

## 파랑중 계류된 선박의 표류감쇠에 관한 연구

이호영 · 박홍식 · 신현경  
울산대학교 수송시스템공학부

### A Study on the Wave Drift Damping of a Moored Ship in Waves

HO-YOUNG LEE, HONG-SHIK PARK AND HYUN-KYOUNG SHIN

School of Transportation System Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

**KEY WORDS:** Wave drift damping 파랑표류감쇠, Translating and pulsating green function 전진하면서 동요하는 그린함수, 3-Dimensional panel method 3차원 패널법, Drift force and moment 표류력과 모우멘트

**ABSTRACT:** As the offshore oil fields are moved to the deep ocean, the oil production systems of FPSO(Floating Production Storage and Offloading System)-type are constructed frequently these days. So, it is very important to estimate the drift motion and damping effects due to the drift motion simultaneously. The components of slow drift motion damping consist of viscous, wave radiation effect and wave drift damping. It is needed to estimate the wave drift damping more accurately than others. The wave drift damping signifies the time-rate of mean wave drift force on oscillating ship or ocean structure which is moving with constant speed. In order to calculate this, the 3-Dimensional panel method is employed with the translating and pulsating Green function in the frequency domain. The calculation is carried out for a Series 60 ( $C_B=0.7$ ) and the results are compared with other numerical ones.

### 1. 서 론

최근, 해저석유 개발이 심해로 옮겨감에 따라 기존의 고정된 구조물이 아닌 이동할 수 있고 자원 생산과 저장이 가능한 FPSO와 같은 부유식 구조물의 사용이 증가하고 있다. 따라서, 해상에서의 동적 거동이 이런 부유식 구조물에 중요한 영향을 미친다. 이런 영향을 줄이기 위해서 동적 위치 제어시스템(DPS, Dynamic Positioning System) 등 여러 종류의 위치유지 시스템을 이용하고 있다.

이러한 제어 시스템을 구축하기 위해서는 우선 부유식 구조물에 미치는 표류운동에 관한 연구가 필요하다. 그러므로 작은 속도로 전진하는 선체와 파도와의 상호관계는 매우 중요하다. 저진동 표류운동은 구조물과 저진동수 비선형 파강제력의 공진에 의해 발생하는데 수평운동에 영향을 미친다. 표류운동의 추정을 위해서는 2차 파강제력 및 정확한 추정과 감쇠계수의 정확한 추정이 불가피하다. 감쇠계수를 구성하는 것으로는 점성에 의한 감쇠계수, 방사에 의한 감쇠계수, 표류감쇠계수가 있다. 표류감쇠(wave drift damping)란 물체가 파랑중 작은 속도로 운동함으로써 생기는 표류력의 증가라고 Wichers와 Sluijs(1979)가 정의하고 있다. 그리고 시간 평균 표류력(mean drift force)에서의 작은 전진속도의 영향이 중요한 역할을 한다는 것도 이야기하고 있다. Wichers 등(Wichers and Huijsmans, 1984; Huijsmans, 1986)는 모형시험과 이론적 접근을 시도하였는데 2m/s로 전진하는 310m, 200kDWT 원유운반선 속도가 0일 때와 비유하여 부가저항이 50-100%정도 증가하는 것을 알아내었다.

본 논문에서는 계열 60 선박에 대해서 전진하면서 동요하는

3차원 Green 함수를 이용한 패널방법을 사용하여 시간 평균된 표류력을 계산하였고, 그 결과를 Grue 등(Grue, 1992; Chan, 1990)의 결과와 수치적으로 비교하였다.

### 2. 문제의 정식화

기본 가정으로서 유체는 이상유체이다. 유체는 비점성, 비압축성 유체이며 유체의 유동은 비 회전적이라 가정하면 속도 포텐셜이 존재하며 선박 운동 진폭이 작고 파의 진폭이 파장에 비하여 작다는 가정 하에 선형이론이 도입된다.

