

# 규칙파에 대한 조종운동의 응답함수에 관한 고찰

손 경 호\* · 이 경 우\* · 김 진 형\*\*

## A Study on Response Functions of Manoeuvring Motion of a Ship in Regular Waves

*Kyoung-Ho Sohn\* · Gyoung-Woo Lee\* · Jin-Hyoung Kim\*\**

### 〈 목 차 〉

- |                 |           |
|-----------------|-----------|
| 1. 서 언          | 3.1 공시 선형 |
| 2. 운동방정식        | 3.2 계산 결과 |
| 2.1 좌표계         | 4. 결 언    |
| 2.2 내향성 운동방정식   | 참고문헌      |
| 2.3 조종성 운동방정식   |           |
| 3. 응답함수의 수치계산 예 |           |

### Abstract

Final aim of this paper is a study on simulation of automatic steering of a ship in random seas. In order to achieve this aim, we need excitation due to random seas. The excitation may be estimated from energy spectrum of irregular waves and response functions of manoeuvring motion of a ship in regular waves. This paper deals with response functions of manoeuvring motion of a ship in regular waves.

We discussed New Strip Method(NSM) of sway-yaw-roll coupled motions in regular waves. NSM is defined in space axes system and that has been used to predict seakeeping performance of a ship in waves. But ship manoeuvring is defined in body fixed axes system. So we cannot use NSM theory itself in predicting manoeuvring performance of a ship in waves. We introduced relationship between space axes system and body fixed axes system. And we developed modified NSM which was defined in body fixed axes system and was able to be used in manoeuvring motion of a ship in waves. We calculated sway and yaw response functions of manoeuvring motion of a bulk carrier in regular waves.

\* 정희원, 한국해양대학교 조선공학과

\*\* 한국해양대학교 대학원

## 1. 서 언

불규칙 파랑중에서 조타(操舵)하면서 항행하는 선박의 조종운동을 해석하기 위해서는, 파랑에 기인하는 외란의 스펙트럼을 구할 필요가 있다. 외란의 스펙트럼을 구하기 위해서는 먼저 규칙파에 대한 조종운동의 응답함수를 필요로 한다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 조종운동의 응답함수의 계산법에 관해서 논하고자 한다.

파랑중에서 항행하는 선박의 운동성능을 추정하기 위한 내항성 이론 중 가장 널리 쓰이고 있으며, 유효한 방법으로서 스트립 법(strip method)이 정착되어 있다. 스트립 법은 Korvin-Kroukovsky & Jacobs[1], Watanabe[2] 등에 의해 처음으로 발표되었다. 이들에 의해 개발된 스트립 법은 체계적인 이론에 의해서 유도되었다기 보다는 물리적 직관에 의해 도출되었으며, 이를 Ordinary Strip Method(영문 약칭 OSM)라고 한다. 이 OSM의 이론적 미비점을 일부 개선하여, 보다 체계적인 방법으로 유도된 것을 New Strip Method(영문 약칭 NSM)라고 하며, Tasai & Takaki[3], Salvesen, Tuck & Faltinsen[4] 등에 의해 처음으로 발표되었다.

한편, 상기 스트립 법은 등속 이동 공간좌표계를 기초로 하여 운동방정식이 정의되었는데, 조종성 분야에서는 선체 고정좌표계를 기초로 하여 운동을 기술하고 있다. 파랑중에서의 선박의 횡운동(반대칭계 운동이라고도 함) 즉, sway-yaw-roll의 복합 운동을 해석함에 있어서 내항성, 조종성 각각의 분야의 입장에서 연구가 수행되어 왔다.

Fujino[5]는 sway-yaw 운동을 기술하기 위한 상기 양 좌표계에 관해서 고찰한 결과, 선체 자신의 운동에 의해 선체에 발생하는 유체력을 보다 합리적으로 이해하기 위해서는 선체 고정좌표계가 적절하다고 결론짓고 있다. 또한 Fujino[6]는 내항성 분야의 OSM의 이론 전개 방법을 답습하여 선체 고정좌표계를 사용한 sway-yaw-roll 운동방정식을 유도하였다. 또한 Hamamoto[7]는 파랑중 조종운동을 해석하기 위해서 상기 양 좌표계를 결합한 horizontal body axes system에 관해서 논

하였다.

본 연구에서는 등속 이동 공간좌표계를 기초로 한 NSM의 sway-yaw-roll 운동방정식(내항성 운동방정식)을 개략적으로 검토하고, 등속 이동 공간좌표계와 선체 고정좌표계 사이에 성립하는 관계식을 도출하여 내항성 운동방정식을 조종성 운동방정식으로 변환하였다. 그리고 조종성 운동방정식에서 정의하는 sway, yaw의 응답함수를 수치계산하였다. 이에 앞서서 본 연구에서의 NSM의 수치계산법의 타당성을 확인하기 위해서, Takaki와 Tasai[8]가 택한 광석운반선 선형에 대해서 내항성 운동방정식에서 정의하는 sway, yaw, roll의 응답함수를 수치계산하여 Takaki와 Tasai[8]의 계산 결과와 비교하였다.

이상의 연구 결과로부터 파랑중 조종운동 방정식이 규명되었으며, 규칙파에 대한 조종운동의 응답함수를 구할 수 있었다.

