

불규칙파 중에서 돌핀 계류된 해상공항에 대한 운동 해석

이호영* · 신현경* · 임춘규* · 강점문** · 윤명철**

*울산대학교 수송시스템공학부

**현대중공업(주) 구조설계부

Motion Analyses for a Very Large Floating Structure with Dolphin Mooring Systems in Irregular Waves

H.Y. LEE*, H. SHIN*, C.K. LIM*, J.M. KANG** AND M.C. YOON**

*School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

**Hyundai Heavy Industry Co. Ltd, Ulsan 682-792, Korea

KEY WORDS: Time domain 시간영역, Memory effect function 기억효과 함수, Second order wave drift forces 2차항 파표류력, Dolphin mooring system 돌핀 계류 시스템, Nonlinear motions 비선형 운동, Very large floating structure 초대형 부유식 해상공항

ABSTRACT: The very large floating structure which can be used for as airport may be as large as several kilomet wide. The first order wave forces as well as wave drift forces are very important forces on such a very large floating. In the present study, the time simulation of motion responses with dolphin-moored VLFS in waves is presented. The coefficients and wave forces involved in the equations are obtained from a three-dimensional panel method in the frequency domain. The horizontal drift forces and mooring forces for dolphin systems are taken into account. As for numerical example, analyses are carried out for a VLFS in irregular wave condition.

1. 서 론

근래에 해양공간을 효과적으로 연구하기 위해 해상공항, 해양도시 및 해상 가교 등과 같은 대형 부유식 구조물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이런 구조물들은 길이와 폭이 수 킬로미터이지만 깊이는 몇 미터 밖에 되지 않는다. 이런 해상 부유식 구조물은 파도중에서 거동을 반드시 조사하여야 한다. 즉 1차 항 파강제력에 의한 구조물의 운동도 중요하지만 더욱 중요한 것은 2차 항 파강제력에 의한 계류계와의 공진 운동 및 파도와 구조물의 운동에 의한 계류계에 작용하는 힘을 반드시 계산하여 계류계 설계에 반영하여야 한다. 기존의 현수형 및 인장각식 계류 시스템을 장착한 해양구조물에 대한 비선형 응답해석은 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔다(Choi and Choi, 1990; 이 등, 1998). 그러나 돌핀 계류시스템을 장착한 초대형 부유식 해양 구조물에 대해서 비선형 응답인 저주파수 운동 해석과 계류시스템에 대한 힘의 산정 등은 찾아보기 힘든 실정이다.

본 논문에서는 불규칙파 중에서 부유식 해상공항의 거동을 조사하기 위해 3차원 패널 방법이 이용되었고 비선형 운동은 강제운동이라 가정하여 수평방향의 3가지 운동에 대하여 계산하였다. 수평방향의 2차항 파강제력과 모우멘트는 2차항 산란 포텐셜에 의한 항을 무시하고 1차항 포텐셜에 의한 항만을 고

려하여 직접 적분법을 사용하여 계산하였다(Pinkster, 1980). 돌핀-펜더 계류시스템은 1자유도를 갖는 간단한 선형 스프링으로 치환하였고 2차항 파강제력의 비선형성과 돌핀 계류시스템의 운동을 허용하기 위해 시간 영역의 천이 운동방정식을 사용하여 수치적으로 계산하였다.

본 논문의 계산 예로 일본의 phase I (300m×60m×2m) 해상공항을 사용하여 3가지의 비선형 운동과 계류력을 산정하였다.

2. 시간영역에서 운동방정식

부유식 해상공항과 같은 구조물의 운동을 해석하기 위해 두 가지의 좌표계가 사용된다. 하나는 물체고정 좌표계(o-xyz)이며 다른 하나는 공간고정 좌표계(O-XYZ)를 사용한다. Fig.1은 좌표계와 부유식 해상공항에 대한 돌핀 계류에 대한 그림을 도시하였다. 시간영역에서 운동방정식은 주파수영역에서 동유체력은 곱 적분에 의해 고려되며 다음과 같이 표현된다(Cummins, 1962; 이와 신, 2000).

$$\sum_j [(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \dot{x}_j + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{ij}x_j] = F_{wi}^{(1)} + F_{wi}^{(2)}, \quad i, j=1,2,6 \quad (1)$$