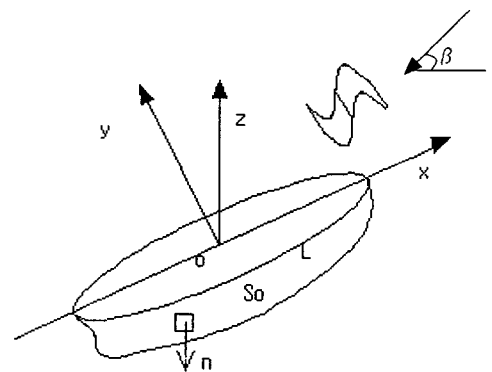


Fig. 1 Coordinate system

또한 표면장력은 무시하고 수심은 무한하다고 가정한다. 좌표계는 Fig. 1과 같이 전진하면서 동요하는 선체의 수선면의

평균위치에  $o$ 점을 둔 우수계의  $\alpha$ -xyz 기준좌표계를 취하고, xy 평면은 평균수면에 두고, z축은 연직상방으로 향하는 것으로 한다. 선체의 정상 전진속도는 크기가  $U$ 이며 양의 x축 방향을 취하는 것으로 한다. 포텐셜 이론을 적용하여 속도포텐셜을 정상부분과 비정상부분을 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x;t) = U[-x + \overline{\phi}(x)] + Re[\phi(x;t) e^{-i\omega_e t}] \quad (1)$$

(1)식의 첫 번째 항에서 정상 포텐셜  $\overline{\phi}$ 이 선박운동에 미치는 영향은 기본유동에 비해 작다는 가정하에 고차항으로 간주되어 무시될 수 있으며, 비정상 포텐셜  $\phi(x;t)$ 는 다음과 같이 분리될 수 있다.

$$\phi(x;t) = [\zeta(\phi_0 + \phi_7) + \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j] \quad (2)$$

위의 식에서 첫 번째 항의 무한 수심에서의 입사파 포텐셜은 식(3)과 같고 조우 주파수(frequency of encounter)  $\omega_e$ 는 식(4)와 같다.

$$\phi_0 = \frac{g\zeta}{\omega} e^{Kz - iK(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (3)$$

$$\omega_e = \omega - UK\cos\beta \quad (4)$$

$\omega$  : 파 주파수

$\beta$  : 파 입사각 ( $180^\circ$  at head sea)

$K$  : 파수 ( $K = \omega^2/g$ )

$\zeta$  : 입사파 진폭

$\phi_7$ 은 산란 포텐셜,  $\phi_j$ 는 진폭이  $\xi_j$ 인  $j$  번째 운동 모드의 방사 포텐셜이다. 전체 속도 포텐셜  $\Phi$ 는 라플라스 방정식 ( $\Delta\Phi=0$ )과 무한원방의 방사조건을 만족한다. 방사 속도포텐셜과 산란 속도포텐셜은 다음의 경계조건을 만족한다.

$$\left[ (-i\omega_e - U\frac{\partial}{\partial x})^2 + g\frac{\partial}{\partial z} \right] \phi_j = 0 \quad j=1,2,\dots,7 \quad \text{on } S_F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega_e n_j + U m_j \quad j=1,2,\dots,6 \quad \text{on } S_o \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{on } S_o \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad j=1,2,\dots,7 \quad \text{at } z=-\infty \quad (8)$$

$S_F$ 는 자유표면경계,  $S_o$ 는 물체표면경계,  $\vec{n}$ 는 물체에서 유체영역으로 향하는 법선 벡터,  $\vec{r}$ 은 물체 고정 좌표계에 대한 위치벡터이다.

$$\begin{aligned} (n_1, n_2, n_3) &= \vec{n} \\ (n_4, n_5, n_6) &= \vec{r} \times \vec{n} \\ (m_1, m_2, m_3) &= (0, 0, 0) \\ (m_4, m_5, m_6) &= (0, n_3, -n_2) \end{aligned} \quad (9)$$

