

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 31 卷第 4 號 1994 年 11 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 31, No. 4, November 1994

## 과랑중에서 전진동요하는 선박의 특이파수 억제에 관한 연구

이호영\*, 염덕준\*

### On the Removal of Irregular Frequencies in the Prediction of Ship Motion in Waves

by

H. Y. Lee\* and D. J. Yum\*

#### 요 약

선박 내항성능의 3차원적 해석을 위하여 3차원 판넬 방법을 이용한 쏘오스 분포법과 쏘오스-다이폴 분포법이 널리 이용되어 왔다. 그러나, 이 방법들을 이용하는 경우에는 내부 유동에 의한 자유표면의 공진현상에 의해 특이파수(irregular frequency)라고 불리는 파주파수에서 동유체력 계산에 큰 오차가 발생하게 되며 이런 현상을 제거하는 것은 정확한 내항성능 해석에 필수적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 전진동요하는 선박의 운동 해석을 위하여 Wu등이 유도한 전진하면서 동요하는 Green 함수를 이용하였다. Green함수의 계산을 위하여는 어댑티브(adaptive) 적분방법과 스트레칭(stretching) 변환 및 정류위상(stationary phase) 적분 방법을 사용하였으며 선체의 표면과 선체 내부 수선면에 특이점을 분포한 적분방정식을 도출하였다. 또한 2차원 문제를 다룬 Ohmatsu의 제안에 따라 내부 수선면에서 범선속도가 0이라는 조건을 이용하여 동요하는 문제의 불규칙파수 현상을 제거할 수 있었다. 계산은 Series 60( $C_B = 0.7$ )에 대하여 수행되었으며 부가질량 계수, 감쇠 계수 및 과랑 강제력에 대하여 기존의 연구 결과 및 실험 결과와 비교하였다.

#### Abstract

The source and source/dipole distribution methods using 3-dimensional panel method have been widely used for ship motion analysis. When these methods are used, large errors in the predicted hydrodynamic coefficients are introduced around the irregular frequencies caused by the resonance of imaginary internal flow.

Therefore, the irregular frequencies need to be removed for an accurate prediction of ship motion.

This paper adopts 3-dimensional translating and oscillating Green function derived by Wu. The adaptive integration method, stretching transform and stationary phase

---

발 표 : 1994년도 대한조선학회 춘계연구발표회('94. 4. 23)

접수일자 : 1994년 5월 16일. 재접수일자: 1994년 8월 22일

\* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

method are used for the calculation of Green function and the integral equation is derived by distributing the Green function on ship surface and inner free-surface. The condition of zero normal velocity, that is, wall condition on inner free-surface has been successfully used for the removal of irregular frequencies in oscillating problems. The calculations are carried out for series 60( $C_B = 0.7$ ) vessel and the results are compared with those of other theoretical analyses and experiment.

## 1. 서론

선박이 파랑중을 항주할때의 동유체력 계산은 Strip법, Unified 이론이 널리 이용되어 왔고, 요즘은 선박의 3차원 효과를 직접 고려한 쏘오스 분포법이 널리 사용되고 있다.

전진하면서 동요하는 그런 함수를 사용하여 주파수 영역에서 3차원 선박 운동 문제를 취급한 연구자들은 Chang [1], Inglis & Price [2], Chan [3], Ahn [4] 등이 있고 이와는 달리 시간영역 해석법으로 시간영역 그런 함수를 사용하여 쏘오스-다이폴 분포법을 이용한 연구자들은 Liapis [5], Gong [6] 등이 있다.

상기의 연구결과들은 전진속도가 없는 경우에 특이 파수가 일어나는 주파수근처에서 동유체력 계산에 심한 오차가 발생하는 것을 보여주고 있으며 단지 특이 파수가 존재하는 현상을 보여주었거나 회피하는 간접적인 방법을 사용하였고 전진하면서 동요하는 문제에 대한 내부유동의 영향에 대해서 언급하지 않았다.

특이파수에 대한 첫번째 언급은 John [7]이 했으며, Ohmatsu [8]는 쏘오스 분포법을 사용하여 2차원 동요 문제의 특이파수 현상을 제거하였고, Hong [9] 등은 쏘오스-다이폴 법을 이용한 동요하는 3차원 Green 함수를 사용하여 특이파수를 제거하는 방법의 연구를 수행하였다. 한편 다른 시도로 Ogilvie [10] 등은 2차원 쏘오스 분포법을 이용하여 내부면에 점쏘오스를 이용하여 특이파수를 제거하는 방법을 연구하였다.

본 연구에서는 선체 내부 경계를 포함한 적분방정식을 도출하여 내부유동의 영향이 어떤 주파수영역에서 작용하는가를 수치계산을 이용하여 확인하였다. 계산에 사용된 선박은 Series 60( $C_B = 0.7$ )이며 부가질량 계수, 감쇠계수, 파랑강제력을 계산하여 다른 이론 및 실험치와 비교하였다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 기본 이론

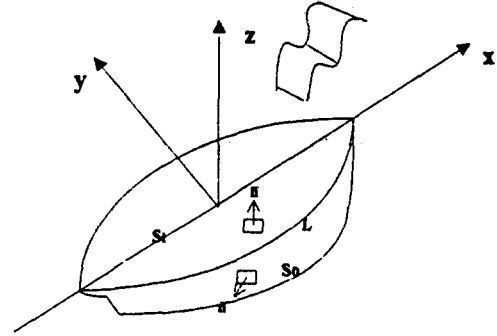


Fig.1 Coordinate system

유체는 비점성, 비압축성 유체이며 유체의 유동은 비회전적이라 가정하면 속도 포텐셜이 존재하며 선박 운동 진폭이 작고 파의 진폭이 파장에 비하여 작다는 가정하에 선형 이론이 도입된다. 아울러 표면 장력을 무시하고, 수심은 무한하다고 가정한다.

