial n = -\partial \phi_o / \partial n$ 라 할 때의 해이다. 여기에 ϕ_o 는 입사파의 속도 potential 이며, 다음 식으로 표시

$$\phi_0 e^{i\omega t} = -\frac{i\omega \xi_a}{K} e^{Kz + iK(x\cos\alpha + y\sin\alpha) + i\omega t} \quad (14)$$

파강제력은 radiation potential ψ_j 을 이용하면, ψ_j 은 선형자유표면조건 및 무한원방에서의 radiation조건을 만족하기 때문에 Green의 정리로부터 다음식을 얻는다.

$$\int \int_S (\psi_j \frac{\partial \phi_r}{\partial n} - \phi_r \frac{\partial \psi_j}{\partial n}) ds = 0 \quad (15)$$

(15)식을 이용 파강제력은 Haskind-Newman의 관계를 적용하면 다음과 같이 표시된다.

$$F_{ij} = \rho g \xi_a \int \int_S (\phi_0 \frac{\partial \psi_j}{\partial n} - \phi_r \frac{\partial \phi_0}{\partial n}) ds \quad (16)$$

2.2 운동응답

부유체의 파랑중에 있어서 6자유도 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}) \ddot{X}_j \\ + \{ \widehat{N_{ij}} + N_{ij} | \dot{X}_j - \overline{\dot{U}_j} | (\dot{X}_j - \dot{U}_j) \} \ddot{X}_j + K_{ij} X_j] \\ = F_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 X_j 는 부유체의 중심에 있어서 j방향의 운

동을 나타낸다.

M_b 는 부유체의 질량 및 j 축 주위의 관성모멘트이다. A_b 는 부유체의 부가질량 또는 부가관성모멘트, \widehat{N}_b 는 조파감쇠계수 또는 모멘트, N_b 는 점성감쇠계수, \bar{U} 는 평균 파입자속도, K_b 는 복원력, F 는 파강제력이다.

2.3 유체력의 근사계산방법

종래의 3차원 특이점 분포법은 어떤 계산방법보다도 추정 정도가 좋은 것은 잘 알려져 있다. 그러나 이 계산방법을 초대형 구조물에 이용하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 분할요소 수가 증가하면 계산시간은 물론 요소수의 분할도 용이하지 않게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본연구에서는 Block 분할법을 생각하였다. 이들에 대하여 간단히 설명하면 해양구조물을 몇 개의 Block으로 생각하여 Block별로 유체력을 구하여 전체로 조합하는 방법이다. 이 방법은 Block 내에서는 부재간의 유체역학적 상호간섭의 영향을 고려하고, 타 Block으로부터의 간섭영향은 무시하는 방법이다. 이를 이산화하면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} b_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b_{22} & & 0 \\ | & & \backslash & | \\ | & & \backslash & | \\ 0 & \cdots & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ | \\ | \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ | \\ | \\ f_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

단, b_{jj} , σ_j , f_j 는 각각 j Block 내에서의 계수행렬, source의 세기, 물체표면의 속도 vector성분이다.

또한 반점수식 해양구조물은 일반적으로 수면하몰수형상이 크고 수선면적이 작아 자유표면의 영향이 작다고 한다면 구조물에 작용하는 유체력은 관성에 관한 것이 대부분일 것이다. 따라서 (8)식의 Green 함수중 제1항과 제2항만을 생각하여 계산하여도 좋을 것이다. 이를 Zero Frequency Method (이하 Z.F.M이라 한다)라 한다. 즉 Green 함수는 다음과 같이 간단히 된다.

$$G \doteq G^{(r)} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \quad (19)$$