일정하게 전진하는 좌표계  $\alpha$ -xyz에서 순간 침수 물체 표면  $S_W$  상에 작용하는 유체압력은 비정상 속도포텐셜  $\phi(x;t)$ 에 대한 베르누이 방정식에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$p(\vec{x};t) = -\rho \left\{ \Phi_t + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + \overline{W} \cdot \nabla \phi + \frac{1}{2} (\overline{W} \cdot \overline{W} - U^2) + gz \right\} \quad \text{on } S_W \quad (10)$$

$$\text{where } \overline{W} = -U + \nabla \overline{\phi}$$

경계치 문제를 풀기 위해서 본 논문의 적분방정식은 Chang (Chang, 1977)에 의해 제안된 형태를 사용하였다. 속도 포텐셜은 3차원 소오스 분포법에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} \phi(p) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_o} \sigma(q) G(p,q) ds(q) \\ &\quad + \frac{U^2}{4\pi g} \oint_L \sigma(q) G(p,q) n_1 dy \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sigma(p) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_o} \sigma(q) \frac{\partial G(p,q)}{\partial n} ds(q) \\ + \frac{U^2}{4\pi g} \oint_L \sigma(q) \frac{\partial G(p,q)}{\partial n} n_1 dy = \frac{\partial \phi(p)}{\partial n} \quad (12) \end{aligned}$$

식(11)에서  $L$ 은 수선이다. 그린함수  $G(p;q)$ 는 점  $q$ 에 위치한 단위강도의 소오스에 기인하는 점  $p$ 에서 속도포텐셜이고, 라플라스 방정식, 무한원방 방사 조건, 식(5)과 식(8)을 만족한다.  $\Phi(p)$ 는 점  $p$ 에서의 속도 포텐셜이다. 식(12)에 식(6), 식(7)을 적용하면  $\sigma(q)$ 를 구할 수 있다. 전진하면서 동요하는 그린함수  $G$ 의 적분 방법은 Hoff(1990), Lee(1994, 1996)에 자세히 나타난다. 선체에 작용하는 유체력과 모멘트는 다음과 같다.

$$F_j = - \iint_{S_W} p \cdot n_j ds = F_j^W + F_j^R + F_j^\delta \quad (13)$$

$F_j^W$ 는 파강제력과 모멘트이고,  $F_j^R$ 은 강제동요에 의한 동유체력과 모멘트,  $F_j^\delta$ 는 복원력과 모멘트이며 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} F_j^W &= -\rho \sum_{k=1}^6 \iint_{S_o} (i\omega_e - U m_j) \\ &\quad \cdot (\phi_0 + \phi_7) e^{i\omega_e t} n_j ds \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_j^R &= -\rho \sum_{k=1}^6 \xi_k \iint_{S_o} (i\omega_e - U m_j) \\ &\quad = (\omega_e^2 A_{jk} - i\omega_e B_{jk}) \xi_k e^{i\omega_e t} \quad (15) \end{aligned}$$

$$F_j^\delta = \rho g \int \int (\vec{a} \cdot \vec{k}) n_j ds = - \sum_{k=1}^6 C_{jk} \xi_k e^{i w_e t} \quad (16)$$

$A_{jk}, B_{jk}, C_{jk}$ 는 부가질량, 감쇠계수, 복원력계수이다. 선체의 운동이 입사파의 주파수와 조화인 것으로 가정하면 파에 의한 총 힘은 파강제력과 같고 연성된 선형 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^6 \{ -w_e^2 (M_{jk} + A_{jk}) + i w_e (B_{jk} + C_{jk}) \} \xi_k = F_j^W \quad (17)$$