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

where x_j ; the response amplitudes
 M ; mass matrix,
 $A(\infty)$; added mass matrix of infinite frequency
 B ; wave damping matrix, C ; Mooring stiffness matr

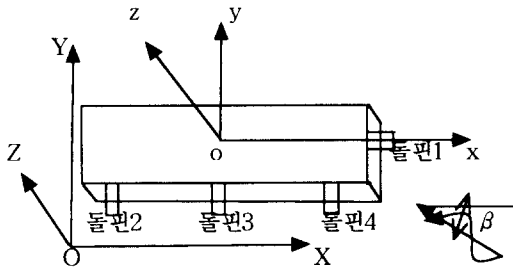


Fig.1 Coordinate system and configuration of VLFS

위에서 K_{ij} 은 기억효과 함수이고, $F^{(1)}_{wi}$, $F^{(2)}_{wi}$ 는 1차항 파강제력 및 2차항 파강제력을 나타낸다. (1)에서 $i=1, 2, 6$ 은 전후동요, 좌우동요 및 선수동요를 나타낸다. 운동방정식의 자유도 수는 3 자유도이며, (1)에서 주파수 무한대에서 부가질량 계수 $A_{ij}(\infty)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0} \int_0^{\infty} K_{ij}(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$A(\omega_0)$ 은 임의의 주파수 ω_0 에서 부가질량이다. (1)에서 운동방정식은 각 시간 단계에서 수치 적분 기법을 사용함으로 계산된다(이와 신 2000).

3. 파강제력 및 돌핀 계류력

3.1 파강제력

부유체의 6자유도 운동을 생각하면 1차항 포텐셜은 입사파, 방사 및 산란 포텐셜로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$\varphi^{(1)} e^{i\omega t} = [\zeta (\varphi^{(1)}_I + \varphi^{(1)}_D) + \sum_{j=1}^6 \varphi^{(1)}_j x_j] e^{i\omega t} \quad (4)$$

where ω ; wave angular frequency
 ζ ; wave amplitude

$\varphi^{(1)}_I$ 는 입사파 포텐셜이며 유한 수심에서는 다음과 같이 표현된다.

$$\varphi^{(1)}_I = -\frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ik(x \cos \beta - y \sin \beta)} \quad (5)$$

여기에서 h , β 및 k 는 각각 수심, 파입사각 및 파수를 나타낸다. (4)에서 방사 및 산란 포텐셜의 경계치 문제는 Laplace 방정식, 자유표면 조건, 물체표면 조건 등으로 구성되며 일반적으로 3차원 패널 방법을 적용하면 계산될 수 있다. 선형 베르누이(Bernoulli) 방정식으로부터 부가질량, 파랑감쇠계수 및 1차항 파강제력은 다음과 같이 도출된다.

$$A_{ij}(\omega) = -\frac{\rho}{\omega^2} \text{Re} \left[\int_{S_n} i\omega \varphi^{(1)}_j n_i ds \right] \quad (6)$$

$$B_{ij}(\omega) = -\frac{\rho}{\omega} \text{Im} \left[\int_{S_n} i\omega \varphi^{(1)}_j n_i ds \right] \quad (7)$$

$$f^{(1)}_{wi}(\omega) = \rho (i\omega) \int_{S_n} (\varphi^{(1)}_I + \varphi^{(1)}_D) n_i ds \quad (8)$$

where S_B ; body surface

불규칙파는 규칙파의 합으로 표현할 수 있고, 위상각은 랜덤(random) 변수이다. 파의 변위는 파도 스펙트럼으로부터 계산되며 파도 스펙트럼은 ITTC 스펙트럼을 사용하였다.

$$\zeta_m = \sqrt{2S_\zeta(\omega_m) \Delta \omega_m} \quad (9)$$

where $\Delta \omega$; wave frequency interval

불규칙파 중에서 1차항 파강제력은 규칙파 중에서 파강제력을 (8)에서 계산하여 N 개의 규칙파의 합으로 나타내어 다음과 같이 계산하였다.

$$F^{(1)}_{wi}(t) = \text{Re} \left[\sum_{m=1}^N \zeta_m f_{wi}(\omega_m) e^{i(\omega_m t + \epsilon_m)} \right] \quad (10)$$