본 연구에서는 이들 두 방법을 조합하여 계산하는 방법을 생각하였다. 먼저 개발계획하고 있는 초대형 해양구조물은 길이 5 Km, 폭 1Km의 갑판을 가지고 이를 지지하기 위한 footing형 지지부유체가 21,248개의 거대한 부유구조물로서 전체를 일체로 계산하기에는 불가능하다. 따라서 유체역학적 간섭이 비교적 작은 중앙부분에서는 Z.F.M 방법을 이용하여 유체력을 구하고, 파동에 대한 영향을 크게 받는 외측부재에 대하여서는 Block 분할법을 이용하여 유체력을 계산하는 3차원 특이점 분포법을 이용한 근사계산 방법이다. 이 방법은 외측으로부터 어느 정도까지 파동의 영향을 고려하는 것이 좋을지, 또한 어느 주파수 범위까지 본 방법이 적용가능한지, 많은 수치계산을 하여 적용범위를 정할 필요가 있다.

제 3 장 수치계산

유체력은 지지 부유체의 형상에 대응하여 3차원 특이점 분포법(이하 3D.M이라 한다.)과 Z.F.M법에 의해 계산을 수행하였다. 먼저 Fig. 2에 나타낸 것처럼 footing의 자유표면영향을 검토하기 위하여

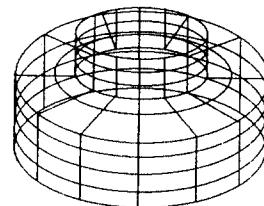


Fig. 2 Elements of model

초대형 구조물 부재중의 하나인 단독 footing형 부유구조물 모델을 택하여 훌수변화에 따른 유체력을 계산하였다. 그 결과는 Fig. 3 ~ Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 footing의 자유표면에 가까운 훌수 5.0m인 구조물에서는 상하부가질량인 경우 자유표면의 영향을 많이 받고 있으나, footing이 깊어짐에 따라 그 영향은 작아 자유표면의 영향을 무시하고 근사계산방법을 이용하여도 유효함을 알 수 있다. 또한 현재 계획하고 있는 초대형구조