좌표계는 Fig. 1과 같이 선박에 고정된 좌표계이며, 선박 진행 방향이 x, 연직 상방향 z인 우수 좌표계를 사용한다. 선형이론의 도입에 따라서 속도 포텐셜  $\Phi$ 는 다음과 같이 정상부분과 비정상부분으로 나누어 질 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = U[-x + \bar{\phi}(x, y, z)] + \text{Re}[\phi(x, y, z)e^{-i\omega_0 t}] \quad (1)$$

(1)식의 첫번째 항에서 정상포텐셜  $\bar{\phi}$ 의 선박 운동에 미치는 영향은 기본유동에 비해 작다는 가정하에  $\bar{\phi}$ 가 고차항으로 무시될 수 있으며 비정상 포텐셜  $(x, y, z)$ 는 다음과 같이 분리될 수 있다.

$$\phi(x, y, z) = \left[ \xi_0(\phi_0 + \phi_7) + \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j \right] \quad (2)$$

$\phi_0$ 는 진폭  $\xi_0$ 인 입사파 포텐셜이고,  $\phi_7$ 은 산란 포텐셜.  $\phi_j$ 는 진폭이  $\xi_j$ 인 j번째 운동 모드의 강제 포텐셜이며  $\phi_j(j=1 \sim 7)$ 에 대한 경계치 문제는 아래와 같다.

$$\nabla^2 \phi_j = 0 \quad (3)$$

$$-\omega_e^2 \phi_j + 2i\omega_e U \phi_{jx} + U^2 \phi_{jxx} + g \phi_{jz} = 0 \quad \text{On } S_P \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega_e n_j + U m_j; j = 1, 2, \dots, 6 \quad \text{On } S_0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{On } S_0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad \text{On } S_i \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} \rightarrow 0 \quad \text{as } z \rightarrow -\infty \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3) &= \bar{\mathbf{n}}, (\mathbf{n}_4, \mathbf{n}_5, \mathbf{n}_6) = \bar{\mathbf{r}} \times \bar{\mathbf{n}} \\ (\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3) &= (0, 0, 0) \\ (\mathbf{m}_4, \mathbf{m}_5, \mathbf{m}_6) &= (0, \mathbf{n}_3 - \mathbf{n}_2) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

- $S_P$ : 외부영역에서 자유표면 경계
- $S_0$ : 물체표면 경계
- $S_i$ : 내부영역에서 자유표면 경계
- $\bar{\mathbf{n}}$  = 물체에서 유체영역으로 향하는 법선 벡터
- $\bar{\mathbf{r}}$  = 물체에 고정 좌표계에 대한 위치 벡터

위의 경계치 문제를 풀기 위하여 전진하면서 동요하는 3차원 그린 함수를 도입한다.

### 2.2 변경된 적분 방정식

2.1에서 언급된 경계치 문제를 풀기 위하여 전진하면서 동요하는 3차원 그린 함수를 도입할때 외부영역  $D_e$ 에 속도 포텐셜  $\phi$ 는 아래와 같다.

$$4\pi\phi'(P) = \int \int_{S_0} \left\{ \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n} G(P, Q) - \phi(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \right\} dS + \int \int_{S_P} \left\{ -\frac{\partial \phi(Q)}{\partial z} G(P, Q) + \phi(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial z} \right\} dS \quad (10)$$

(3)을 만족하는 내부영역  $D_i$ 의 속도 포텐셜을  $\phi'$ 이라 하고 외부영역  $D_e$ 에 놓인 점 P를 생각하면 다음을 얻는다.

$$0 = \int \int_{S_0} \left\{ \frac{\partial \phi'(Q)}{\partial n} G'(P, Q) - \phi' \frac{\partial G'(P, Q)}{\partial n} \right\} dS + \int \int_{S_i} \left\{ \frac{\partial \phi'}{\partial z} G'(P, Q) - \phi' \frac{\partial G'(P, Q)}{\partial z} \right\} dS \quad (11)$$

(10), (11)식에 G에 대한 자유표면 조건  $-\omega_e^2 G - i2\omega_e U G_x + U^2 G_{xx} + g G_z = 0$ 를 도입하고 식 (4)를 이용하여 부분적분을 수행하면 다음과 같다.

