

---

 論 文
 

---

大韓造船學會誌  
 第24卷 第1號 1987年 3月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 24, No. 1, March 1987

## 상호작용을 고려한 두 바아의 운동응답

안 성 필\* · 이 기 표\*\*

## The Hydrodynamic Interaction Effects between Two Barges on the Motion Responses

S.P. Ann\* · K.P. Rhee\*\*

## Abstract

In this paper, a three dimensional singularity distribution method is applied to investigate the hydrodynamic interactions between two barges floating on a free surface of a deep water.

The results show that the hydrodynamic interaction forces are important in the calculation of motion responses of two barges floating in each other's vicinity. Furthermore the trends of hydrodynamic forces due to the motion of body itself are different from those of a single barge, and the motions of the leeward barge can sometimes exceed those of the seaward barge.

## 기 호 설 명

$A$	; 파진폭	$n$	; 경계면에서 유체장벽으로 향한 단위 법선
$a_i$	; $i$ 방향 운동의 복소크기	$P$	; $(x, y, z)$
$AM_{lm}(i, k)$	; 부유체 $m$ 의 $k$ 방향 운동에 의해서 부유체 $l$ 의 $i$ 방향으로 유기되는 유체력중 부가질량성분	$Q$	; $(\xi, \eta, \zeta)$
$A_w$	; 부유체의 수선면적	$\omega$	; 원 주파수
$Ca$	; 무차원화된 부가질량( $AM_{lm}/M$ )	$WD_{lm}(i, k)$	; 부유체 $m$ 의 $k$ 방향 운동에 의해 부유체 $l$ 의 $i$ 방향으로 유기되는 유체력중 파 감쇠 계수 성분
$Cd$	; 무차원화된 파 감쇠계수( $WD_{lm}/M\omega$ )	$WF^l(i)$	; 부유체 $l$ 에 $i$ 방향으로 작용하는 파강제력
$G$	; Green 함수	$\overline{WF^l(i)}$	; 무차원화된 파 강제력( $WF^l(i)/\rho g A \cdot A_w$ )
$g$	; 중력 가속도	$X_l(i)$	; 부유체 $l$ 의 $i$ 방향 운동변위
$j$	; $\sqrt{-1}$	$\Phi_i$	; 속도포텐셜
$L$	; 부유체의 길이	$\rho$	; 유체의 밀도
$M$	; 부유체의 배수량	$\omega_n$	; 파수( $\omega^2/g$ )
		$\chi$	; 입사각
		$d, T$	; 수심

接受日字: 1987年 1月 19日, 再接受日字: 1987年 2月 24日

\* 學生會員, 서울大學校 大學院

\*\* 正會員, 서울大學校 工科大學 造船工學科

I. 서 언

보급선이 부유식 석유수추선에 보급물품을 하역할 때와 유조선에 생산된 원유를 옮겨 실을 때, 또는 두척의 크레인 바아지에 의해 해상 구조물을 설치할 때 등에서는 두 부유체의 상호작용을 예측하는 것이 대단히 중요하다.

두 부유체의 상호작용을 구하기 위해서는 각각의 부유체에 대한 상대 부유체의 영향을 고려해야만 하며, 이 상호작용은 통상적인 2차원 해석법보다는 3차원 해석법을 상용하는 것이 적합하다.

본 논문에서는 문제를 간략화하기 위해서 선형이론을 도입하여 문제를 방사(Radiation)와 산란(Diffraction) 문제로 나누어, 각각에 대해 적분방정식을 풀어서 속도 포텐셜을 구하였다. 적분 방정식에서는 3차원 무한수심에서의 맥동 소오스(Pulsating source)에 대한 그린함수(Green function)를 사용하였다.

본 논문에서는 동일한 형상을 갖는 두척의 바아지(50m×12m×6m)에 대한 무한수심에서의 운동을 계산하였다. 이 두 바아지의 수심 22m인 유한수심에서의 거동은 Sayer와 Liang[1]에 의해 발표되어 있다. 그러나 무한수심에 대한 계산은 널리 발표되어 있지 않으므로, 부득이 Sayer와 Liang의 계산결과를 본 논문에서 계산한 결과와 비교하였다. 비록 각각 다른 수심에 대한 계산을 수행했지만, 두 계산결과의 경향은 비교적 일치함을 볼 수 있었다.