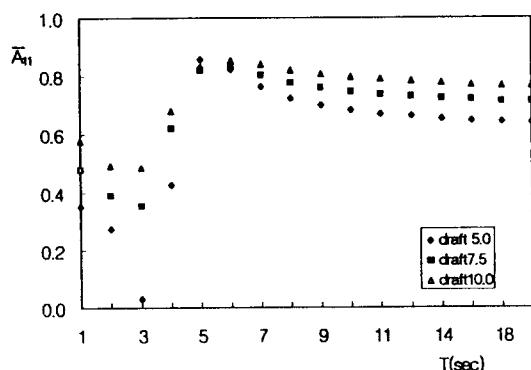


Fig. 3 Added mass for surge on 1-footing

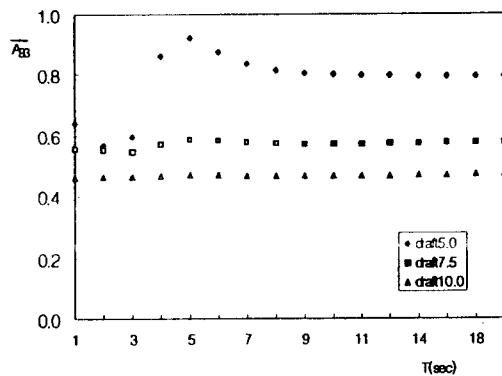


Fig. 4 Added mass for heave on 1-footing

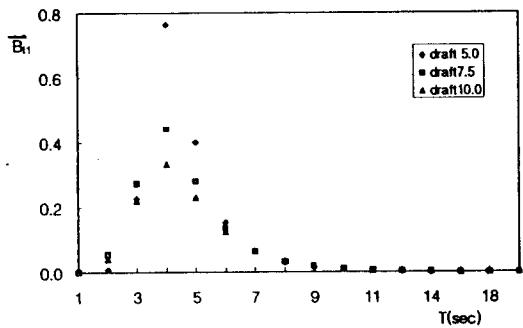


Fig. 5 Damping coefficients for surge on 1-footing

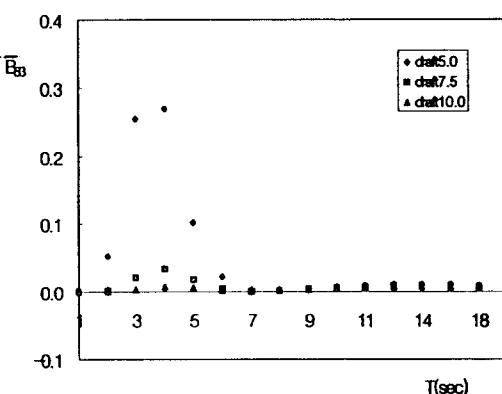


Fig. 6 Damping coefficients for heave on 1-footing

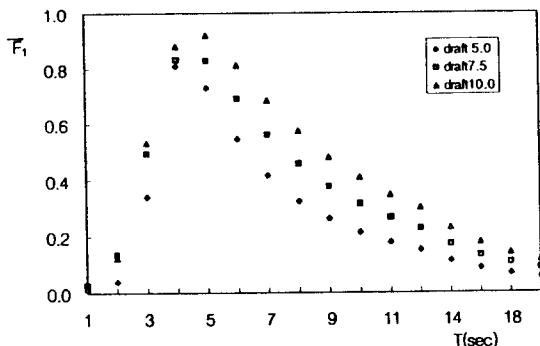


Fig. 7 Wave exciting forces for surge on 1-footing

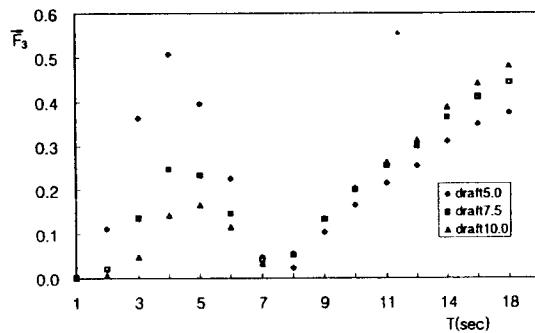


Fig. 8 Wave exciting forces for heave on 1-footing

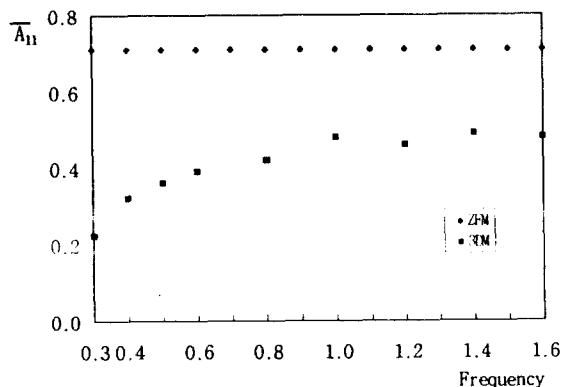


Fig. 9 Added mass for surge on 4 - footings