## 2. 운동방정식

### 2.1 좌표계

Fig. 1에 내항성 및 조종성 분야에서 이용되는 좌표계를 동시에 표시한다. 먼저 공간 고정좌표계  $\bar{O} - X_1 Y_1 Z_1$ 를 정의하고 2차원 규칙파는  $\bar{O}X_1$ 축 방향으로 전파해 가는 것으로 상정한다. 선박의 평균 진행 방향은  $X_1$ 축과  $\chi$ 의 각도를 이루는  $\bar{O}X$ 축 방향이며, 새로운 공간 고정좌표계  $\bar{O} - XYZ$ 를 설정한다. 그리고  $\bar{O}X$ 축 방향에는 선박의 평균 속도  $V$ 로써 진행하는 등속 이동 공간좌표계  $O_0 - x_0 y_0 z_0$ 를 생각하고,  $O_0$ 는 정지수선면과 일치시킨다. 그리고 선체에 고정된 좌표계  $O - xyz$ 를 취하고,  $O$ 는 선체가 운동하고 있지 아닐 때의  $O_0$ 와 일치시킨다. 선체의 무게중심  $G$ 는 Fig. 1에서와 같이 수선면 아래에 있는 것으로 생각한다.

내항성 이론에서 선체 운동을 정의하면, 선박은 평균 속도  $V$ 를 유지하면서 평균 위치  $O_0$ 의 주위에서 무게 중심  $G$ 가 미소 진폭의 동요 ( $x_G$ ,

$y_G, \phi, \psi$ 를 하고 있는 것으로 간주한다. 한편, 조종성 이론에서는 무게 중심  $G$ 가 미소 운동 ( $u, v, \phi, \psi$ )을 하고 있는 것으로 간주한다. 따라서 양 이론에서 sway의 정의가 서로 다르다는 것을 알 수 있다.

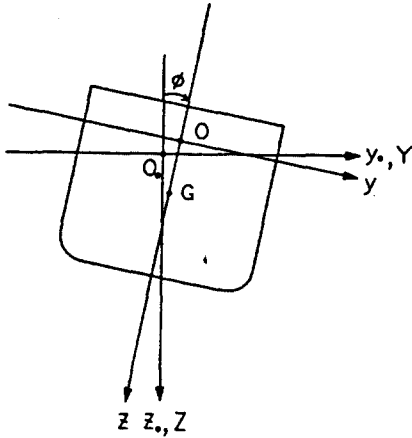
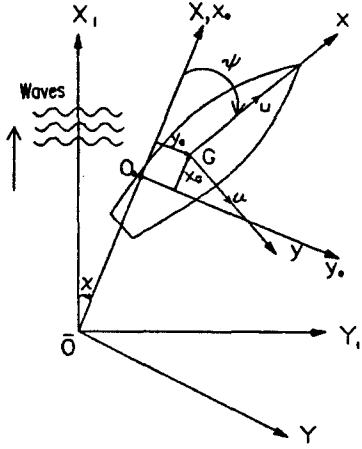


Fig. 1 Coordinate systemt

## 2.2 내항성 운동방정식

점성 유체력을 무시하고 이상유체 이론에 의한 조파 감쇠력을 고려한 파랑중에서의 sway-yaw-

roll의 선형 운동방정식은, 등속 이동 공간좌표계에서 다음과 같이 표시된다[8].

$$\begin{aligned}
 & (m + A_{22}) \ddot{y}_G + B_{22} \dot{y}_G + A_{24} \ddot{\phi} \\
 & + B_{24} \dot{\phi} + A_{26} \ddot{\psi} + B_{26} \dot{\psi} = F_y(t) \\
 & (I_z + A_{66}) \ddot{\psi} + B_{66} \dot{\psi} + A_{64} \ddot{\phi} \\
 & + B_{64} \dot{\phi} + A_{62} \ddot{y}_G + B_{62} \dot{y}_G = M_\psi(t) \\
 & (I_x + A_{44}) \ddot{\phi} + B_{44} \dot{\phi} + C_{44} \phi + A_{42} \ddot{y}_G \\
 & + B_{42} \dot{y}_G + A_{46} \ddot{\psi} + B_{46} \dot{\psi} = M_\phi(t)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

여기서  $m$ 은 선체 질량,  $I_x, I_z$ 는 각각  $x, z$ 축에 관한 관성 모멘트이다. 그리고 유체력 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= \int_L M_S dx \\
 B_{22} &= \int_L N_S dx \\
 A_{24} &= \int_L M_S (\overline{OG} - l_{SR}) dx \\
 B_{24} &= \int_L N_S (\overline{OG} - l_N) dx \\
 A_{26} &= \int_L M_S \cdot x dx + \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_S dx \\
 B_{26} &= \int_L N_S \cdot x dx - V \int_L M_S dx \\
 A_{44} &= \int_L (I_R - 2M_S \overline{OG} l_{SR} + M_S \overline{OG}^2) dx \\
 B_{44} &= \int_L N_S (\overline{OG} - l_N)^2 dx \\
 C_{44} &= W \cdot \overline{GM} \\
 A_{42} &= \int_L M_S (\overline{OG} - l_{SR}) dx \\
 B_{42} &= \int_L N_S (\overline{OG} - l_N) dx
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{46} &= \int_L M_S(\overline{OG} - l_{SR}) x \, dx \\
 &\quad + \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_S(\overline{OG} - l_N) \, dx \\
 B_{46} &= \int_L N_S(\overline{OG} - l_N) x \, dx \\
 &\quad - V \int_L M_S(\overline{OG} - l_{SR}) \, dx \\
 A_{66} &= \int_L M_S \cdot x^2 \, dx \\
 &\quad + \frac{V^2}{\omega_e^2} \int_L M_S \, dx \\
 B_{66} &= \int_L N_S \cdot x^2 \, dx \\
 &\quad + \frac{V^2}{\omega_e^2} \int_L N_S \, dx \\
 A_{64} &= \int_L M_S(\overline{OG} - l_{SR}) x \, dx \\
 &\quad - \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_S(\overline{OG} - l_N) \, dx \\
 B_{64} &= \int_L N_S(\overline{OG} - l_N) x \, dx \\
 &\quad + V \int_L M_S(\overline{OG} - l_{SR}) \, dx \\
 A_{62} &= \int_L M_S \cdot x \, dx - \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_S \, dx \\
 B_{62} &= \int_L N_S \cdot x \, dx + V \int_L M_S \, dx
 \end{aligned}$$