ζ_m ; wave amplitudes, ϵ_m ; phase angles of incident wave
 2차항 파강제력은 1차항 포텐셜로부터 계산된 동 유체 압력을 직접 적분함으로서 계산된다(이와 과, 1997). 2차항 파강제력에 대한 시계열은 2차항 산란 포텐셜에 대한 항을 무시하였고, 다음 식으로 표현된다(Pinkster, 1980; Choi and Choi, 1990).

$$F^{(2)}_{wi} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \zeta_j \zeta_k \{ P_{jk} \cos[(\omega_j - \omega_k)t + (\epsilon_j - \epsilon_k)] + Q_{jk} \sin[(\omega_j - \omega_k)t + (\epsilon_j - \epsilon_k)] \} \quad (11)$$

여기에서 P_{jk} 와 Q_{jk} 는 차이 주파수에 대한 2차 전달함수이다.

3.2 돌핀 계류력

부유체와 돌핀 모두 강체라고 생각하고 각지점의 링크(link)의 변위는 1자유도 운동만 고려하면 링크와 부유체의 접속점에서 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$u_j = x_1 + \xi_j x_6 \quad (12)$$

$$v_i = x_2 + \xi_i x_6 \quad (13)$$

where ξ_j ; x축 방향으로 설치된 돌핀의 y 좌표,

ξ_i ; y축 방향으로 설치된 돌핀의 x 좌표

돌핀 i 지점과 j 지점에서의 외력과 부유체 및 돌핀간의 힘의 평형 방정식으로부터 부유체의 운동방정식 (1)로부터 각 지점의 돌핀에서 외력을 고려하면 돌핀 계류계의 탄성 행렬은 다음과 같이 도출된다.

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} nk & 0 & k \sum_{j=1}^n \xi_j \\ 0 & mk & k \sum_{i=1}^m \xi_i \\ k \sum_{j=1}^n \xi_j & k \sum_{i=1}^m \xi_i & k \left(\sum_{i=1}^m \xi_i^2 + \sum_{j=1}^n \xi_j^2 \right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기에서 n 은 y축과 평행한 면에서 돌핀의 개수이고 m 은 x축과 평행한 면에서 돌핀의 개수를 나타내고 돌핀 링크의 강성계수 k 는 모든 지점에서 같은 것으로 취급하였다.

4. 계산결과 및 고찰

본 계산에 사용된 모델은 일본의 phase I 구조물이며 기본제원은 다음과 같다.

Table 1 Main particulars of VLFS

L×B×Depth	300×60×2m
Draft	0.5m
Water depth	20m
Displacement	9000m ³
KG	1m

구조물의 비선형 운동을 해석하기 위해 요소의 분할은 구조물의 밑면은 x 방향으로 80개 y 방향으로 16개로 분할하였고, 옆면은 x 방향으로 80개 y 방향으로 16개 그리고 z 방향으로 1개로 분할하였다. 또한 불규칙파수 현상을 제거하기 위해 옆면에 x 방향으로 10개 y 방향으로 2개의 요소로 분할하였다. 본 논문에서 구조물은 직사각형 형태를 갖고 있으므로 불규칙파수를 다음과 같이 계산할 수 있다(Hong, 1987).

$$\omega_{\alpha\beta} = \sqrt{g\gamma \coth \gamma d} \quad (15)$$

where $\gamma^2 = (\alpha \pi/L)^2 + (\beta \pi/B)^2$ for $\alpha, \beta = 1, 2, 3, \dots$

위의 식에서 phase I 구조물의 1차 불규칙파수는 4.43 rad/sec이며, 고차 불규칙파수는 고 주파수영역에 존재하므로 본 계산에서는 의미가 없다.

돌핀계류는 Fig.1에서 알 수 있듯이 구조물의 오른쪽 면에 1개(y=0)를 설치하고 또한 구조물의 아래쪽에 3개(x=-100, 0, 100)를 설치하여 일본의 phase I의 계류방식과 같게 하였다.

Fig.2는 (2)로부터 계산된 충격 응답함수를 도시하였다. 전후동요 및 좌우동요에 대한 충격응답함수는 10초 정도 지나면 거의 0의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig.3, 4는 입사파각 $\beta=30\text{deg}$ 인 경우에 무차원화된 6자유도 운동을 주파수가 변함에 따라 도시하였다. 주파수에 따른 운동은 주파수가 0.3에서 1.5까지 계산한 값을 도시하였다. 직선운동은 파의 진폭으로 무차원화 하였고, 각운동의 무차원화는 파 기울기로 하였다.