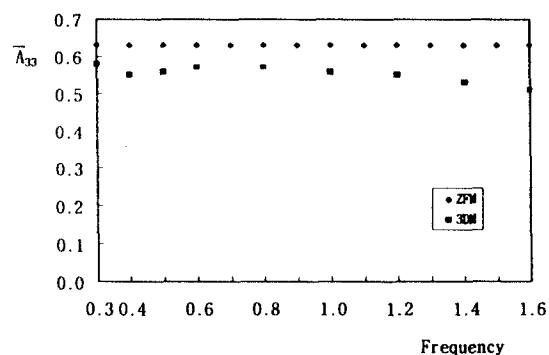


Fig. 10 Added mass for heave on 4 - footings

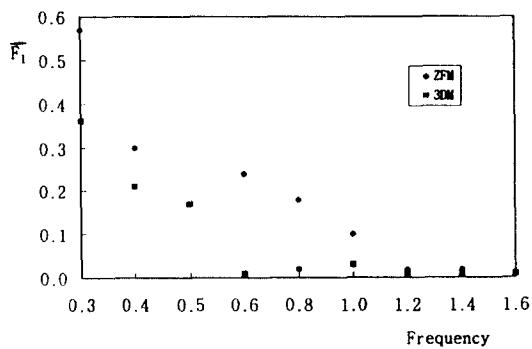


Fig. 11 Wave exciting force for surge on 4-footings

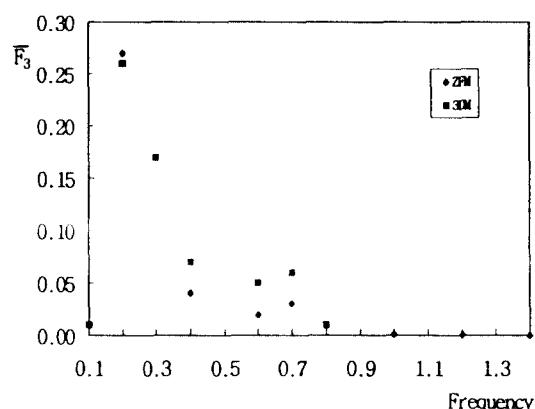


Fig. 12 Wave exciting force for heave on 4-footings

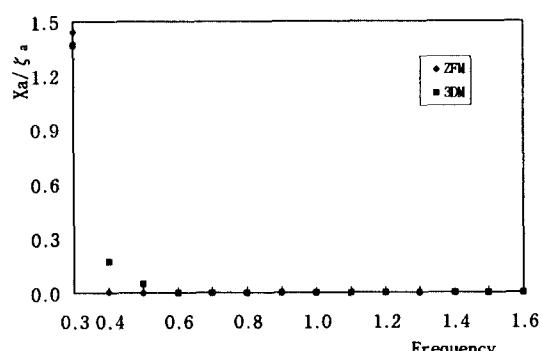


Fig. 13 Amplitude for surge motion on 4-footings

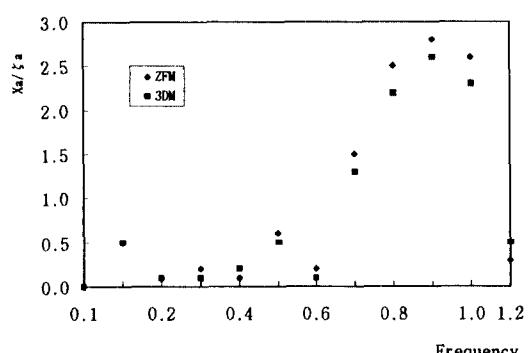


Fig. 14 Amplitude for heave motion on 4-footings

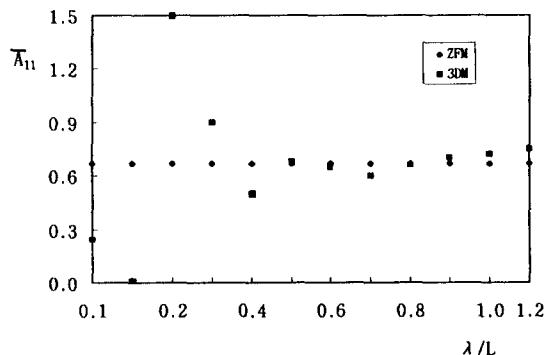


Fig. 15 Added mass for surge on 64-footings

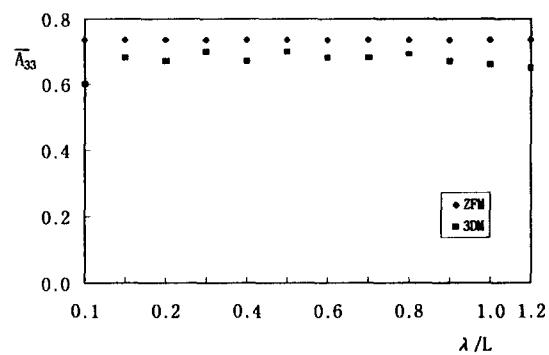