그리고 선체 각 단면에서의 2차원 radiation 유체력 — 부가질량( $M_S$ ), 감쇠력 계수( $N_S$ ), 횡동요 부가관성 모우멘트( $I_R$ ) 및 sway-roll의 간섭항을 나타내는 모우멘트 레버( $l_{SR}$ ,  $l_N$ ) — 은, 속도 퍼텐셜의 급수해를 이용하는 Ursell-Tasai 방법(9)에 의해서 구한다. 또한 파랑 강제력은 복소수를 이용하여 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned}
 F_y(t) &= (F_{yc} + iF_{ys}) e^{i\omega_e t} \\
 M_\phi(t) &= (M_{\phi c} + iM_{\phi s}) e^{i\omega_e t} \\
 M_\psi(t) &= (M_{\psi c} + iM_{\psi s}) e^{i\omega_e t}
 \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} F_{yc} \\ F_{ys} \end{aligned} \right\} &= 2\rho g \zeta_a \int_L \left\{ \begin{aligned} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{aligned} \right\} \\
 &\times \int_0^d e^{-kz} \sin(ky \sin \chi) \, dz \cdot dx \\
 &+ \zeta_a \omega \sin \chi \left[ \int_L N_S \cdot e^{-k\frac{d}{2}} \left\{ \begin{aligned} \cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{aligned} \right\} dx \right. \\
 &\left. + \omega_e \int_L M_S \cdot e^{-k\frac{d}{2}} \left\{ \begin{aligned} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{aligned} \right\} dx \right] \\
 \left. \begin{aligned} M_{\phi c} \\ M_{\phi s} \end{aligned} \right\} &= 2\rho g \zeta_a \int_L \left\{ \begin{aligned} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{aligned} \right\} \\
 &\times \left[ \int_0^d e^{-kz} \sin(ky \sin \chi) (\overline{OG} - z) \, dz \right. \\
 &\left. + \int_0^{B/2} e^{-kz} \sin(ky \sin \chi) y \, dy \right] dx \\
 &+ \zeta_a \omega \sin \chi \left[ \int_L N_S(\overline{OG} - l_N) e^{-k\frac{d}{2}} \right. \\
 &\times \left\{ \begin{aligned} \cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{aligned} \right\} dx \\
 &\left. + \omega_e \int_L M_S(\overline{OG} - l_{SR}) e^{-k\frac{d}{2}} \left\{ \begin{aligned} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{aligned} \right\} dx \right] \\
 \left. \begin{aligned} M_{\psi c} \\ M_{\psi s} \end{aligned} \right\} &= 2\rho g \zeta_a \int_L x \left\{ \begin{aligned} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{aligned} \right\} \\
 &\times \int_0^d e^{-kz} \sin(ky \sin \chi) \, dz \cdot dx \\
 &+ \zeta_a \omega \sin \chi \left[ \int_L x \cdot N_S \cdot e^{-k\frac{d}{2}} \left\{ \begin{aligned} \cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{aligned} \right\} dx \right. \\
 &\left. + \omega_e \int_L x \cdot M_S \cdot e^{-k\frac{d}{2}} \left\{ \begin{aligned} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{aligned} \right\} dx \right]
 \end{aligned}$$

$$+ V \int_L M_S \cdot e^{-k \frac{d}{2}} \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{Bmatrix} dx$$

$$- \frac{V}{\omega_e} \int_L N_S \cdot e^{-k \frac{d}{2}} \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{Bmatrix} dx$$

여기서  $k^* = k \cos \chi$ ,  $\zeta_a$  : 파진폭,  $k$  : 파수  
 ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  : 파장),  
 $\omega$  : 파의 고유주파수,  $\omega_e$  : 파와 선체의  
 만남주파수 ( $\omega_e = \omega - kV \cos \chi$ ),  
 $\rho$  : 유체의 밀도,  $g$  : 중력가속도,  
 $V$  : 선속

한편, 입사파의 파형  $\zeta_w$ 는  $x = 0$ ,  $y = 0$  위치에서 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_w = \zeta_a e^{i\omega_e t} \quad \text{단, } \zeta_a : \text{파진폭} \quad (2.3)$$

그리고 식(2.1)의 운동 변수  $y_G$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} y_G &= y_a e^{i(\omega_e t + \epsilon_y)} \\ \phi &= \phi_a e^{i(\omega_e t + \epsilon_\phi)} \\ \psi &= \psi_a e^{i(\omega_e t + \epsilon_\psi)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서  $y_a$ ,  $\phi_a$ ,  $\psi_a$ 는 운동진폭을 나타낸다.