$\xi_k$ 는 운동 변위이고,  $M_{jk}$ 는 선체의 질량행렬이다. 시간평균된 표류력과 모멘트는 다음과 같다. 이를 유도할 때 물체가 종평면에 대칭이고 부력중심은 물체의 중력중심과 같은 수직선 위에 있다는 가정을 사용하였다.(이와 광, 1997)

$$\begin{aligned} \vec{F}^{(2)} = & -\frac{1}{2} \rho g \oint_L \xi^2 \vec{n} dt + \frac{1}{2} \rho \int \int_{S_v} (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \vec{n} ds \\ & + \rho \int \int_{S_v} (\vec{a} \cdot \nabla \Phi) \vec{n} ds + \vec{\Omega} \times \vec{F}^{(1)} \\ & - \rho U \int \int_{S_v} (\vec{a} \cdot \nabla \Phi) \vec{n} ds - \rho g \xi_4 \xi_6 S_{10} \vec{k} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \vec{M}^{(2)} = & -\frac{1}{2} \rho g \oint_L \xi^2 \vec{r} \times \vec{n} dt \\ & + \frac{1}{2} \rho \int \int_{S_v} (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \vec{r} \times \vec{n} ds \\ & + \rho \int \int_{S_v} (\vec{a} \cdot \nabla \Phi) \vec{r} \times \vec{n} ds \\ & + \vec{\delta} \times \vec{F}^{(1)} + \vec{\Omega} \times \vec{M}^{(1)} \\ & - \rho U \int \int_{S_v} (\vec{a} \cdot \nabla \Phi) \vec{r} \times \vec{n} ds \end{aligned} \quad (19)$$

$$- \rho g \left( \begin{array}{c} \xi_2 (\xi_3 S_{00} - \xi_5 S_{10}) + \xi_3 \xi_6 S_{10} + \xi_5 \xi_6 (S_{02} - S_{20}) \\ - \xi_1 (\xi_3 S_{00} - \xi_5 S_{10}) + \xi_4 \xi_6 (S_{02} - S_{20}) \\ 0 \end{array} \right)$$

Wichers와 Sluijs(1979)은 표류감쇠를 다음과 같이 정의하였다. 계류된 구조물의 저주파수 감쇠계수는 파랑중에서 정수중보다 크지며, 그 크기는 저주파수 운동속도에 선형적으로 비례한다. 이러한 파에 의한 표류감쇠는 운동의 조우주파수에는 관련이 없고 입사파의 주파수와 관련이 있으며, 그 크기는 입사파의 진폭에 비례한다. 그리고 Grue(1992)는 표류감쇠계수를 다음과 같이 나타낸다.

$$B_{x_{uv}} = - \frac{\vec{F}_x^{(2) U=0} - \vec{F}_x^{(2) U \neq 0}}{U} \quad (20)$$

위의 식에서 표류감쇠계수는 속도 변화에 대한 표류력의 변화이다.

### 3. 계산결과 및 고찰

본 논문에서 수치계산을 수행한 선박은 계열 60 선박이고 Fig. 2와 같이 246개의 패널을 분포시켜서 y축에 대한 대칭 관계를 이용하여 계산하였다. 유기속도는 Hess와 Smith(1964)의

방법으로 구하고 포텐셜에 대한 면적분은 Newman(1986)이 제시한 식으로 구하였다. 참고적으로 운동응답, 표류력 및 주파수에 대한 무차원화는 다음과 같이 Table 1에 나타내었다.

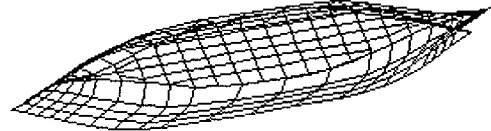


Fig. 2 Panel arrangement of series 60

Table 1 Non-dimensional forms of hydrodynamic forces and ship responses

Motion response ratio	$\xi_j' = \xi_j / \zeta$	j=1,2,3
	$\xi_j' = \xi_j / \zeta K$	j=4,5,6
Mean drift force	$F_k^{(2)'} = F_k^{(2)} / \rho g \zeta^2 B$	k=1,2,3
	$F_k^{(2)'} = F_k^{(2)} / \rho g \zeta^2 L^2$	k=4,5,6
Wave drift damping	$B_k' = B_k / U \rho g \zeta^2 B$	k=1,2
	$B_k' = B_k / U \rho g \zeta^2 L^2$	k=6
Frequency	$w / \sqrt{L/g}$	