$$4\pi\phi(P) + \int \int_{S_0} \phi G_n dS - \frac{U^2}{g} \oint_L \phi G_x dy + i \frac{2\omega_e U}{g} \oint_L \phi G dy - \int \int_{S_0} G \phi_n dS + \frac{U^2}{g} \oint_L G \phi_x dy = 0 \quad (12)$$

$$0 = \int \int_{S_0} \phi' G_n dS + \frac{1}{g} \int \int_{S_i} \left\{ -\omega_e^2 \phi' + i2\omega_e U \phi'_x + U^2 \phi'_{xx} + g \phi'_z \right\} G dS - i \frac{2\omega_e U}{g} \oint_L G \phi' dy + \frac{U^2}{g} \oint_L \phi' G_x dy - \int \int_{S_0} G \phi'_n dS - \frac{U^2}{g} \oint_L G \phi'_x dy = 0 \quad (13)$$

(12)과 (13)의 마지막항에  $\phi_x = \bar{s}\phi_s + \bar{\tau}\phi_\tau + \bar{n}\phi_n$ 를 적용한다.  $\bar{n}, \bar{s}$ 는 수선에 법선성분과 접선성분의 단위벡터이고  $\bar{\tau} = \bar{s} \times \bar{n}$ 이다. L은 수선을 나타내며 (12)와 (13)의 수선 적분은 반대방향이다. (12)에서 (13)를 빼고,  $\phi = \phi', \sigma = \frac{\partial \phi}{\partial n} - \frac{\partial \phi'}{\partial n}$  조건을 이용하면 아래와 같다.

$$4\pi\phi(P) - \int \int_{S_0} \sigma G dS - \frac{1}{g} \int \int_{S_i} G \left( -\omega_e^2 \phi' + i2\omega_e U \phi'_x + U^2 \phi'_{xx} + g \phi'_z \right) dS - \frac{U^2}{g} \oint_L n_1 \sigma G dy = 0 \quad (14)$$

마찬가지로 내부영역  $D_i$ 의 점 P'를 (10)~(13)과 같은 과정으로 적용하면 아래와 같다.

$$4\pi\phi'(P') = \int \int_{S_0} \sigma G ds - \frac{1}{g} \int \int_{S_0} G \left( -\omega_e^2 \phi' + i2\omega_e U \phi'_x + U^2 \phi'_{xx} + g \phi'_z \right) ds - \frac{U^2}{g} \oint_L n_1 \sigma G dy = 0 \quad (15)$$

(14), (15)에서 P에서  $\phi(P)$ 에 대해 법선 벡터  $n$ 으로 미분하고 (15)에서 식 (7)을 적용하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \phi_n(P) = & \frac{1}{2} \sigma' P + \int_{S_0+S_1} \sigma' Q G_n(P, Q) dS \\ & + \frac{U^2}{g} \oint_L n_1 \sigma' Q G_n dy \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 0 = & -\sigma' P + \int_{S_0+S_1} \sigma' Q G_n(P, Q) dS \\ & + \frac{U^2}{g} \oint_L n_1 \sigma' Q G_n dy \end{aligned} \quad (17)$$

(16)는 선체 표면 외부에 적용하고 (17)은 선체 내부 수선면의 복소수방정식이다. 내부 수선면의 유동을 그대로 둔 기존의 적분방정식은 다음과 같다 [3].

$$\begin{aligned} \phi_n(P) = & \frac{1}{2} \sigma' P + \int_{S_0} \sigma' Q G_n(P, Q) dS \\ & + \frac{U^2}{g} \oint_L n_1 \sigma' Q G_n dy \end{aligned} \quad (18)$$

2.3 그린 함수의 수치 계산과 동유체력 계산

수치 계산을 위해 선체표면을 작은 요소로 분할하고 요소상에서 세기가 일정한 평면으로 가정하면 식 (16), (17)으로 부터 복소 대수방정식을 얻는다. 그린 함수는 Wu and Taylor [11]가 유도한 형태를 Hoff [12]가 무차원화 하였는데 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} G = & \frac{1}{R} - \frac{1}{R'} + I_{01} + I_{02} + I_{11} + I_{12} \\ & - I_{21} + I_{22} + I_{33} + I_{34} - I_{43} + I_{44} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} I_{01} = & \frac{K_0}{\pi} \int_0^\gamma \frac{K_{1c} \exp(K_{1c} \chi_1)}{i \sqrt{4\tau \cos \theta - 1}} E_p(K_{1c} \chi_1) d\theta \\ & - \frac{K_0}{\pi} \int_0^\gamma \frac{K_{2c} \exp(K_{2c} \chi_1)}{i \sqrt{4\tau \cos \theta - 1}} E_q(K_{2c} \chi_1) d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{02} = & \frac{K_0}{\pi} \int_0^\gamma \frac{K_{1c} \exp(K_{1c} \chi_2)}{i \sqrt{4\tau \cos \theta - 1}} E_p(K_{1c} \chi_2) d\theta \\ & - \frac{K_0}{\pi} \int_0^\gamma \frac{K_{2c} \exp(K_{2c} \chi_2)}{i \sqrt{4\tau \cos \theta - 1}} E_q(K_{2c} \chi_2) d\theta \end{aligned}$$

$$I_{jk} = \frac{K_0}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{K_j \exp(K_j \chi_k)}{i \sqrt{1 - 4\tau \cos \theta}} E_{rj}(K_j \chi_k) d\theta$$