본 논문의 방법은 일의의 형상의 부유체에 대한 적용이 가능하므로 위에서 밝힌 경우 이외에도, 부두에 정착한 선박의 거동에 대한 계산등 여러가지 다양한 경우에 대해 이용할 수 있다.

II. 수식의 정리

유체에 대해 비점성과 비압축성을, 유동에 대해 비회전성을 가정하여 속도 포텐셜을 도입하고, 작은 파고를 가정해서 선형화 이론을 적용시킨다. 또한 유기되는 배의 운동이 작다고 가정해서 유체 동력학적 문제를 작은 운동의 변수로써 선형화시킨다. 전체속도 포텐셜은 방사문제와 산란문제로 부녀 구해진 속도 포텐셜의 합으로 가정한다.

$$\Phi(x, y, z) = \Phi_0 + \Phi_1 + \sum_{i=1}^6 \Phi_i \quad (1)$$

본 논문에서 사용한 좌표계는 Fig. 1과 같이 수면상

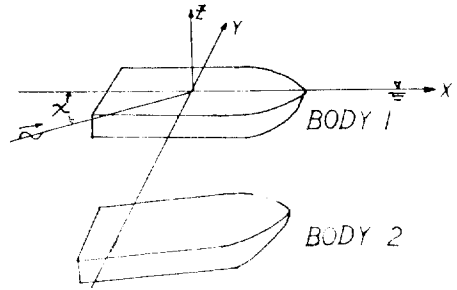


Fig. 1 Coordinate system

에 x와 y축을 놓고, 수면에 수직 상방향으로 z축을 정한다. 이때 원점은 두 부유체중에서 하나의 부유체의 수선면에 위치한다.

1. 경계치 문제

전 유체장에서 속도 포텐셜은 다음과 같은 3차원 Laplace 방정식을 만족해야 한다.

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \Phi_i(x, y, z) = 0 \quad (i=0, 1, \dots, 7) \quad (2)$$

각 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

1) 선형화된 자유표면 경계조건

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial z} - \omega_n \Phi_i = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (i=0, 1, \dots, 7) \quad (3)$$

2) 해저면 경계조건

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial z} = 0 \quad \text{on bottom } (i=0, 1, \dots, 7) \quad (4)$$

3) 무한원방 경계조건

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left[ -\frac{\partial \Phi_i}{\partial R} + j\omega_n \Phi_i \right] = 0 \quad (i=1, 2, \dots, 7) \quad (5)$$

4) 배의 평균위치에서의 선체 경계조건

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = \begin{cases} j\omega_n n_i & (i=1, 2, \dots, 6) \\ -\frac{\partial \Phi_0}{\partial n} & (i=7) \end{cases} \quad \text{on the hull} \quad (6)$$

2. 적분방정식

선체밖의 전 유체장에 Green 정리를 적용시키면 다음과 같은 적분방정식을 구할 수 있다.

$$-\frac{\sigma_i(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma_i(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_P} dS(Q) = f_i(P) \quad (7)$$

여기서 S는 선체표면을 나타내고 f\_i(P)는 선체 경계조건이다. 식(7)에서의 Green 함수는 다음과 같은 무한수심에서의 맥동 소오스에 대한 속도 포텐셜이다.

$$G(P, Q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 2\omega_n \int_0^\infty \frac{e^{k(z+\zeta)}}{k-\omega_n} J_0(kR) dk - 2\pi j \omega_n e^{\omega_n(z+\zeta)} J_0(\omega_n R) \quad (8)$$

여기서

$$r^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2$$

$$r_1^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2$$

$J_0$ ; Bessel function

식(8)은  $\omega_n R$ 이 클 때에는 수치계산에 있어서 많은 계산시간이 요구되므로, 이 경우 다음과 같은 Haskind 형태의 Green 함수를 사용한다.