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 surge, heave, pitch의 운동응답이다. 파의 입사각은 180° 이고 Fn=0.0일 때와 Fn=0.04일 때를 비교하였다. 그리고 파 입사각이 140° 일 때 surge, sway, yaw 운동응답을 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 여기에서 Fn=0.04 (U=1.38m/s)는 조류의 속도를 고려한 것이다.

Fig.3~8의 결과에 의하면 선박이 전진 속도를 가지면 고 주파수 영역에서 운동 값이 약간 커지는 경향을 가진다.

Fig. 9, Fig. 10, Fig.11은 시간 평균 표류력을 수치 계산하여 Grue(1992)의 결과와 비교하여 나타내었다. 특히 파 입사각이 180° 일 때 X방향의 표류력에 대해서는 Grue(1992)의 결과와는 차이를 보이고 있으나 본 논문과 계산방법이 아주 유사한 Chan(1990)의 계산치와 비교하면 거의 비슷한 것을 볼 수 있다.

Fig. 11에서 Y방향의 시간 평균 표류력은 Grue(1992)의 계산치 보다 낮게 나타나고, Fig. 12는 Z 방향 모멘트를 도시하였

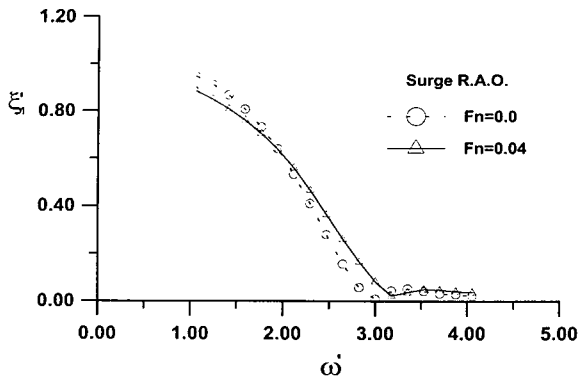


Fig. 3 Surge response for series 60 at incidence angle 180°

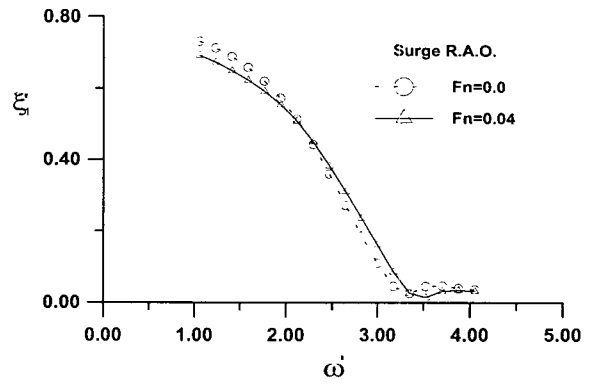