Fig.5은 시간평균된 전후 및 수평방향의 표류력과 선수 표류모멘트 성분을 무차원화하여 도시하였다. 표류력의 무차원화는 $\rho g \xi^2 B^2/L$ 로 하였고, 모우멘트의 무차원화는 $\rho g \xi^2 B^2$ 로 하였다.

Fig.6는 파도조건($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$, $H_{1/3}=3\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)인 경우에 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대해 IITC 스펙트럼을 사용하여 파도에 대한 스펙트럼을 주파수 0.3에서 1.5까지 주파수 간격 0.02로 61개의 파도 성분에 대하여 스펙트럼을 도시하였다.

Fig.7은 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대해 2차항 전달함수의 실수부를 도시하였다.

Fig.8은 Fig.6에 도시된 파도 스펙트럼에 대하여 불규칙파를 시간에 따라 도시하였다.

Fig.9는 파도조건($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)인 경우에 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 표류력의 시간에 따른 변화를 도시하였다. 그림에서 470초 근처에 입사하는 파도 진폭이 갑자기 증가하면 갑자기 표류력도 크지는 것을 알 수 있다.

Table 2는 스프링 상수에 따른 전후운동 및 좌우운동에 대한 고유주기를 나타내었다. 전후운동에 대한 고유주기가 긴 것은 돌핀계류가 x 방향으로 1개 설치되어있고, y 방향으로 3개

설치되어있기 때문이다.

Fig.10, 11은 파도조건($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)과 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 스프링 상수($k=10, 20, 40 \text{ tonf/m}$)인 경우에 따른 전후운동 및 좌우운동을 도시하였다. 그림으로부터 전후동요의 주기가 좌우운동 주기보다 길게 나타나는 것을 알 수 있고, 운동 주기는 스프링 상수의 고유주기와 일치한다.

Table 2 Natural period by spring coefficients

k(tonf/m)	surge period(sec)	sway period(sec)
10	59.8	35.0
20	42.3	24.8
40	29.9	17.5
200	13.4	7.8
400	9.5	5.5
600	7.7	4.5

Fig.12~14는 파도조건($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)과 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 스프링 상수($k=200, 400, 600 \text{ tonf/m}$)인 경우에 따른 전후운동, 좌우운동 및 선수운동을 도시하였다.

Fig.15는 파도조건($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)과 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 경우에 돌핀 계류의 스프링 상수의 값의 변화에 따른 좌우운동에 대한 속도를 시간에 따라 도시하였다.

Fig.16은 파도조건($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)과 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 경우에 x 방향으로 계류된 돌핀 시스템(돌핀1)에 대한 계류력을 도시하였다.

Fig.17~19는 파도조건($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)인 경우 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 경우에 y 방향으로 계류된 돌핀 시스템(돌핀2, 3, 4)에 대한 계류력을 도시하였다. 위의 그림으로부터 돌핀1이 나머지 돌핀보다 힘이 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

Fig.20, 21은 파도조건($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$)과 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 경우에 전후운동과 좌우운동에 대한 변위-속도관계를 도시하였다. 불규칙파중의 속도-변위에 대한 위상 그림이 아주 규칙적으로 표현되는 것을 알 수 있다.

Fig.22~24는 파도조건($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$, $k=20, 40\text{tonf/m}$)인 경우 파입사각($\beta=30\text{deg}$)에 대한 경우에 전후운동, 좌우운동 및 선수운동에 대한 주파수의 변화에 따른 응답 스펙트럼을 도시하였다. 응답 스펙트럼과 Table 2의 비교를 통해 알 수 있듯이 계류계의 고유 주파수 값에서 스펙트럼의 최대 값을 갖는다.