$$G(P, Q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 2\omega_n e^{\omega_n z} \int_{-\infty}^z \frac{e^{-\omega_n \omega}}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (\omega+\zeta)^2}} d\omega - 2\pi j \omega_n e^{\omega_n(z+\zeta)} H_0^{(2)}(\omega_n R) \quad (9)$$

여기서

$H_0^{(2)}$ ; 2<sup>nd</sup> kind Hankel function

식(7)의 적분 방정식으로부터 소오스의 세기  $\sigma_i(Q)$ 를 구하던 다음 식으로부터 속도 포텐셜을 구할 수 있다.

$$\Phi_i(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_i} \sigma_i(Q) G(P, Q) dS(Q) \quad (10)$$

### 3. 방사문제

정수중에서 두 부유체가 운동을 할 때 각각의 부유체에 작용하는 유체력은, 각각의 부유체를 Body 1과 Body 2라고 하면 Body 1의 운동에 의해 Body 1, 2에 작용하는 유체력과 Body 2의 운동에 의해 Body 1, 2에 작용하는 유체력으로 이루어져 있다.

이 각각의 유체력을 구하기 위해서는 다음과 같은 적분 방정식을 풀어야 한다.

$$-\frac{\sigma_i(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \sigma_i(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_P} dS(Q) = f_i(P) \quad (11)$$

여기서

$S_1$ ; Body 1의 평균 침수표면  
 $S_2$ ; Body 2의 평균 침수표면

Body 1의 운동에 의한 유체력을 구하려면,  $P \in S_1$ 일 때에는  $f_i(P)$ 는 Body 1의 운동에 의한 선체 경계조건이고,  $P \in S_2$ 일 때에는  $f_i(P) = 0$ 으로 하여 적분방정식을 풀면 된다. 즉 Body 2는 수면상에 고정시키고, Body 1만 운동시킨 경우의 문제를 해석하였다. 식(11)의 적분 방정식을 풀어서 소오스의 세기를 구한 다음, 다음 식을 이용하여 속도 포텐셜을 구한다.

$$\Phi_i(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \sigma_i(Q) G(P, Q) dS(Q) \quad (12)$$

식(12)에서 속도 포텐셜을 구하고 나면, 선형화된

Bernoullie 방정식으로부터 압력을 구해서 Body 1과 Body 2에 대해 각각 적분하여 유체력들을 구한다.

$$F_{1k}^1 = -j\omega\rho \iint_{S_1} \Phi_i n_k dS$$

$$F_{1k}^2 = -j\omega\rho \iint_{S_2} \Phi_i n_k dS \quad (13)$$

식(13)의 유체력들에는 Body 1의 가속도에 비례하는 성분과 속도에 비례하는 성분이 각각 포함되어 있다. 이들중에서 가속도에 비례하는 성분들을 Body 1의 가속도로 나눈 것들을 부가 질량이라 하여 각각  $AM_{11}(k, i)$ 와  $AM_{21}(k, i)$ 로 나타낸다. 또한 속도에 비례하는 성분들을 Body 1의 속도로 나누어 파감쇠계수를 구한 다음, 각각  $WD_{11}(k, i)$ 와  $WD_{21}(k, i)$ 로 나타낸다.

Body 2의 운동에 의한 유체력들도 마찬가지로 방법으로 구하여 각 성분들을  $AW_{12}(k, i)$ ,  $AM_{22}(k, i)$ ,  $WD_{12}(k, i)$ ,  $WD_{22}(k, i)$ 로 나타낸다.