Fig. 6 Surge response for series 60 at incidence angle 140°

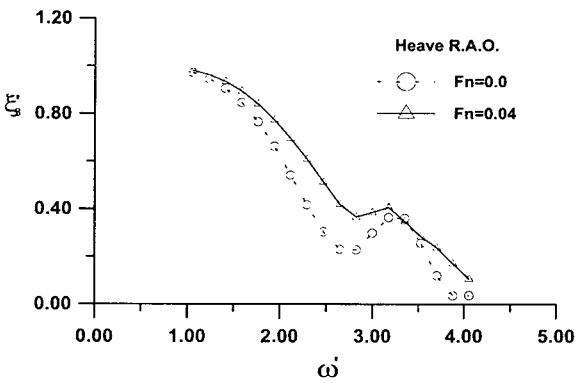


Fig. 4 Heave response for series 60 at incidence angle 180°

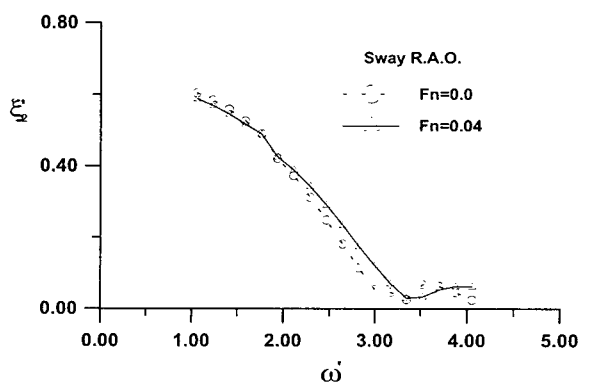


Fig. 7 Sway response for series 60 at incidence angle 140°

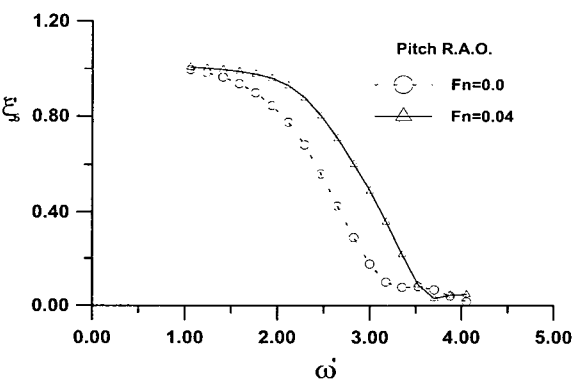


Fig. 5 Pitch response for series 60 at incidence angle 180°

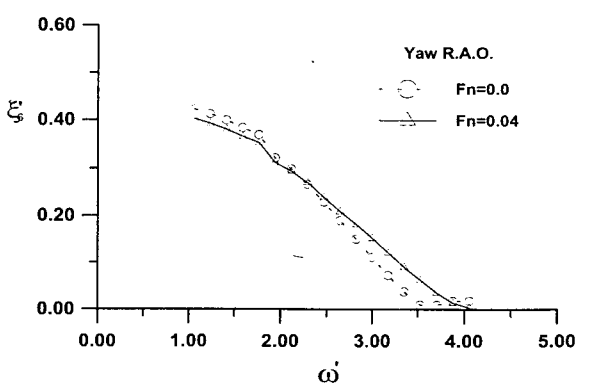


Fig. 8 Yaw response for series 60 at incidence angle 140°

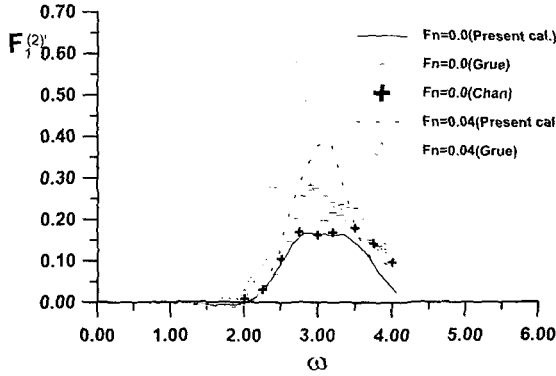


Fig. 9 Mean wave drift X-force for series 60 ship at incidence angle 180°

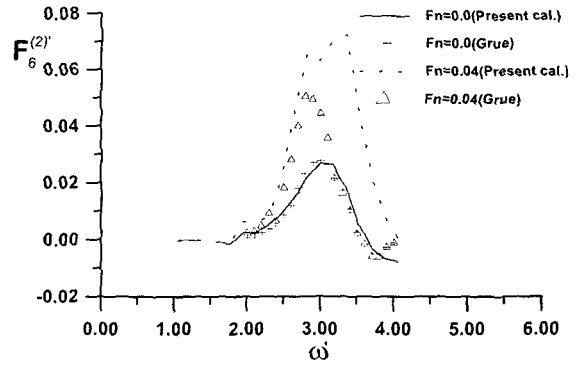


Fig. 12 Mean wave drift Z-moment for series 60 ship at incidence angle 140°

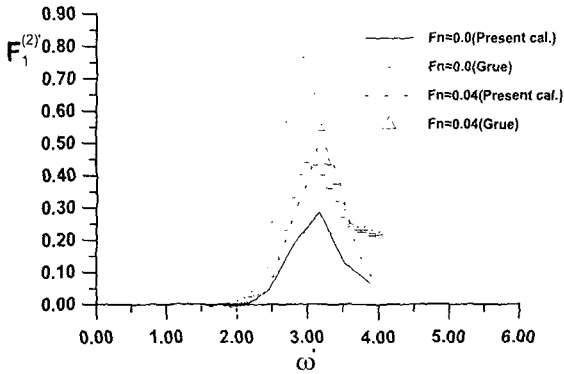