### 2.3 조종성 운동방정식

NSM에 의한 식(2.1)을 구체적으로 선체 고정좌표계에서의 수식 표현으로 변환하는 방법을 생각한다. Fig. 1과 같이 선체의 전진 방향 속도를  $u$ , 정횡 우현 방향 속도를  $v$ 라 하면 관성계(慣性系)로부터 측정된 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V + \dot{x}_G &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_G &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned} \quad (2.5)$$

식(2.5)를 미분하면 관성계로부터 측정된 가속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_G &= \dot{u} \cos \psi - u \dot{\psi} \sin \psi \\ &\quad - \dot{v} \sin \psi - v \dot{\psi} \cos \psi \\ \ddot{y}_G &= \dot{u} \sin \psi + u \dot{\psi} \cos \psi \\ &\quad + \dot{v} \cos \psi - v \dot{\psi} \sin \psi \end{aligned} \quad (2.6)$$

선형이론(線形理論)에서는 미소 진폭의 제곱항 이상은 고차의 미소항으로 취급하여 무시한다. 그리고  $u$ 를  $V$ 로 바꾸어 써도 오차는 미소하다. 따라서 식(2.5), 식(2.6)은 다음과 같이 근사적으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \dot{y}_G &= V \psi + v = -V \ddot{\psi} / \omega_e^2 + v \\ \ddot{y}_G &= V \dot{\psi} + \dot{v} \end{aligned} \quad (2.7)$$

식(2.7)은 등속 이동 공간좌표계와 선체 고정좌표계 사이에 성립하는 관계식이라고 할 수 있다. 식(2.7)을 식(2.1)에 대입하면 선체 고정좌표계를 기초로 한 sway-yaw-roll의 조종성 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있고, 이 운동방정식에서의 유체력 계수는 NSM 이론을 이용하여 표시된다.

$$\begin{aligned} (m + a_{22}) \dot{v} + b_{22} v + a_{24} \ddot{\phi} \\ + b_{24} \dot{\phi} + a_{26} \ddot{\psi} + b_{26} \dot{\psi} &= F_y(t) \\ (I_z + a_{66}) \ddot{\psi} + b_{66} \dot{\psi} + a_{64} \ddot{\phi} \\ + b_{64} \dot{\phi} + a_{62} \dot{v} + b_{62} v &= M_\psi(t) \\ (I_x + a_{44}) \ddot{\phi} + b_{44} \dot{\phi} + c_{44} \phi + a_{42} \dot{v} \\ + b_{42} v + a_{46} \ddot{\psi} + b_{46} \dot{\psi} &= M_\phi(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서 파랑 강제력은 어느 좌표계를 사용하여도 마찬가지이다. 그리고 유체력 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{22} &= A_{22}, \quad b_{22} = B_{22} \\ a_{24} &= A_{24}, \quad b_{24} = B_{24} \\ a_{26} &= \int_L M_S \cdot x \, dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_{26} &= m V + \int_L N_S \cdot x \, dx \\
 a_{44} &= A_{44}, \quad b_{44} = B_{44}, \quad c_{44} = C_{44} \\
 a_{42} &= A_{42}, \quad b_{42} = B_{42} \\
 a_{46} &= \int_L M_S (\overline{OG} - l_{SR}) x \, dx \\
 b_{46} &= \int_L N_S (\overline{OG} - l_N) x \, dx \\
 a_{66} &= \int_L M_S \cdot x^2 \, dx - \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_S \cdot x \, dx \\
 b_{66} &= \int_L N_S \cdot x^2 \, dx + V \int_L M_S \cdot x \, dx \\
 a_{64} &= A_{64}, \quad b_{64} = B_{64} \\
 a_{62} &= A_{62}, \quad b_{62} = B_{62}
 \end{aligned}$$

식(2.8)에 점성 감쇠력을 적절히 고려함으로써 파랑중 조종운동 방정식을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 파랑에 의한 즉, 조파 감쇠력만을 고려의 대상으로 하기 때문에 이 문제에 대해서는 더 이상 검토하지 아니한다.

한편, Sohn(10)은 Newman(11)의 부가질량 이론을 이용하여, 이상유체중에서 조파 감쇠력을 무시한 조종운동 방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) u \dot{\psi} + m_y \alpha \ddot{\psi} \\
 - m_y l_y \ddot{\psi} &= F_y(t) \\
 (I_x + J_x) \ddot{\psi} - m_y \alpha l_y \ddot{\psi} - m_y l_y \dot{v} \\
 - m_x l_x u \dot{\psi} + W \overline{GM} \phi &= M_\phi(t) \\
 (I_z + J_z) \ddot{\psi} + (m_y - m_x) u v + m_y \alpha (\dot{v} + u \dot{\psi}) \\
 - m_y \alpha l_y \ddot{\psi} - (m_y l_y - m_x l_x) u \dot{\psi} &= M_\psi(t)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

여기서  $m_x$ ,  $m_y$ 는 각각  $x$ ,  $z$ 축 방향의 부가질량,  $J_x$ ,  $J_z$ 는  $x$ ,  $z$ 축에 관한 부가 관성 모우멘트,  $\alpha$ 는  $m_y$ 의 중심의  $x$  좌표,  $l_x$ ,  $l_y$ 는 각각  $m_x$ ,  $m_y$ 의 중심의  $z$  좌표(단, 좌표 원점은 무게 중심  $G$ )이다.

식(2.8)과 식(2.9)의 대응 관계는 다음과 같다.

식(2.8)에서 조파 감쇠력 성분을 0으로 두고,  $V \approx u$ ,  $m_x = 0$ 으로 두면, 식(2.8)은 식(2.9)와 완전히 일치한다. NSM 이론에서는 선체 각 단면에서의 2차원 이론을 다루고 있기 때문에 식(2.8)에서는 당연히  $x$ 축 방향의 부가질량은 고려되지 아니하였다. 이상의 검토로부터 내항성 운동 방정식(2.1)은 식(2.7)의 좌표 변환식을 이용하여 선체 고정좌표계에서의 조종성 운동방정식에 귀착된다는 것을 이해할 수 있다.