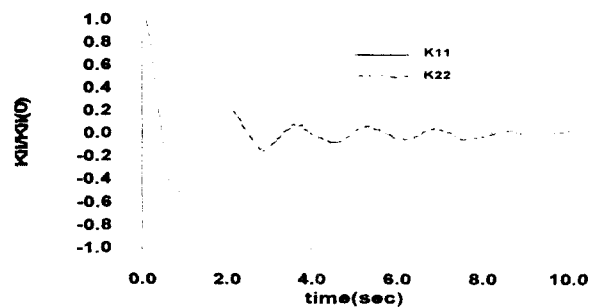


Fig.2 Time memory effect function

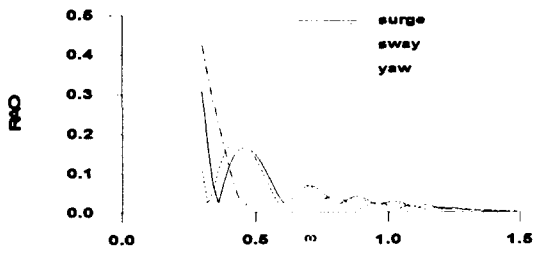


Fig.3 Lateral motion of VLFS

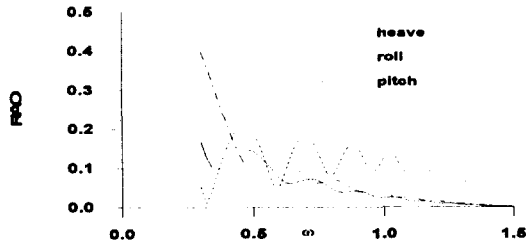


Fig.4 Vertical motion of VLFS

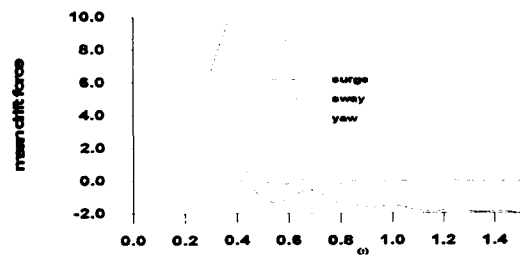


Fig.5 Mean drift force and yaw moment

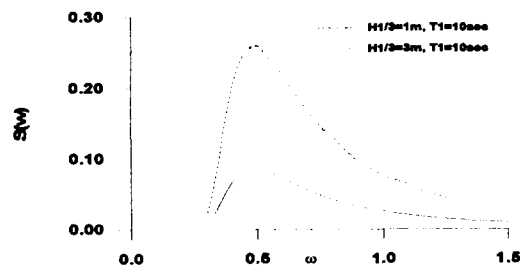


Fig.6 ITTC wave spectrum

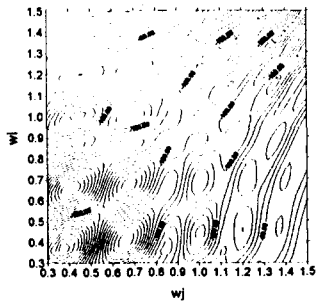


Fig.7 Quadratic Transfer function of surge mode ($\beta=30\text{deg}$)

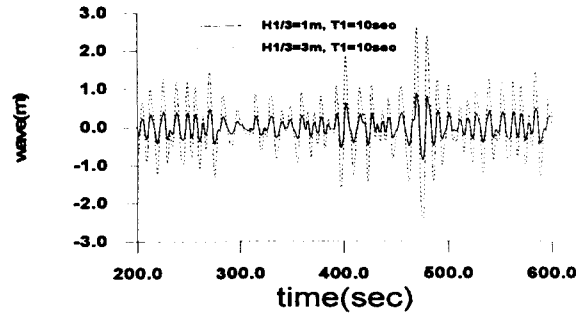


Fig.8 Time histories of irregular waves

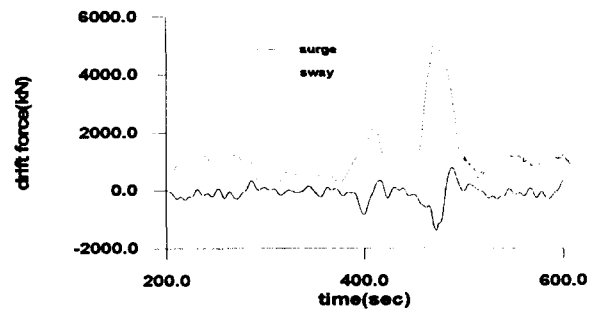


Fig.9 Time histories of drift forces ($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_1=10\text{sec}$, $\beta=30\text{deg}$)