### 4. 산란문제

파로 인하여 고정된 부유체에 유기되는 파 강제력은 두 부유체를 고정시키고, 입사파의 선체표면에서의 법선속도를 경계조건으로 하는 적분방정식을 이용해서 구한다.

$$-\frac{\sigma_7(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \sigma_7(Q) G(P, Q) dS(Q) = -\frac{\partial \Phi_0(P)}{\partial n} \quad (14)$$

식(14)에서  $\sigma_7(Q)$ 를 구하면 속도 포텐셜은,

$$\Phi_7(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \sigma_7(Q) G(P, Q) dS(Q) \quad (15)$$

식(15)로부터 속도 포텐셜을 구한 다음, 선형화된 Bernoullie 방정식으로부터 압력을 구한후 각각의 부유체의 침수표면을 따라 적분하여 파 강제력을 구한다.

$$WF^1(k) = -j\omega\rho \iint_{S_1} (\Phi_0 + \Phi_7) n_k dS$$

$$WF^2(k) = -j\omega\rho \iint_{S_2} (\Phi_0 + \Phi_7) n_k dS \quad (16)$$

### 5. 운동방정식

원진동수  $\omega$ 를 갖는 선형 규칙과중에서의 두 유체의 응답은 다음과 같은 운동방정식을 풀어서 구한다.

$$\begin{pmatrix} -\omega^2(I_1 + AM_{11}) + CS1 & -\omega^2 AM_{12} \\ +j\omega WD_{11} & +j\omega WD_{12} \\ \dots & \dots \\ -\omega^2 AM_{21} & -\omega^2(I_2 + AM_{22}) + CS2 \\ +j\omega WD_{21} & +j\omega WD_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} WF^1 \\ WF^2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

여기서  $CS1$ 과  $CS2$ 는 각각 유체정력학적 힘을 나타낸다.

III. 계산결과 및 고찰

수치계산은 동일한 형상을 갖는 두척의 바아지(50m × 12m × 6m)에 대해서 수행하였다. 이 두 바아지는 Fig. 2에서 보인 바와 같이, 선측부 사이의 거리를 10m로 유지한 상태로 위치한다. 또한 두 바아지의 선수부는 같은 선상에 위치한다.

수치계산을 위해서 각각의 바아지의 평균 침수표면을 108개의 사각형 요소로 나타내었다. Fig. 3에는 바아지를 사각형 요소로 나타낸 것을 보였다.

Fig. 2에 도시한 2개의 바아지에 대한 상하동요시의 부가질량, 감쇠계수, 파강제력 그리고 동요진폭을 Fig. 4~13에 도시하였다. Fig. 4와 5에는 입사파와 직접 만나는 쪽에 있는 바아지(Barge 1)의 부가질량과 감쇠계수를 도시하였다. 바아지 한척만 있을 때에 비하여 값의 크기에는 별차이가 보이고 있지 않으나 상호작용

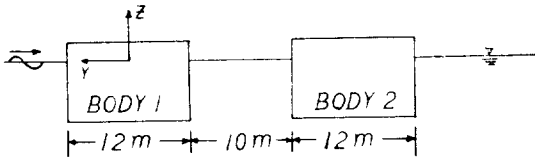


Fig. 2 Relative position

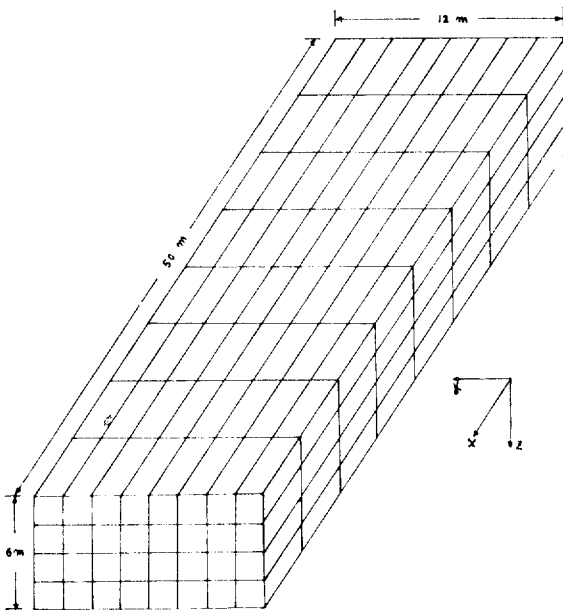


Fig. 3 Surface representation by quadrilateral elements

효과로 인하여 곡선의 경향에 다소의 차이가 있다. Fig. 6과 7에는 입사파의 뒷쪽에 있는 바아지(Barge 2)의 동요로 인하여 유기된 앞쪽 바아지의 부가질량과