횡동요 감쇠계수  $B_{44}$ 는 식(2.1)과 같이 주어졌는데, 횡동요 감쇠력에는 조파의 영향 이외에 점성과 전진 속도의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는  $B_{44}$ 를 식(2.1) 대신에 다음과 같이 Takahasi(12)의 근사식을 이용하여 계산한다.

$$B_{44} = 2 \alpha_e (I_x + A_{44}) \{1 + 0.8(1 - e^{-10F_n})\} \tag{2.10}$$

$$\alpha_e = \frac{2}{T_\phi} N \cdot \phi_m$$

여기서  $T_\phi$  : 횡동요 고유주기

$N$  : Bertin의 감멸 계수 ( $N_{20} = 0.02$ )

$\phi_m$  : 평균 횡동요각

$F_n$  : Froude 수

$N_{20}$  :  $\phi_m = 20^\circ$  일 때의  $N$  값

### 3. 응답함수의 수치계산 예

#### 3.1 공시 선형

시계산용 선형으로서 광석운반선 3m모형선을 택하였다. Table 1에 모형선의 주요목을 나타낸다. 이 선형을 택한 이유는 제 2장에서 언급한 NSM의 내항성 운동방정식의 해(解)를 Takaki와 Tasai(8)가 계산한 결과와 비교함으로써 본 연구에서의 수치 계산법의 타당성을 확인하기 위함이다. 계산시의 선속은  $F_n = 0.1$ 을 택하였다.

그리고 횡동요 감쇠계수  $B_{44}$ 를 계산할 때 필요한  $N$ 과  $\phi_m$ 은  $N = N_{20}/0.8$ ,  $\phi_m = 10^\circ$ 를 택하였다.

Table 1. Principal particulars of model

Items		Model
Length B. P.	$L$ (m)	3.00
Breadth	$B$ (m)	0.493
Mean draft	$d$ (m)	0.194
Dispalcement	$W$ (kg)	233.2
Block coefficient	$C_B$	0.8243
Midship section coefficient	$C_M$	0.9975
Natural period of roll	$T_\phi$ (sec)	1.405
Radius of gyration about z-axis	$k_I$	$0.2356 L$
Radius of gyration about x-axis	$k_t$	$0.2602 B$
Metacentric height	$\overline{GM}$ (m)	0.0453
Height of center of gravity form keel	$\overline{KG}$ (m)	0.1537

### 3.2 계산 결과

규칙파에 대한 선체 운동의 응답함수를 계산하기 위해서는 내향성 운동방정식 (2.1)의 운동 변수를 다음과 같이 표기한다.

$$\begin{aligned}
 y_G &= (Y_c + i Y_s) e^{i\omega_s t} \\
 \phi &= (\Phi_c + i \Phi_s) e^{i\omega_s t} \\
 \psi &= (\Psi_c + i \Psi_s) e^{i\omega_s t}
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

식(2.4)와 식(3.1)의 관계로부터 선체 운동의 진폭과 위상차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_a &= \sqrt{Y_c^2 + Y_s^2}, \quad \varepsilon_y = \tan^{-1}(Y_s/Y_c) \\
 \phi_a &= \sqrt{\Phi_c^2 + \Phi_s^2}, \quad \varepsilon_\phi = \tan^{-1}(\Phi_s/\Phi_c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_a &= \sqrt{\Psi_c^2 + \Psi_s^2}, \quad \varepsilon_\psi = \tan^{-1}(\Psi_s/\Psi_c)
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

식(3.1)을 식(2.1)에 대입하면 실수부, 허수부에 대해 각각 연립방정식을 만들수 있고 6개의 미지수  $Y_c, Y_s, \Phi_c, \Phi_s, \Psi_c, \Psi_s$ 의 해를 구할 수 있다. 이것을 식(3.2)에 대입하면 운동 진폭  $y_a, \phi_a, \psi_a$ 를 구할 수 있다. 운동 진폭의 계산 결과는  $\zeta_a$  또는  $k\zeta_a$ 로 무차원화 하여 Fig. 2~Fig. 4에 보인다. 본 연구에서의 계산치와 Takaki & Tasai(8)의 계산 결과를 비교하여 나타냈다. 양 계산 결과에 미소한 차이가 보이는데 이것은 다음과 같은 영향 즉, 수치 계산법의 차이, 선체 각 단면에서의 선형 데이터의 정확성, 횡동요 감쇠력 계산법의 차이 등에 기인하는 것으로 유추된다. 한편, Fig. 3의  $\chi = 90^\circ$  일 때의 yaw 응답함수는 양 계산치에 유의한 차이를 보이고 있다. 그 이유는 명확히 알 수 없으나, Tsubokawa(13)도 동일한 선형에 대해서 OSM을 이용하여 yaw 응답함수를 계산하였는데 그 결과는 본 연구에서의 계산치와 거의 일치하고 있다. 따라서 상기 제 영향을 감안하면 본 연구에서의 수치 계산법은 타당하다고 할 수 있다.

다음으로 조종성 운동방정식(2.8)의 해(解)도 같은 방법으로 운동 진폭  $v_a, \phi_a, \psi_a$ 를 구할 수 있다. 식(2.8)로부터 구한 조종운동의 응답함수  $v_a/\zeta_a, \phi_a/\zeta_a$ 를 Fig. 5~Fig. 6에 보인다. 단, sway 진폭  $v_a$ 는 다음과 같다.

$$v = v_a e^{i(\omega_s t + \varepsilon_s)} \quad (3.3)$$

한편, 내향성 · 조종성 양 운동방정식에서 yaw의 정의는 서로 같기 때문에 식(2.1)과 식(2.8)로부터 구한 yaw 진폭은 서로 같아야 한다. 이 관계를 Fig. 7에 보인다.