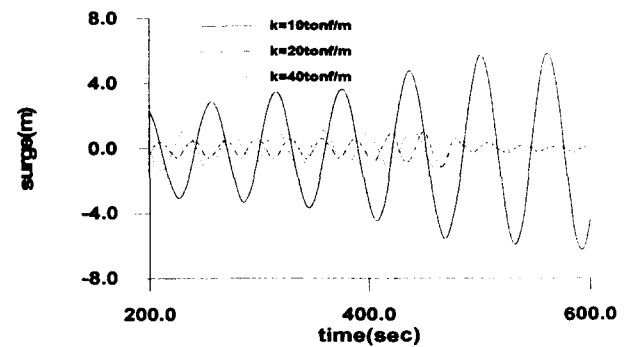


Fig.10 The predicted surge motion histories ($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{s}$, $\beta=30\text{deg}$)

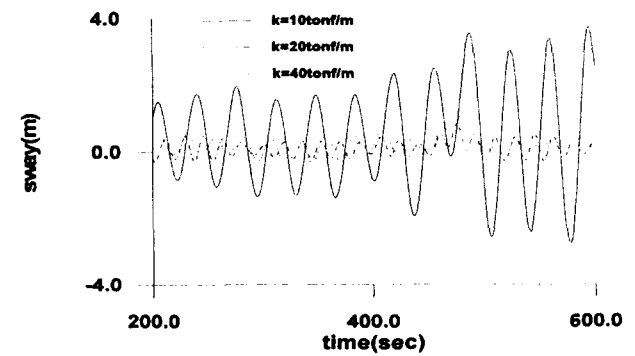


Fig.11 The predicted sway motion histories ($H_{1/3}=1\text{m}$, $T_1=10\text{s}$, $\beta=30\text{deg}$)

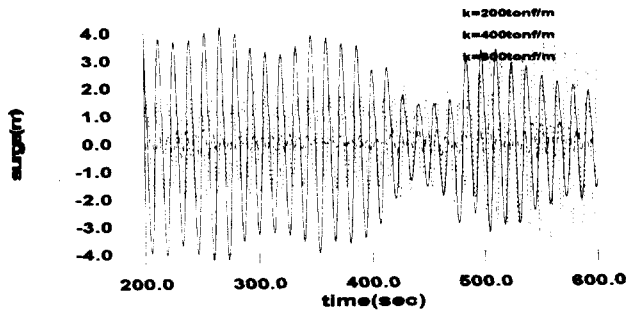


Fig.12 Time histories of surge motion($H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30$)

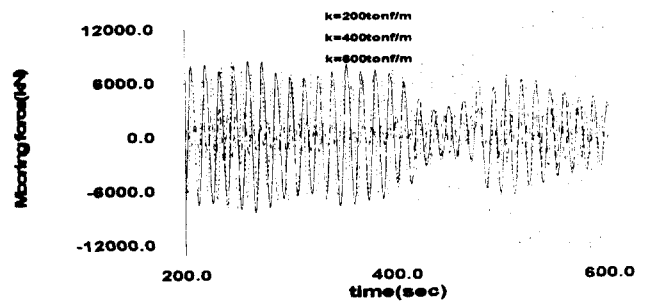


Fig.16 The predicted time histories of mooring forces(Dolph $H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

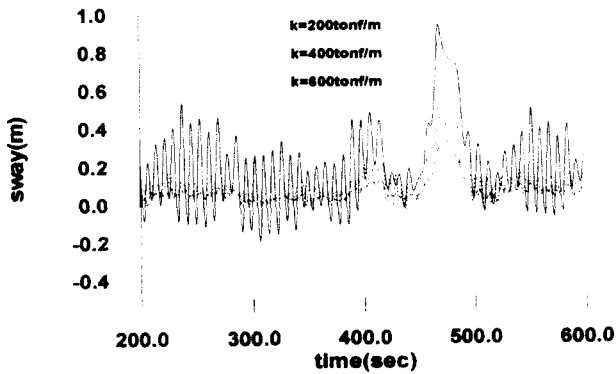


Fig.13 Time histories of sway motion($H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30$)