$$\begin{aligned} E_p(z) = & \begin{cases} E_1(z) & \text{if } \operatorname{Re}(z) \geq 0 \text{ or } \operatorname{Im}(z) \geq 0 \\ E_1(z) - 2\pi i & \text{if } \operatorname{Re}(z) < 0 \text{ and } \operatorname{Im}(z) < 0 \end{cases} \\ E_q(z) = & \begin{cases} E_1(z) & \text{if } \operatorname{Re}(z) \geq 0 \text{ or } \operatorname{Im}(z) < 0 \\ E_1(z) + 2\pi i & \text{if } \operatorname{Re}(z) < 0 \text{ and } \operatorname{Im}(z) \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

for  $j = 1, 3, 4$

$$E_{rj}(z) = \begin{cases} E_1(z) & \text{if } \operatorname{Im}(z) \geq 0 \\ E_1(z) - 2\pi i & \text{if } \operatorname{Im}(z) < 0 \end{cases}$$

for  $j = 2$

$$E_{rj}(z) = \begin{cases} E_1(z) + 2\pi i & \text{if } \operatorname{Im}(z) \geq 0 \\ E_1(z) & \text{if } \operatorname{Im}(z) < 0 \end{cases}$$

for  $j = 1, 2$

$$\theta_1 = \gamma, \theta_2 = \pi/2$$

for  $j = 3, 4$

$$\theta_1 = \pi/2, \theta_2 = \pi$$

$$K_{i,c} = \left[ \frac{1 \mp i \sqrt{4\tau \cos \theta - 1}}{2 \cos \theta} \right]^2, \quad i = 1, 2$$

$$K_i = \left[ \frac{1 - i \sqrt{1 - 4\tau \cos \theta}}{2 \cos \theta} \right]^2, \quad i = 1, 3$$

$$K_i = \left[ \frac{1 + i \sqrt{1 - 4\tau \cos \theta}}{2 \cos \theta} \right]^2, \quad i = 2, 4$$

$$\begin{aligned} x_i = & (z + \zeta) + i \{ -(x - \xi) \cos \theta \\ & + (y - \eta) \sin \theta \}, \quad i = 1, 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_i = & (z + \zeta) + i \{ -(x - \xi) \cos \theta \\ & - (y - \eta) \sin \theta \}, \quad i = 2, 4 \end{aligned}$$

$$\tau = \frac{U \omega_e}{g}, \quad K_0 = \frac{g}{U^2}$$

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{for } \tau < 0.25 \\ \cos^{-1} 1/4\tau & \text{for } \tau \geq 0.25 \end{cases}$$

(19)와  $x, y, z$ 에 대한 미분에 대한 계산은 Hoff [12]에 자세히 수록되어 있다. (19)의 계산에 주의할 것은  $E_1(z)$ 의 계산에 유의해야 한다.  $z$ 의 실수부가 음의 값을 갖고 허수부가 0으로 접근하면 적분인자의 진동이 심하게 된다. exponential 함수의 적분방법은 부록에 자세히 실려 있다.

$\tau > 0.25$ 인 경우  $\theta = \gamma$ 에서 singular한 것을 배제하기 위해  $I_0$ 는  $u = \sqrt{4\tau \cos \theta - 1}$ 로 변환하고,  $I_1, I_2$ 는  $u = \sqrt{1 - 4\tau \cos \theta}$ 로 변환하였다.  $\theta \rightarrow \pi/2$ 로 갈때  $K_2, K_4$  값이  $\infty$ 로 접근하기 때문에  $I_2, I_4$ 의 적분인자는 점근전개를 사용하여 adaptive 기법을 사용하여 적분하였다.

$\tau > 0.25$ 이고 쏘오스점과 관측점의 거리가 먼 경우  $I_1, I_2, I_3, I_4$  적분은 점근전개를 사용하여 첫째항을 취한 후 stationary phase 접근 방식을 사용하였다.  $K\chi_j$ 의 미분이 0이 되는 근을 찾기 위하여 false-position 방법을 이용하였고  $\psi = \tan^{-1}\left(\frac{y-\xi}{x-\xi}\right) \geq \left(\tan^{-1}\left(\frac{1}{2\tau}\right) + 1^\circ\right)$ 인 경우에 적용하였다. Stationary phase 접근을 제외한 모든 수치 적분은 64-point Gauss quadrature [13]를 이용하여 적분하였다. (16), (17), (18)의 선적분항은 수선면과 판넬이 교차한 선에 6-point Gauss quadrature를 사용하였다.

동유체력 계산은 베르누이 방정식을 이용하여 1차항을 구하면 강제동요에 관련된 힘과 과강제력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_j^W = -\rho \int \int_{S_0} (i\omega_e n_j + U m_j)(\phi_0 + \phi_7) dS e^{-i\omega_e t} \quad (20)$$

$$A_{jk} = -\frac{\rho}{\omega_e^2} \operatorname{Re} \int \int_{S_0} (i\omega_e n_j + U m_j) \phi_k dS \quad (21)$$

$$B_{jk} = -\frac{\rho}{\omega_e} \operatorname{Im} \int \int_{S_0} (i\omega_e n_j + U m_j) \phi_k dS \quad (22)$$

### 3. 계산 결과 및 고찰

본 논문에서 대상 선박은 Series 60( $C_B = 0.7$ )에 대하여 유기속도는 Hess & Smith [14] 방법으로 구하고 포텐셜에 대한 면적분은 Newman [15]이 제시한 식으로 구하였다. Harmonic한 그린함수의 면적분은  $2 \times 2$  Gauss 수치적분을 이용하였다. 요소의 분할은 특이파수를 막기 위해 선체표면은 246개, 내부수면 36개의 판넬을 분포하고 기존의 계산은 선체표면에만 246개의 판넬을 분포하였다.