Fig. 16 Added mass for heave on 64-footings

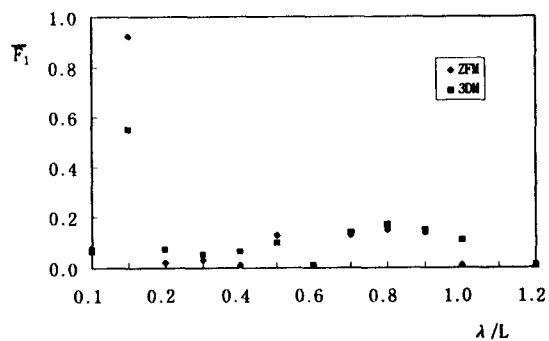


Fig. 17 Wave exciting force for surge on 64-footings

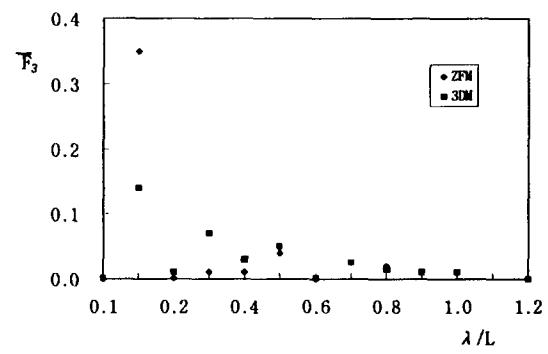


Fig. 18 Wave exciting force for heave on 64-footings

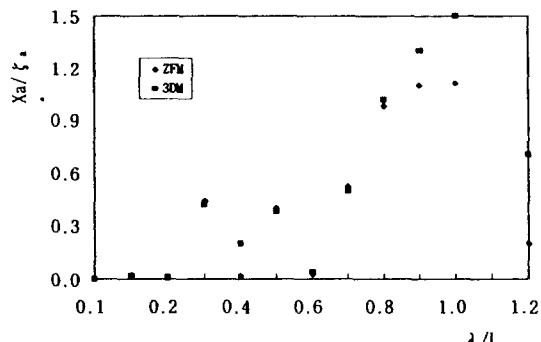


Fig. 19 Amplitude for surge motion on 64-footings

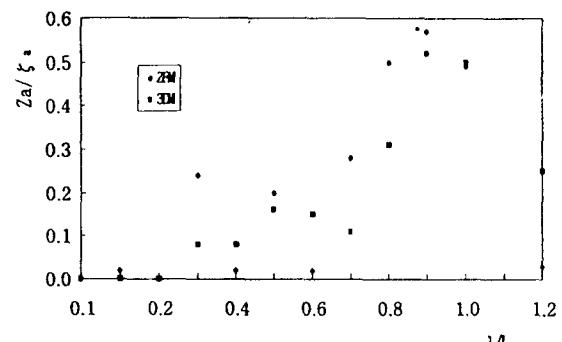


Fig. 20 Amplitude for heave motion on 64-footings

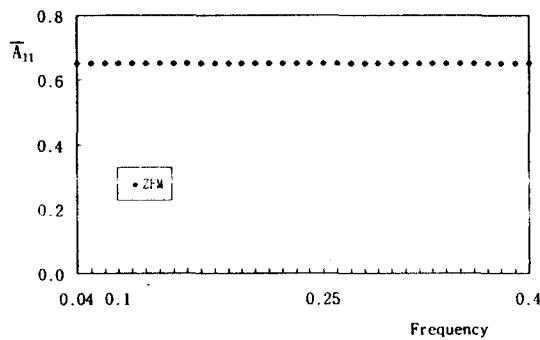


Fig. 21 Added mass for surge on VLFS

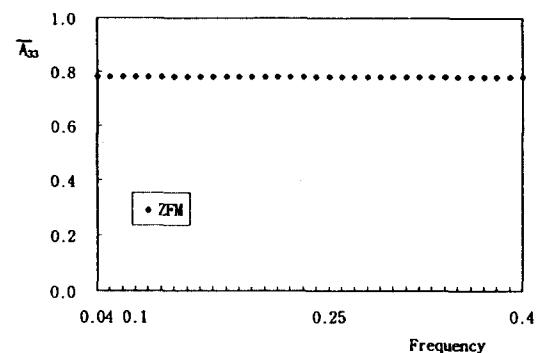


Fig. 22 Added mass for heave on VLFS

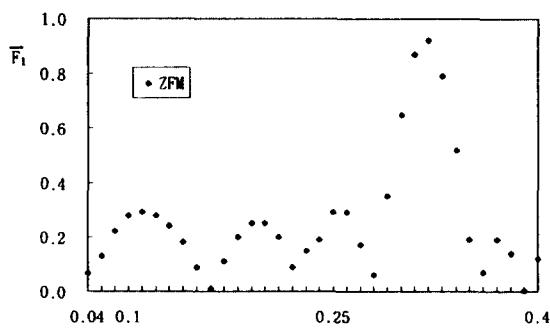