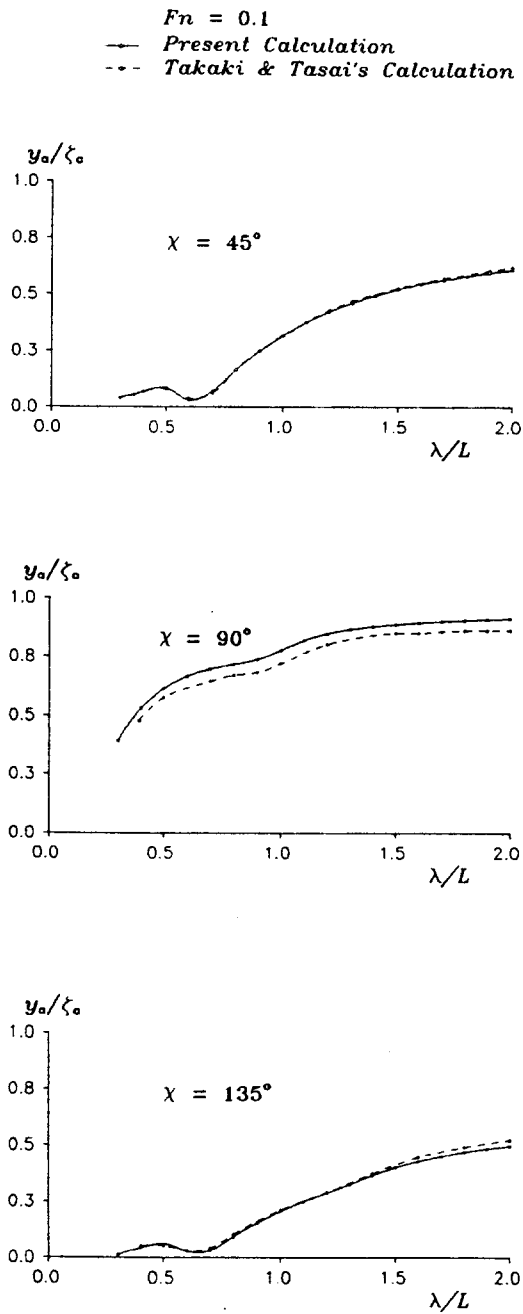


Fig. 2 Nondimensional sway amplitude of ship in waves in seakeeping coordinate system

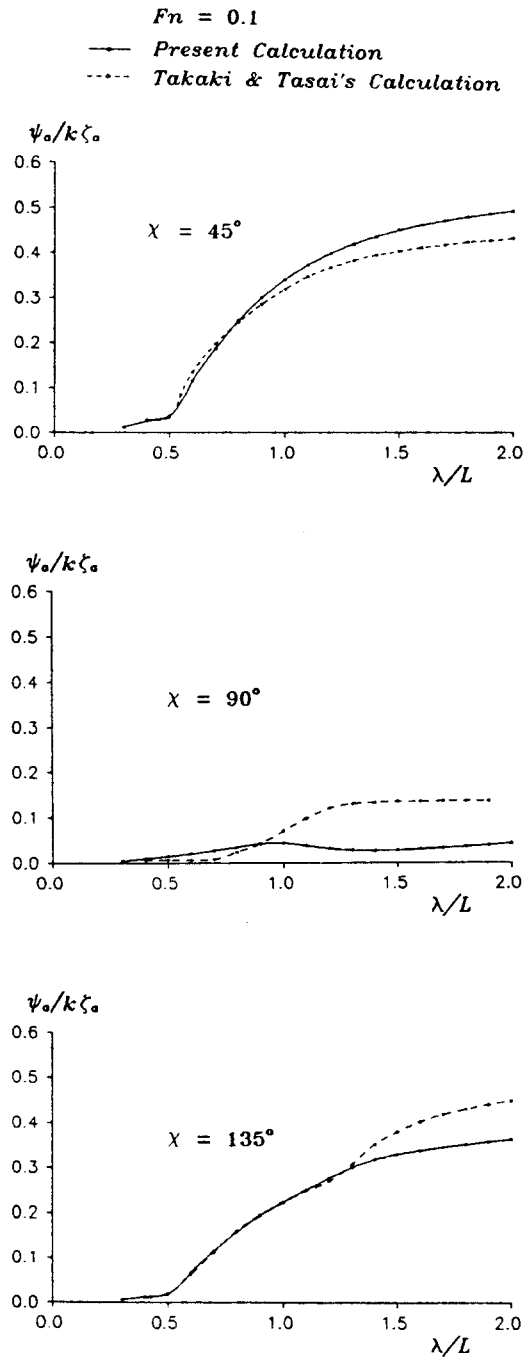


Fig. 3 Nondimensional yaw amplitude of ship in waves in seakeeping coordinate system