Fig. 2는 선체와 내부수면에 판넬을 분포한 형태를 보여주고 있다.

동유체력의 비교를 위한 부가질량계수, 감쇠계수, 파랑강제력의 무차원화는 다음과 같다.

$$A'_{jk} = \begin{cases} A_{jk}/\rho V & \dots j,k=1,2,3 \\ A_{jk}/\rho VL & \dots j=1,2,3 \quad k=4,5,6 \\ & \dots k=1,2,3 \quad j=4,5,6 \\ A_{jk}/\rho VL^2 & \dots j,k=4,5,6 \end{cases} \quad (23)$$

$$B'_{jk} = \begin{cases} B_{jk}/\rho V \sqrt{(g/L)} & \dots j,k=1,2,3 \\ B_{jk}/\rho VL \sqrt{(g/L)} & \dots j=1,2,3 \quad k=4,5,6 \\ & \dots k=1,2,3 \quad j=4,5,6 \\ B_{jk}/\rho VL^2 \sqrt{(g/L)} & \dots j,k=4,5,6 \end{cases} \quad (24)$$

$$|F'_j| = \begin{cases} |F_j|L/\rho g \xi_0 V & \dots j=1,2,3 \\ |F_j|/\rho g \xi_0 V & \dots j=4,5,6 \end{cases} \quad (25)$$

$$\omega' = \omega_e \sqrt{L/g} \quad (26)$$

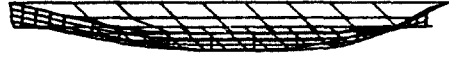


Fig.2 Panel arrangement of series 60 ( $C_B=0.7$ )

Table 1 Calculated Green function and its x-derivative along the line  $y = 0.0$  on the free surface.  $K_0 = 3.0, \tau = 0.5, \text{ Source point } (0, 0, -1)$

x	Re(G/4 $\pi$ )		Im(G/4 $\pi$ )		Re(Gx/4 $\pi$ )		Im(Gx/4 $\pi$ )	
	Hoff's	Present	Hoff's	Present	Hoff's	Present	Hoff's	Present
-10	0.00143	0.001427	0.04166	0.041662	-0.02127	0.021268	0.00310	0.003102
-9	-0.01528	-0.015278	0.04072	0.040724	-0.02090	0.020903	-0.00081	-0.000807
-8	-0.03167	-0.031668	0.03242	0.032417	-0.01620	-0.016195	-0.00622	-0.006220
-7	-0.04522	-0.045221	0.01711	0.017108	-0.00818	-0.008180	-0.01314	-0.013137
-6	-0.05337	-0.053366	-0.00394	-0.003942	0.00148	0.001476	-0.02086	-0.020857
-5	-0.05370	-0.053699	-0.02892	-0.028920	0.01115	0.011153	-0.02815	-0.028153
-4	-0.04415	-0.044150	-0.05616	-0.056156	0.01988	0.019879	-0.03414	-0.034136
-3	-0.02348	-0.023481	-0.08577	-0.085767	0.02645	0.026450	-0.04035	-0.040352
-2	0.00406	0.004059	-0.12217	-0.122173	0.02049	0.020487	-0.04925	-0.049253
-1	0.01425	0.014252	-0.15790	-0.157897	-0.01755	-0.017551	-0.02001	-0.020014
0	-0.00214	-0.002140	-0.10894	-0.108938	-0.02692	-0.026922	0.11566	0.115657
1	-0.01504	-0.015042	-0.02518	-0.025175	0.00378	0.003781	0.04314	0.043142
2	-0.00806	-0.008063	-0.00358	-0.003582	0.00667	0.006671	0.00838	0.008379
3	-0.00332	-0.003318	0.00027	0.000265	0.00305	0.003048	0.00122	0.001216
4	-0.00132	-0.001325	0.00066	0.000664	0.00121	0.001205	-0.00005	-0.000046
5	-0.00054	-0.000542	0.00052	0.000517	0.00048	0.000476	-0.00018	-0.000183

그린함수와 그린함수의 x방향의 미분치는 Table 1에 수록하였는데 Hoff 계산과 잘 일치하고 있다.

Fig. 3, Fig. 4는  $\tau=0.24, 0.26$ 인 경우  $x, y$ 가 변함에 따라 그린함수의 실수부분을 보여 주는데 파형이  $\tau=0.25$ 을 기점으로 서로 다른 것을 알 수 있으며 Hoff의 계산과 잘 일치한다 [3].