Fig. 23 Wave exciting force for surge on VLFS

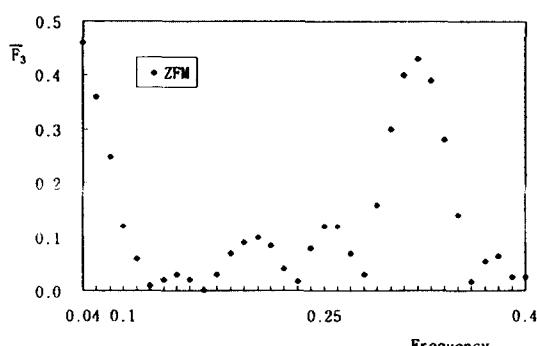


Fig. 24 Wave exciting force for heave on VLFS

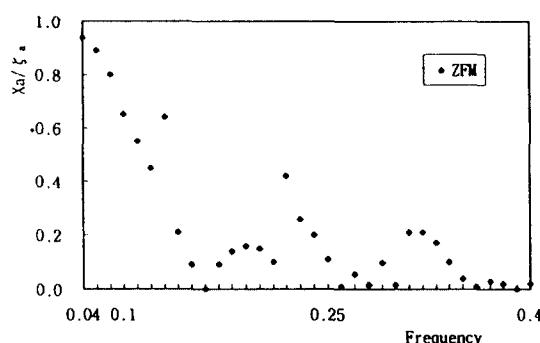


Fig. 25 Amplitude for surge motion on VLFS

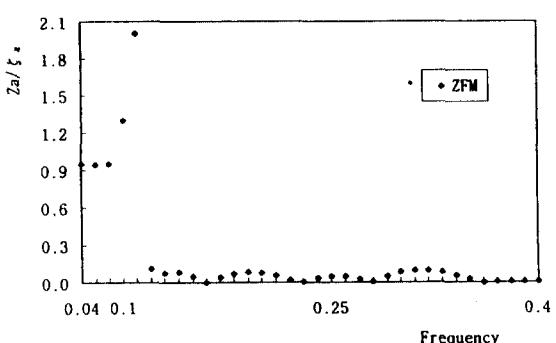


Fig. 26 Amplitude for heave motion on VLFS

Table 1 Principal dimensions of VLFS

Item	Dimensions
Column diameter (Dc)	5.20 m
Column depth (dc)	2.65 m
Floating diameter (Df)	8.00 m
Footing depth (df)	3.85 m
Length between column to column center	15.00 m
Length (about)	5000.0 m
Breadth (about)	1000.0m
Depth	6.50m
Displacement volumes	5307700.0 m ³
Number of footings	21248 EA