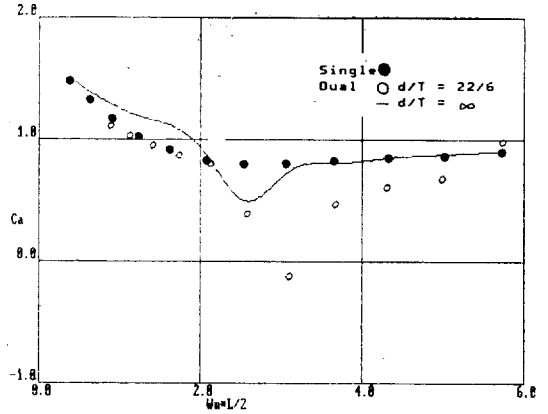


Fig. 4 Heave added mass of barge 1

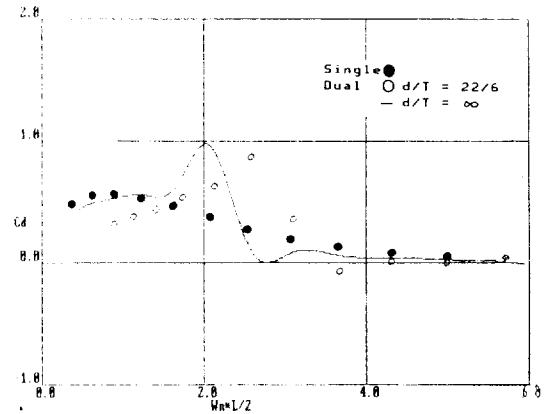


Fig. 5 Heave damping coefficient of barge 1

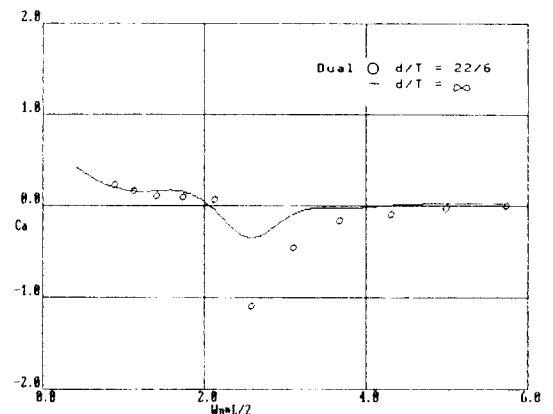


Fig. 6 Heave added mass of barge 1 due to motion of Barge 2

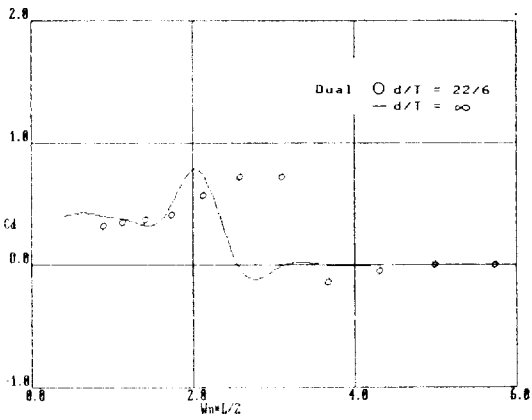


Fig. 7 Heave damping coefficient of barge 1 due to motion of barge 2

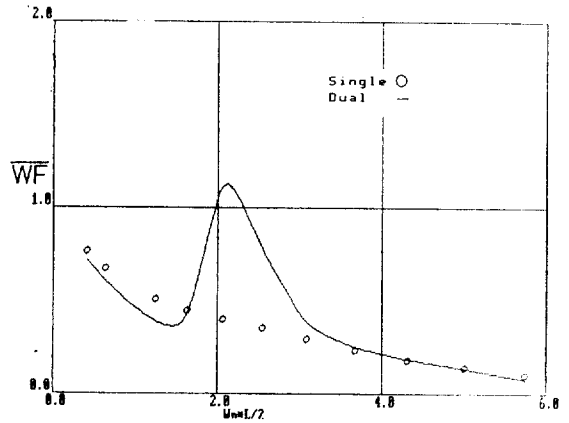


Fig. 10 Amplitude of heave exciting force of barge 2

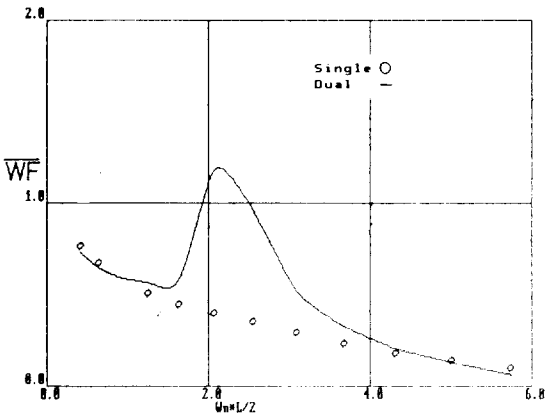


Fig. 8 Amplitude of heave exciting force of barge 1

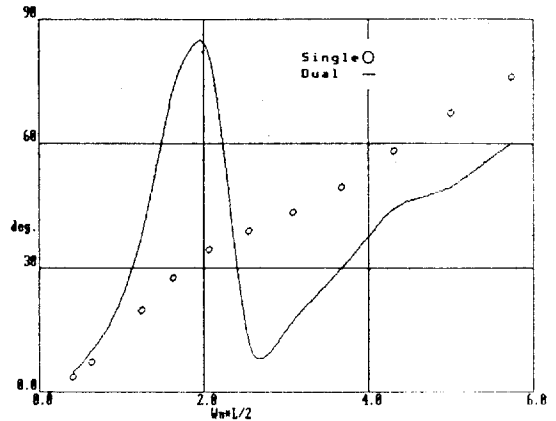


Fig. 11 Phase angle of heave exciting force of barge 2

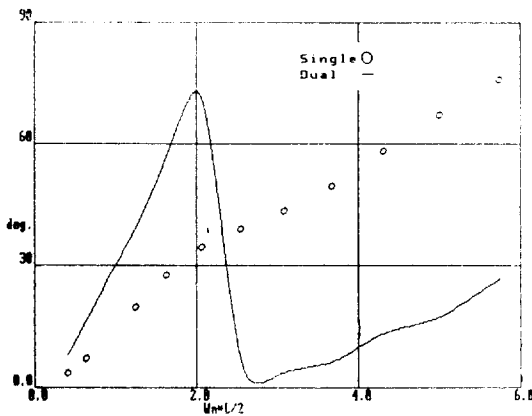


Fig. 9 Phase angle of heave exciting force of barge 1

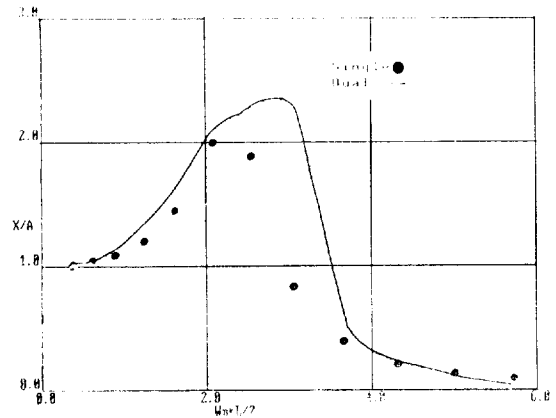


Fig. 12 Amplitude of heave motion of barge 1

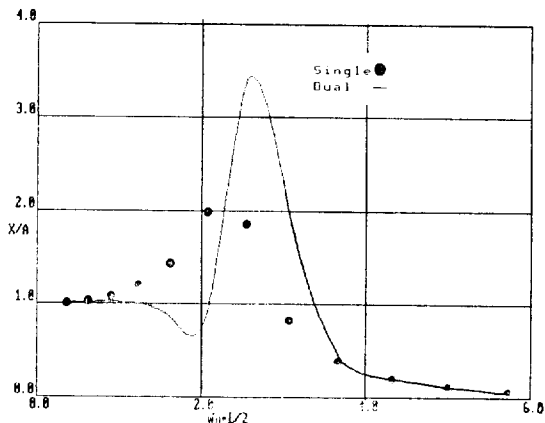


Fig. 13 Amplitude of heave motion of barge 2