Fig.5~8은 푸루드수가 0.0인 경우에 부가질량계수와 감쇠계수를 Gerritsma의 실험, Inglis 계산과 비교하고 있는데 대체로 잘 일치하고 있어 이는 본계산이 유효함을 알 수 있다. Fig.5, 6은  $A_{33}, B_{33}$ 에 대한 결과인데 Inglis계산에서 특이파수 현상이 일어나는 것을 본 계산 방법으로 특이파수 현상을 억제한 것을 볼수 있는데 실험치와도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

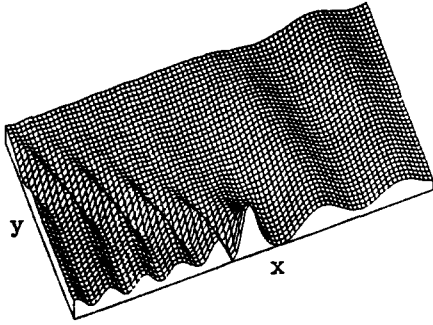


Fig.3 Real part of the potential calculated inside a box of dimensions  $60 \times 30\text{m}$  with the source placed  $30\text{m}$  behind the forward edge at a depth of  $1\text{m}$  ( $\kappa_0=3, \tau=0.24$ )

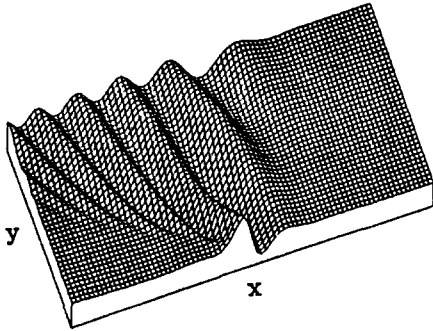


Fig.4 Real part of the potential calculated inside a box of dimensions  $60 \times 30\text{m}$  with the source placed  $30\text{m}$  behind the forward edge at a depth of  $1\text{m}$  ( $\kappa_0=3, \tau=0.26$ )

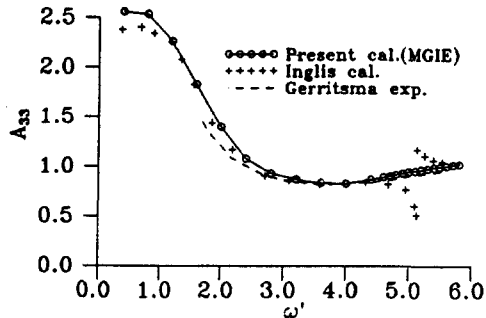


Fig.5 Heave added mass coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $F_n=0.0$

Fig.7, 8은  $A_{55}'$ ,  $B_{55}'$  에 대한 결과인데 전반적으로 다른방법과 잘 일치하고 있음을 알 수 있고 특이파수가 일어나는 부근은 특이파수 현상을 억제한 본 방법이 실험치와 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig.9~14은 푸루드수가 0.2인 경우에 부가질량계수와 감쇠계수에 대한 결과인데 특이파수를 억제한 방법(MGIE)와 기존의 방법에 의한 계산과의 비교에서 두계산 방법에 의한 결과 차이가 없는 것을 확인하였

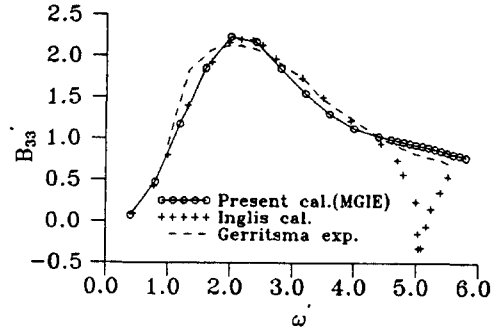


Fig.6 Heave damping coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $F_n=0.0$

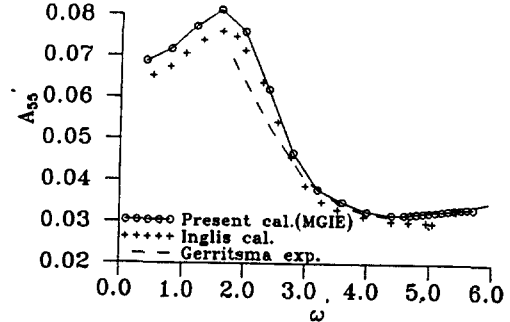


Fig.7 Pitch added mass coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $F_n=0.0$

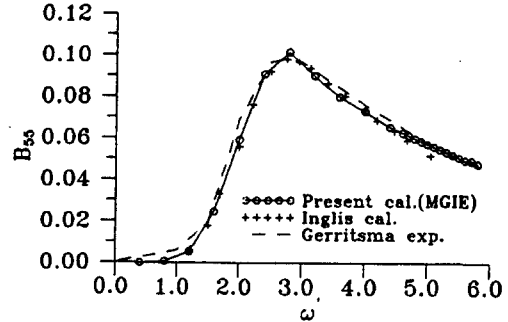


Fig.8 Pitch damping coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $F_n=0.0$

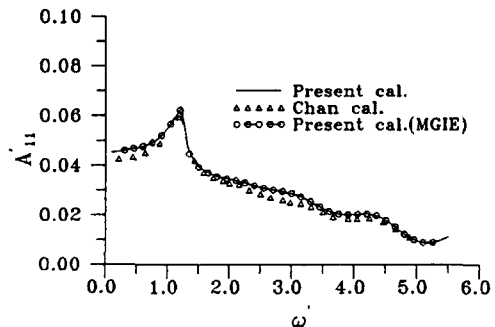


Fig.9 Surge added mass coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $F_n=0.2$