물의 일부분인 footing⁶⁾ 4개, 64개를 가진 부분모델에 대하여 유체력 및 규칙파중에 있어서의 운동응답을 구하였다. 수치계산에 있어서 요소분할은 1개의 footing을 90개의 요소로 분할하여 수행하였다. 그 결과를 각각 Fig. 9 - Fig. 20에 나타내었다. 이들 footing형 지지 부유체군에서는 2행 2열(4column) 구조물 보다 8행 8열의 부유체군에서 3차원적 간섭의 영향이 예상되기 때문에 더욱더 복잡한 변화를 하고 있음을 알 수 있었다. 특히 상하방향의 유체력 및 파강제력은 상호 간섭의 효과가 약간 나타나고 있으나, 전후 방향의 경우에 있어서는 파장이 짧은 영역에서 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 전후 방향의 유체력 추정에 있어서 근사계산방법의 적용에는 한계가 있음을 알 수 있다. Fig. 21 - Fig. 26은 문현⁷⁾의 초대형 해상공항설계의 유사모형으로 column이 21,248개의 구조물에 대하여 근사계산법을 이용하여 유체력 및 운동응답계산을 수행한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 실해역 해양파의 영역에 있어서 구조물에 미치는 파의 영향은 그다지 크지 않아 운동응답의 크기는 매우 작게 나타나고 있다. 그 결과 자유표면의 영향이 작은 footing형 초대형 구조물에 있어서는 본 연구에서 제안하는 근사계산방법으로 유체력을 추정하여도 좋을 것으로 생각된다.

제 4 장 결 과

본 연구 수행에 의하여 얻어진 결과를 요약하면

다음과 같다.

1. 다수의 지지 부유체로 구성되어있는 초대형 부유식 해양구조물에 유체력 및 파랑 중에 있어서의 운동응답 특성을 예측할 수 있었다.
2. 자유표면의 영향이 작은 footing형 초대형 해양구조물에 작용하는 유체력 및 파랑 중 운동응답 추정에 있어서는 계산시간을 줄이고 계산 정도도 좋은 근사계산법이 유효함을 알 수 있었다.
3. 각 부재요소에 작용하는 동적하중을 추정, 구조물에 작용하는 응력해석 자료로 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술처에서 시행한 특정 연구 개발사업 중 '94 국제공동연구사업(울산대학교와 일본선박기술연구소)'의 연구결과이다.

참고문헌

- 1) 安藤定雄, 大川豊, 上野勲, “浮體工法による海上空港建設に係る評價のための技術調査研究”, 船舶技術研究所報告, 別冊第4號, 1983年3月
- 2) 金綱正夫, 外 “浮遊式海洋構造物の設計 System”, 三井造船技報, 第103號, 1978
- 3) 審田直之助, “超大型海洋構造物のテクノロジ” アセスメントの一例 (その3, その4)”, 日本造船學會誌 No.640 (1982年10月), No.641 (1982年11月)
- 4) 安藤定雄, 外 “超大型海洋構造物の建設基礎技術に関する研究”, 船舶技術研究 所報告, 1985年 6月
- 5) 大川豊, 他, “半潜水式海洋構造物の波浪中における動搖計算”, I.H.I.技報, 17-3, 1987
- 6) 朴 魯植 外, “半潜水式海洋構의 요소 부재에 작용하는 流體力”, 한국해양공학회지, 8-2, 1994
- 7) 野尻信弘, “3次元流體に動く變動壓力および波浪荷重の研究”, 日本造船學會論文集, 第148號, 1980
- 8) 신 현경 외, “부유식 해양구조물에 관한 연구”,

울산대학교, 과기처 보고서, 1995

- 9) Uki, K. et al, "The Initial Planning of Floating Oil Storage System", Proc. of TECHNO-OCEAN' 88, 1988.
- 10) Paulling, J.r. et al, "Multi-module Floating Ocean Structures", Marine Structure, Struc-tures 6, 1993.
- 11) T. Hamamoto, M. Tokubuchi, Y. Tamura and Tanaka, "Optimal Allocation of Flexible Models for a Large Circular Floating Island with Ring-Shaped Stiffeners". 13th Ocean Engineering Symposium, 1995