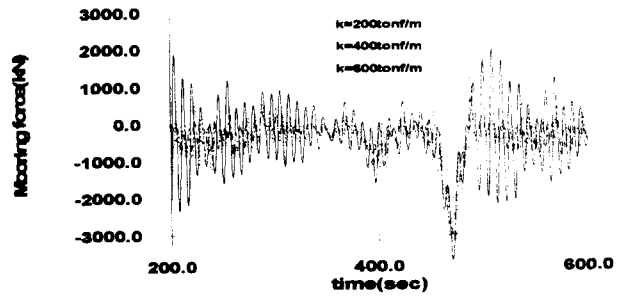


Fig.17 The predicted time histories of mooring forces(Dolph $H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

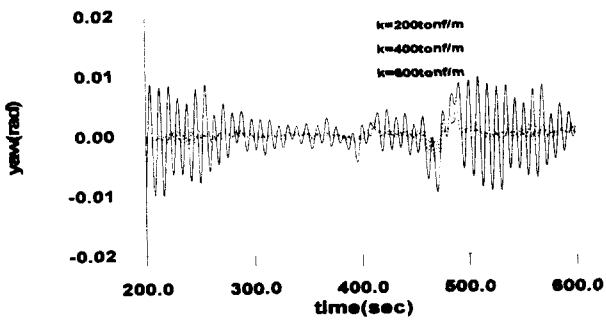


Fig.14 Time histories of yaw motion($H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30d$)

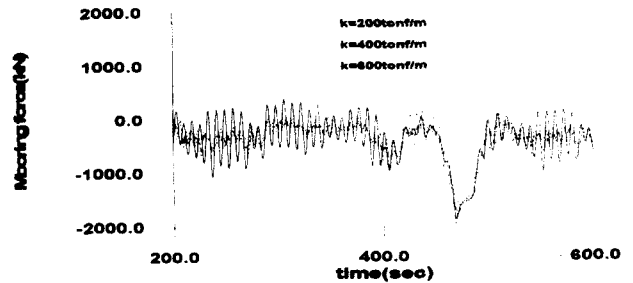


Fig.18 The predicted time histories of mooring forces(Dolph $H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

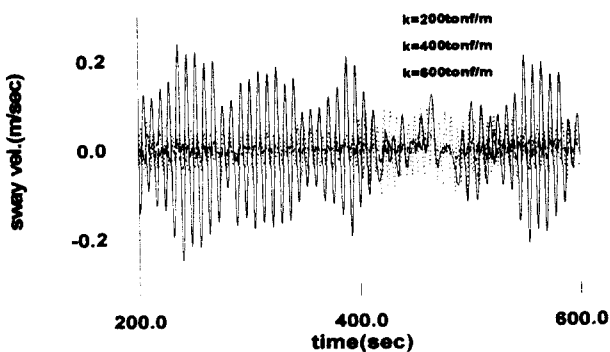


Fig.15 Time histories of sway velocity($H_{1/3}=3m, T_1=10s =30deg$)

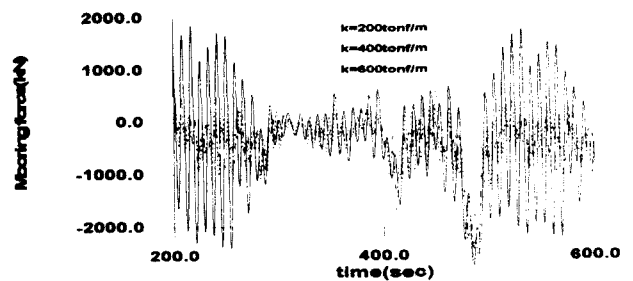


Fig.19 The predicted time histories of mooring forces(Dolph $H_{1/3}=3m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

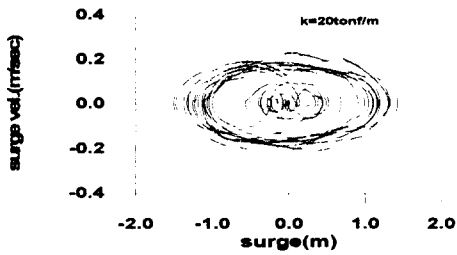


Fig.20 Phase diagram of surge motion($H_{1/3}=1m, T_1=10sec, \beta=30$)