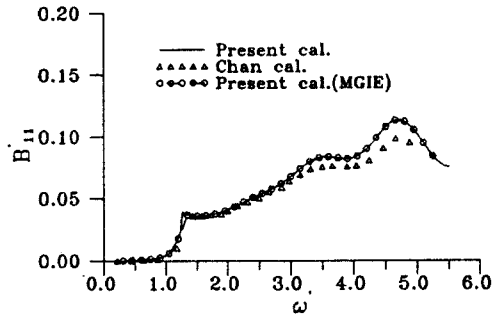


Fig.10 Surge damping coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.2$

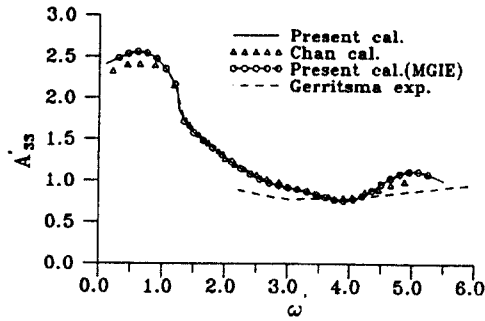


Fig.11 Heave added mass coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.2$

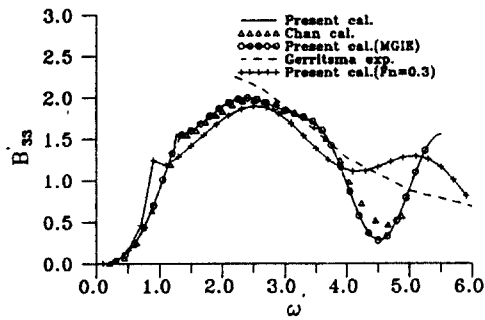


Fig.12 Heave damping coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.2$

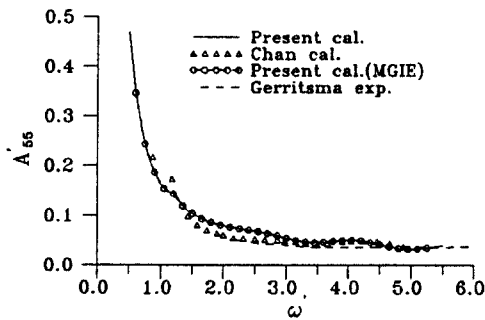


Fig.13 Pitch added mass coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.2$

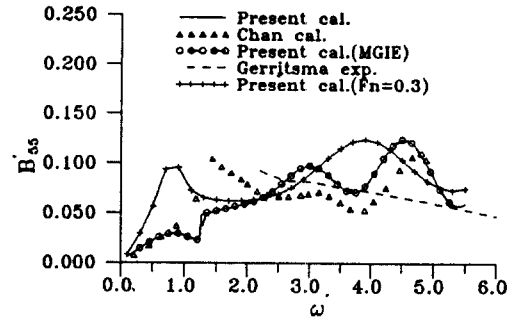


Fig.14 Pitch damping coefficient for a series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.2$

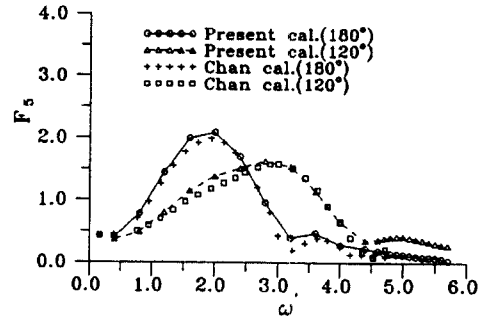


Fig.15 Pitch wave exciting moments on series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.0$

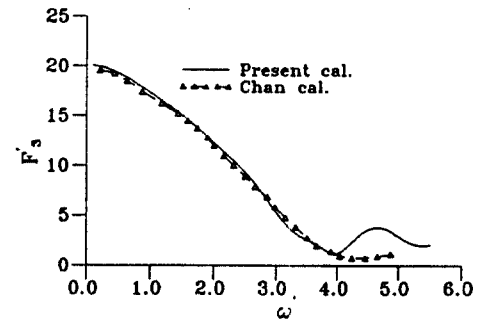


Fig.16 Heave wave exciting force on series 60 ( $C_B=0.7$ ) model at  $Fn=0.2$

다. 본 계산의 결과는 계산방법이 아주 유사한 Chan 과 비교하였고 heave와 pitch 동유체력 계수는 추가 적으로 Gerritsma 실험치와 비교하였다. 대부분 동유 체력 계수는 잘 일치되고 있으나 heave감쇠 계수는 비 교적 높은 주파수에서 실험치와 일치하지 않고 있고 pitch 계수는 저주파수 영역에서는 Chan의 계산과 맞 지는 않으나 별도의 비교에서 Inglis, Chang, Wu & Talyor의 계산과는 일치함을 확인하였으며, 높은 주파 수 지역에서는 실험치와 맞지않고 있다. 선체 표면 판 널수를 2배이상 증가시켜 수행한 매우 제한된 계산 결 과에 의하면  $B_{33}'$ 와  $B_{55}'$ 가 고주파수 영역에서 실험치

와 맞지않는 것은 판넬수의 부족 이라기 보다는 고주파수에서 그린함수의 계산에 원인이 있는 것으로 생각된다.