Fig. 10 Mean wave drift X-force for series 60 ship at incidence angle 140°

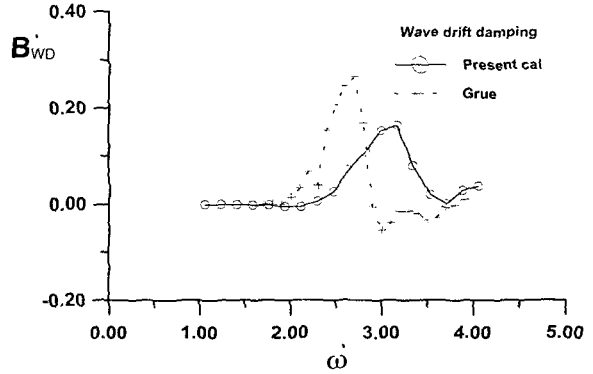


Fig. 13 Wave drift damping coefficient for series 60 ship at incidence angle 180°

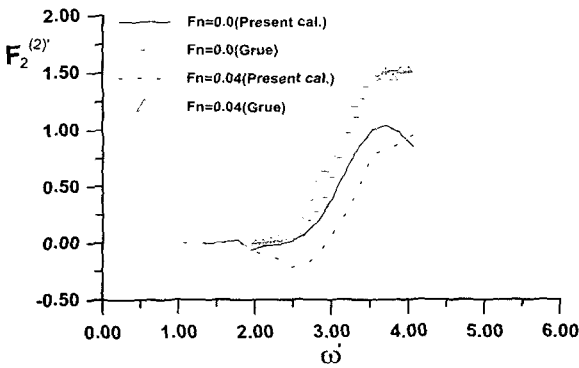


Fig. 11 Mean wave drift Y-force for series 60 ship at incidence angle 140°

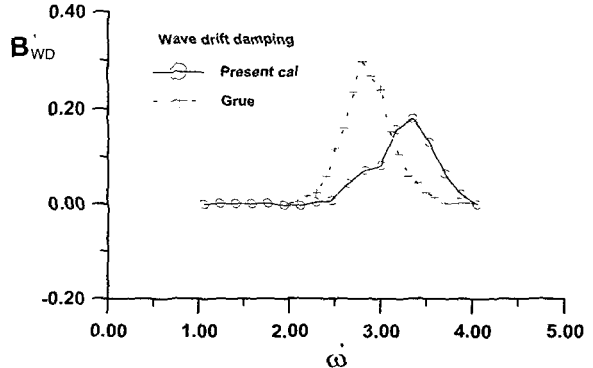


Fig. 14 Wave drift damping coefficient for series 60 ship at incidence angle 140°

는데,  $F_n=0$ 일 때 잘 일치하고  $F_n=0.04$ 일 때는 높은 주파수에서 본 계산결과가 높게 나타난다. 식(20)을 이용하여 X방향 표류 감쇠 계수를 계산하여 나타낸 그림은 Fig. 13, Fig. 14에 나타내

었다. 시간 평균된 표류력에서 차이가 나타나기 때문에 표류 감쇠 계수 역시 차이를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

부유체의 표류감쇠를 계산하기 위해 전진하면서 동요하는 그린함수를 이용한 3차원 패널 방법을 사용하여 다른 계산치와 비교하여 유효성을 검토하고 다음 결론을 도출하였다.