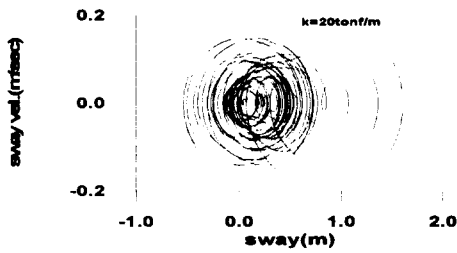


Fig.21 Phase diagram of sway motion($H_{1/3}=1m, T_1=10sec, \beta=30$)

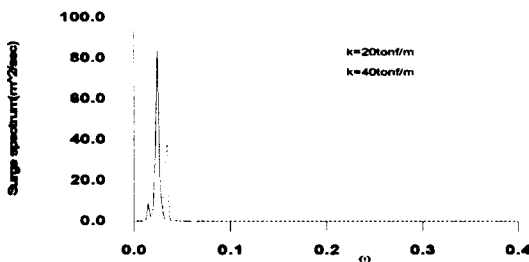


Fig.22 Spectrum for surge motion($H_{1/3}=1m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

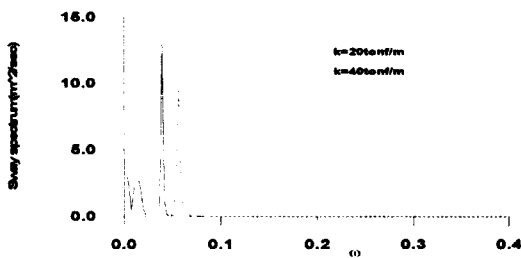


Fig.23 Spectrum for sway motion($H_{1/3}=1m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

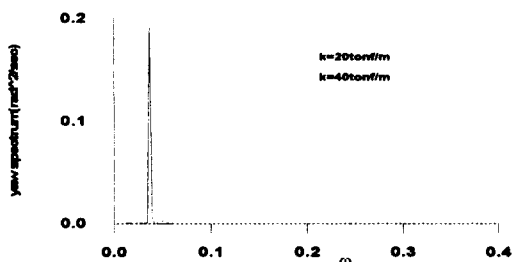


Fig.24 Spectrum for yaw motion($H_{1/3}=1m, T_1=10sec, \beta=30deg$)

4. 결 론

본 연구는 3차원 소오스-다이폴 분포법이 장파정 불규칙파 중에서 해상공항의 거동을 조사하기 위해 사용되었고, 저주파수 운동은 수평방향의 3가지 운동에 대하여 계산하였다.

- (1) 시간영역의 운동방정식으로 계산된 저주파수 운동은 잘 표현되었으며, 돌핀 계류계의 설계를 위한 계류력의 크기를 시간에 따라 계산하였다.
- (2) 불규칙파 중에서 저주파수운동은 계류계의 공진 주파수에서 가장 큰 것을 확인하였다.
- (3) 앞으로 돌핀 계류계에 대한 fender를 고려한 모델링과 2차항 파상계력의 계산에서 유탄성 운동을 고려하여 저주파수 운동을 해석할 필요성이 대두된다.

참 고 문 헌

이창호, 구자삼, 조효재, 홍봉기(1998). "불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답해석", 한국해양공학회지 제 12권 제 2호.

이호영, 광영기(1997). "파중에서 전진하는 선박의 부가저항 해석", 한국해양공학회지 제 11권 제 2호.

이호영, 신현경(2000). "시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동 해석", 한국해양공학회지 제 14권 제 3호.

이호영, 신현경(2000). "불규칙파 중에서 돌핀 계류된 바아지식 해상공장에 대한 비선형 응답 해석", 한국해양공학회지 제 14권 제 4호(발간예정).

Choi, Y.R. and Choi, H.S.(1990). "Transient Surge Motion of Moored Ship in Random Waves", Proc. of the F Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Seoul, Korea

Cummins, W.E.(1962). "The Impulse Response Function and Motions", Schifftechnik Bd, pp 101~109.

Pinkster, J.A.(1980). "Low Frequency Second Order Wave Excitation Forces on Floating Structure", Netherland Ship Model B Publ. No.650.

Hong, D.C.(1987). "On the Improved Green Integral Equation Applied to the Water-wave Radiation-Diffraction Problem", Journal of SNAK, Vol.24, No.1.