Fig.15은 푸루드수 0.0인 경우에 종동요에 대한 파 강제 모멘트를 파각도 180°와 120°인 경우의 계산을 Chan의 계산과 비교하고 있는데 비교적 잘 일치하고 있다. Fig.16은 푸루드수 0.2인 경우 파각 180°인 경우에 heave 파 강제력을 Chan의 계산과 비교하였는데 고주파수 영역을 제외하고 잘 일치된다.

#### 4. 결론

본 논문은 쏘오스 분포법을 사용하여 전진속도를 고려하여 선박의 특이파수를 억제하는 적분방정식을 도출하였다.

- 1) 쏘오스 분포법을 사용하는 경우 전진속도가 없는 경우에 효과적으로 특이파수 현상을 억제하여 실험치와 일치된 결과를 도출하였다.
- 2) 전진동요하는 선박에 대해 내부유동을 억제한 적분방정식을 이용하여 계산을 시도한 결과 전진속도가 있는 경우에는 내부영역의 해가 물체표면의 해에 전혀 영향을 주지 못했다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Chang, M.S., "Computations of Three-Dimensional Ship Motions with Forward Speed", *Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, 1977
- [2] Inglis, R.B. and Price, W.G., "A Three Dimensional Ship Motion Theory Comparison between Theoretical Predictions and Experimental Data of the Hydrodynamic Coefficients with Forward Speed", *Trans. RINA*, Vol. 124, 1982
- [3] Chan, H.S., "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*, 1990
- [4] Ann S.P., Kim J.K., Rhee K.P., Hwang J. H., "Ship Motion Analysis by a 3-D Panel Method", *The 2nd Japen-Korea Joint Workshop*, 1993
- [5] Liapis, S. and Beck, R.F., "Seakeeping Computations using Time-Domain Analysis", *Proceedings of 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, 1985
- [6] 공인영, "3차원 물체에 작용하는 동유체력의 시간 영역 해석", 박사학위 논문, 서울대학교, 1987
- [7] John, F., "On the Motion of Floating Bodies. II. Simple Harmonic Motion", *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 3, 1950
- [8] Ohmatsu, S., "On the Irregular Frequencies in the Theory of Oscillating Bodies", *Papers of Ship Research Institute*, No. 48, 1975
- [9] Hong, D.C., "On the Improved Green Integral Equation Applied to the Water - Wave Radiation - Diffraction Problem", *Journal of SNAK*, Vol. 24, 1987
- [10] Ogilvie, T.F. and Shin, Y.S., "Integral Equation Solutions for Time-Dependent Free Surface Problem", *Journal of SNAJ*, Vol. 143, 1978
- [11] Wu, G.X. and Eatock-Taylor, R., "A Green's Function Form for Ship Motions at Forward Speed", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 34, 1987
- [12] Hoff, J.L., "Three-Dimensional Green Function of a Vessel with Forward Speed in Waves", Ph. D. Thesis, *The Norwegian Institute of Technology*, 1990
- [13] Abramowitz, M. and Stegun, I.A., "Handbook of Mathematical Function", New York, 1972
- [14] Hess, J.L. and Smith, A.M.O., "Calculation of Nonlifting Potential Flow About Arbitrary Three-dimensional Bodies", Douglas Aircraft Company Report No. Es 40622. Also see *Journal of Ship Research*, Vol. 8, No. 2, 1964
- [15] Newman, J.N., "Distribution of Sources and Normal Dipole over Quadrilateral Panel", *Journal of Eng. Math.*, Vol. 20, 1986.



부 록

Exponential 적분은 argument에 따라 다음과 같은 방법으로 계산했다.

$$z = x + iy$$

1)  $|z| \ll 1$

$$E_1(z) = -r - \ln z - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-z)^n}{nn!}, \quad (\text{larg } z < \pi)$$

2)  $z \rightarrow -|x|+i0$  아닌 경우

$$E_1(z) = e^{-z} \left( \frac{1}{z+} \frac{1}{1+z+} \frac{1}{1+z+} \frac{2}{1+z+} \frac{2}{1+z+} \frac{3}{1+z+} \frac{3}{1+z+} \dots \right), \quad (\text{larg } z < \pi)$$

3)  $z \rightarrow -|x|+i0$  이면

$$e^2 E_1(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(iy)^n}{n!} \left[ -Ei(|x|) - i\pi + \sum_{m=q}^n \frac{(m-1)!}{(-x)^m} \right]$$

4)  $|z| \gg 1$  and  $z \rightarrow -|x|+i0$

$$e^2 E_1(z) \sim \left\{ \frac{1}{z} - \frac{1!}{z^2} + \frac{2!}{z^3} - \frac{3!}{z^4} + \dots \right\}$$

5)  $|z| \gg 1$

$$e^2 E_1(z) \sim \frac{0.711093}{z+0.415775} + \frac{0.278518}{z+2.29428} + \frac{0.010389}{z+6.2900}$$

위의 방법을 이용하고 3,4 분면의  $Z$ 에 대한  $E_1(\bar{z})$ 는 1,2 사분면에서 구하여 다음 관계를 이용하였다.

$$E_1(\bar{z}) = \overline{E_1(z)}$$