(1) 표류력과 표류모멘트에 관한 본 계산치는 Chan(1990)의 계산치와 일치하나, Grue(1992)의 계산치와는 어느 정도 차이가 보인다. 이는 전진하면서 동요하는 부유체 문제에서 source 적분방정식의 해의 존재성과 유일성에 기인한 문제인 것으로 생각된다(홍, 2000).

(2) 표류감쇠는 양의 값을 가지며 그 크기는 부유체의 수직운동의 공진에 크게 좌우된다. 본 계산에 의하면 계열 60선박의 경우에 상하동요와 종동요의 공진점 사이에 표류감쇠가 음의 값을 갖지 않았다.

(3) 앞으로 적분방정식의 타당성 및 그린함수의 정도를 향상시키고, 다른 선박이나 해양구조물에 대한 추가 계산이 요구된다.

#### 참 고 문 헌

- 박인규, 최항순(1996). “계류된 부유체의 규칙파중 표류감쇠에 대한 연구”, 대한조선학회논문집, 제33권, 제1호, pp 40~53.
- 이호영, 염덕준(1994). “파랑중에서 전진 동요하는 선박의 특이 파수 억제에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제31권, 제4호, pp 73~81.
- 이호영, 송기중, 염덕준(1996). “초고속 쌍동선에 대한 내항성능 해석방법 비교(스트립방법과 3-D Panel 방법)”, 대한조선학회 논문집, 제33권, 제2호, pp 127~138.
- 이호영, 광영기(1997). “파랑중에서 전진하는 선박의 부가저항 해석”, 한국해양공학회지, 제11권, 제2호, pp 91~99.
- 홍도천(2000). “파중 전진하는 선체에 의한 방사파-산란파 문제의 해법에 적용되는 Green 적분방정식의 정확한 도출”, 한

국해양공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp 23~28.

- Chan, H. S.(1990). “A Three-Dimensional Technique for Predicting First-and Second-Order Hydrodynamic Forces on a Marine Vehicle Advancing in waves”, Ph. D. Thesis, University of Glasgow.
- Chang, M. S.(1977). “Computations of Three-Dimensional Ship-Motions with Forward Speed”, Proc. of the 2nd Int. Conference on Numerical Hydrodynamics, Berkeley, U.S.A.
- Grue, J.(1992). “Drift Damping and Drift Moment on Ships Advancing With Small Speed in Oblique Wave”, Ship Technology Research, Vol. 39.
- Hess, J. L. and Smith, A. M. O.(1962, 1964). “Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies”, Douglas Aircraft Company Report No. ES40622, Also See Journal of Ship Research, Vol. 8, No. 2.
- Hoff, J. L.(1990). “Three-Dimensional Green Function of a Vessel with Foward Speed in Waves”, Ph. D. Thesis, The Norwegian Institute of Technology.
- Huijsmans, R. H. M.(1986). “Wave Drift Forces in Current”, 16th Symp. on Naval Hydrodynamics.
- Newman, J. N.(1986). “Distribution of Sources and Normal Dipole over Quadrilateral Panel”, Journal of Eng. Math., Vol. 20.
- Wichers, J. E. W., Sluijs, M. F.(1979). “The Influence of Waves on the low Frequency Hydrodynamic Coefficients of moored Vessels”, OTC 3525, Huston.
- Wichers, J. E. W., Sluijs, M. F.(1984). “On the low Frequency Hydrodynamic Damping Forces Acting on Offshore Moored Vessels”, OTC 4841, Huston.

2000년 4월 12일 원고 접수

2000년 11월 3일 수정본 채택