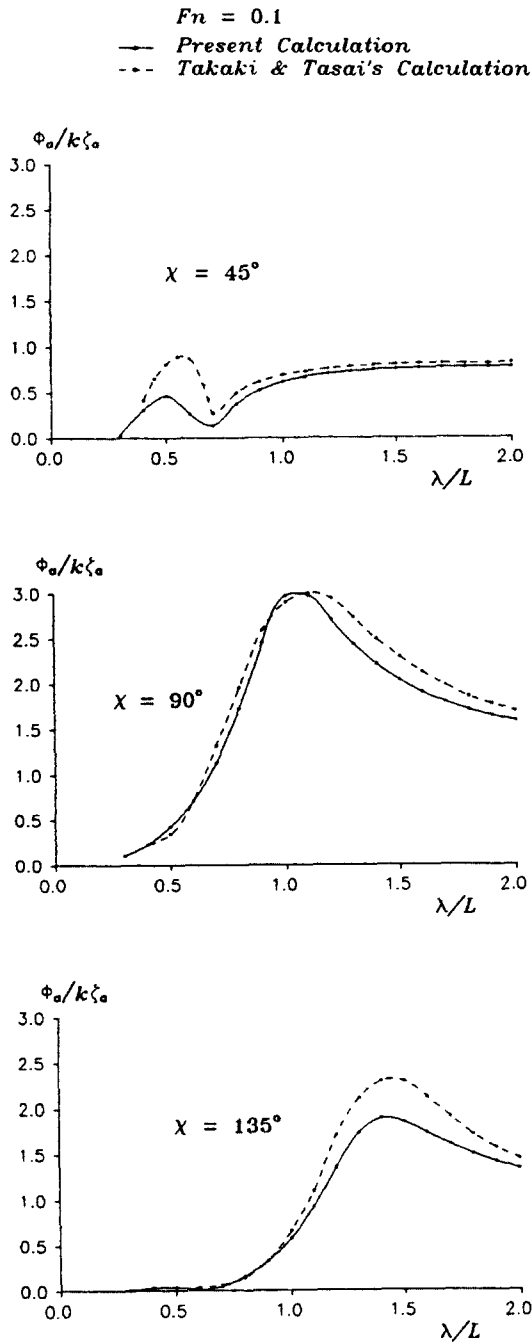


Fig. 4 Nondimensional roll amplitude of ship in waves in seakeeping coordinate system