감쇠계수를 도시하였으며, 감쇠계수의 경우 앞쪽바이지 자체의 감쇠계수와 거의 같은 크기와 경향을 갖고 있음을 볼 수 있다. Fig. 8~11에는 앞쪽과 뒷쪽 바이지의 파강제력과 위상차가 도시되었으며, 파강제력의 경우, 무차원화된 파수 2.0근방에서의 최대값이 두드러지고 있다. 파강제력의 크기는 두 바이지의 경우, 거의 비슷한 크기와 경향을 갖고 있다. Fig. 12와 13에는 앞쪽과 뒷쪽 바이지의 상하동요진폭을 도시하였으며, 두바이지의 경우 모두 바이지가 한척만 있을 때에 비하여 최대 동요진폭이 큰 값을 갖으며, 뒷쪽 바이지의 경우에는 거의 2배에 가까워 짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

이상의 계산결과로부터 무한수심의 자유표면상에 떠 있는 인접한 두척의 바이지에 규칙파가 입사하는 경우 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 입사파와 직접 만나쪽의 바이지의 부가 질량과 감쇠계수는 바이지 한척만 떠 있을 때와 거의 비슷한 크기의 값을 갖으나 부가질량에는 골(hollow)이, 감쇠계수에는 산(hump)이 존재한다.
- 2) 입사파의 뒷쪽에 있는 바이지 때문에 유기된 앞쪽 바이지의 부가질량과 감쇠계수의 원진동수에 따른 경향은 앞쪽 바이지 자체의 부가질량과 감쇠계수와 비교할 때 비슷한 경향을 갖으며, 부가질량의 경우에는

크기가 10% 이내에 있으나 감쇠계수의 경우에는 크기도 거의 비슷하게 나타나므로 무시할 수 없게 된다.

상하동요 진폭의 최대값은 두척의 바이지 모두가 한척만 있을 때보다 큰 값을 갖으며, 본 계산의 경우에는 뒷쪽 바이지가 앞쪽 바이지보다 큰 값을 갖는다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Faltinsen, O.M. and F.C. Michelsen, "Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number", International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves. London, 1974.
- [2] Hess, J.L. and A.M.O. Smith, "Calculation of Non-lifting Potential Flow about Arbitrary Three-dimensional Bodies", Rep. No. E.S. 40622. Douglas Aircraft Division, 1962.
- [3] Inglis, R.B. and W.G. Price, "Comparison of Calculated Responses for Arbitrary Shaped Bodies Using Two and Three Dimensional Theories", International Shipbuilding Progress, Vol. 27, 1980.
- [4] John, F., "On the Motion of Floating Bodies, II. Simple Harmonic Motions", Comm. Pure Appl. Math., 3, 1950.
- [5] Kim, W.D., "On a Free Floating Ship in Waves", J. Ship Research, 10, 1966.
- [6] Sayer, P. and F. Ursell, "Integral Equation Methods for Calculating the Virtual Mass in Water of Finite Depth", Proc. of 2<sup>nd</sup> Inter. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, 1977.
- [7] Sayer, P. and H.K. Liang, "Wave Interactions between Barges", American Society of Civil Engineering, 1986.
- [8] Shin, Y.S., "Three Dimensional Effect on the Hydrodynamic Coefficients and Wave Exciting Forces Used in Predicting Motions of Ships", Ph. D. Thesis, Univ. of Michigan, 1979.