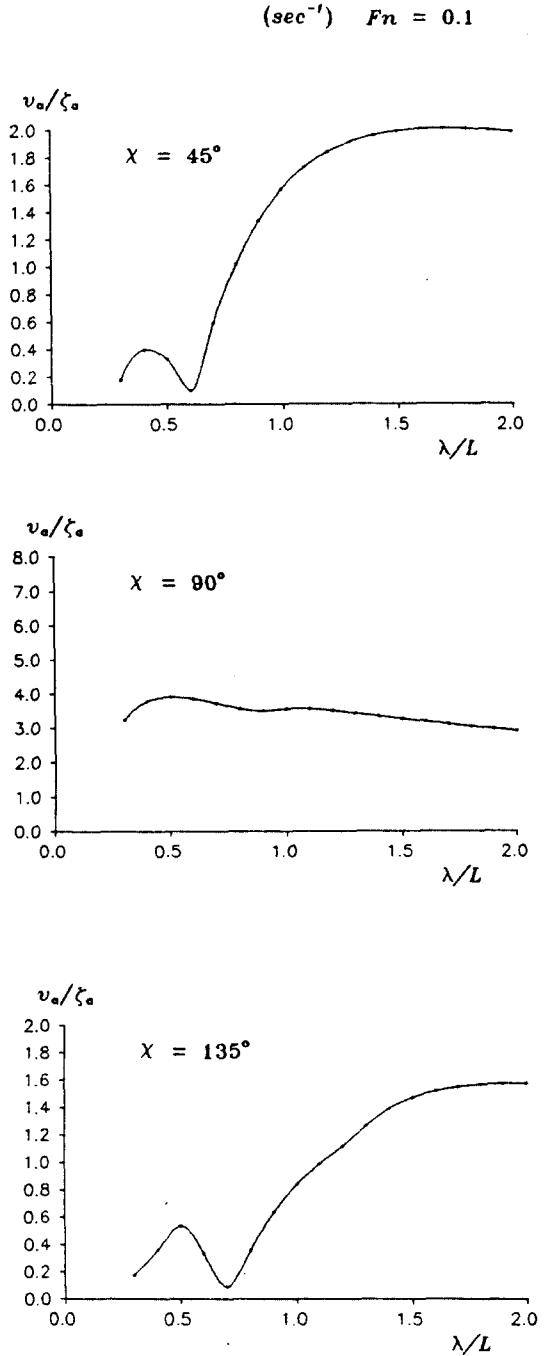


Fig. 5 Sway response function of ship in waves in manoeuvring coordinate system

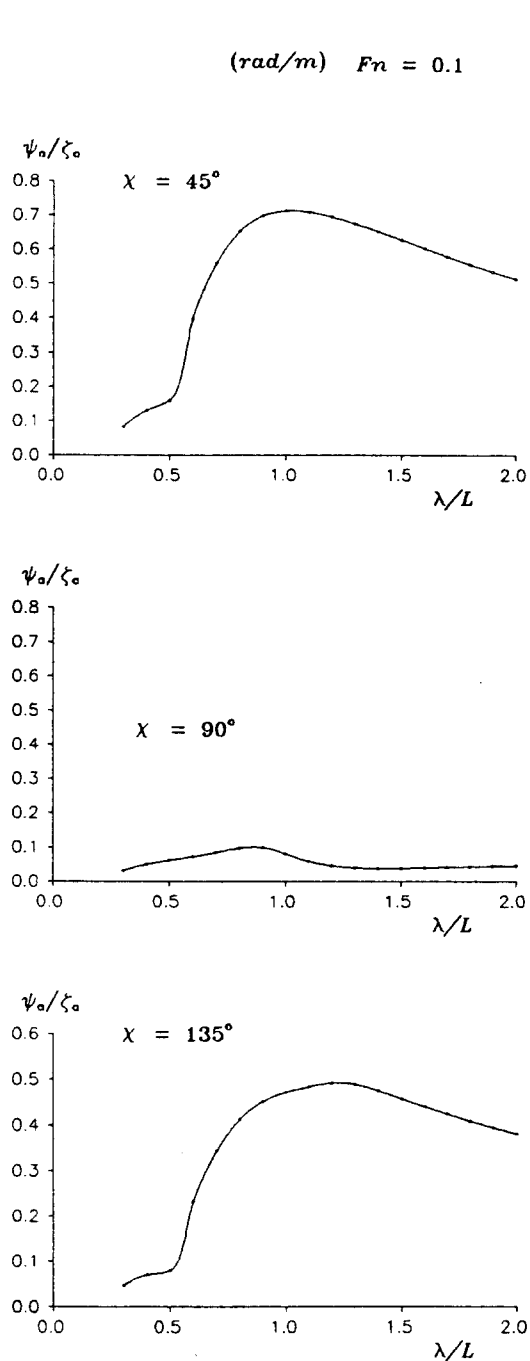


Fig. 6 Yaw response function of ship in waves in manoeuvring coordinate system

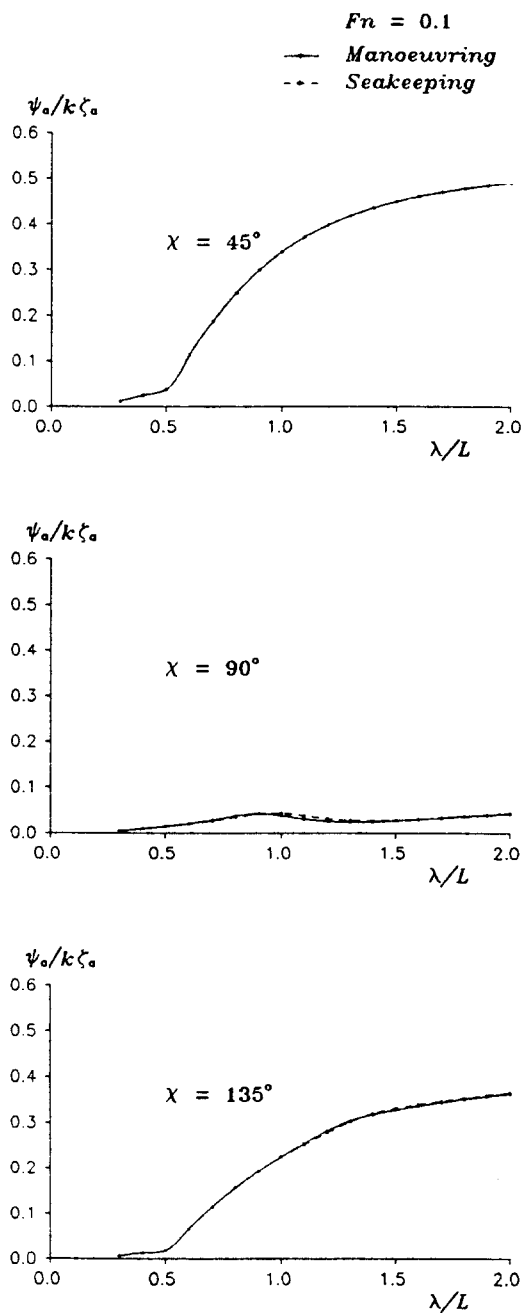


Fig. 7 Comparison of nondimensional yaw amplitudes of ship in waves which are defined in manoeuvring and seakeeping coordinate systems

## 4. 결 언

이상의 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 등속 이동 공간좌표계에서의 내항성 운동방정식을 선체 고정좌표계에서의 조종성 운동방정식으로 변환하기 위해서는 다음의 관계식을 대입하면 모순없이 해결될 수 있다.

$$\dot{y}_G = V\psi + v$$

- (2) 횡경사를 고려한 파랑중 조종운동 방정식에서 조파 감쇠력 성분을 고려하는 방법이 명확해졌다.
- (3) 파랑중 조종운동의 응답함수를 NSM을 이용하여 구할 수 있었다.
- (4) 파랑중 조종운동의 yaw 응답함수는 내항성 운동방정식으로부터 직접 구하여도 유의한 오차가 발생되지 아니하지만, 엄밀한 의미에서 조종운동의 응답함수는 본 연구에서 제안한 조종성 운동방정식으로부터 구하는 것이 타당하다고 생각한다.

## 후 기

본 논문은 산학협동재단과 삼양무선공업주식회사가 지원한 1994년도 matching fund 연구 과제 "자동조타로써 항행하는 선박의 추진마력 손실량 평가법에 관한 연구"의 일부 결과임을 밝히며, 상기 기관에 심심한 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Korvin-Kroukovsky, B.V. & Jacobs, W. R., "Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves", SNAME Trans., Vol. 65(1957)
- [2] 渡邊恵弘., "船の上下動及び縦搖の理論について", 九州大學工學集報, 31卷 1號(1958)

- [3] 田才福造, 高木又男, "規則波中應答理論及び計算法", 日本造船學會 耐航性 Symposium(1969)
- [4] Salvesen, N., Tuck, E.O. & Faltinsen, O., "Ship Motions and Sea Loads", SNAME Trans. Vol. 78(1970)
- [5] 藤野正隆, "Sway-Yaw運動を記述するための座標系に關する-考察", 日本造船學會論文集, 第141號(1977)
- [6] 藤野正隆, "斜波中航走時のSway-Roll-Yaw連成運動方程式に關する-考察", 日本水槽試驗研究會(JTTC), 第2部會公表資料 No. 1981-II-06(1981)
- [7] 浜本剛實, M., 金潤洙, "波浪中の操縦運動を記述する新しい座標系とその運動方程式", 日本造船學會論文集, 第173號(1993)
- [8] 高木幹雄, 田才福造, "横運動方程式の流體力にいて", 西部造船會會報, 第46號 (1973)
- [9] Tasai, F., "Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface", Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. IX, No. 35(1961)
- [10] 孫景浩, 野本謙作, "高速Container船の操縦運動と横搖れとの連成拳動について", 日本造船學會論文集, 第150號(1981)
- [11] Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", MIT Press(1978)
- [12] Takahashi, T., "Mechanism of Rolling and Application,"(in Japanese), Report of Mitsubishi Heavy Industry Nagasaki Technical Institute, No. 2842 (1969)
- [13] 坪川毅彦, 植村卓司, 野本謙作, "自動操舵に伴う推進馬力の損失について", 日本造船學會論文集, 第151號(1982)