

# 횡동요를 고려한 선박조종운동의 새로운 수학적모델에 관한 연구

손 경 호\* · 김 용 민\*\*

\*한국해양대학교 해양시스템공학부 교수, \*\*(주)한국소프트스페이스

## A Study on New Mathematical Model of Ship Manoeuvring Motion Taking Coupling Effect of Roll into Consideration

Kyoung-ho Sohn\* · Yong-min Kim\*\*

\*Dept. of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Korea Soft Space Inc., Seoul 152-766, Korea

**요 약** : 일반적으로 메타센터높이가 작은 선박이나 고속선의 경우에는 조종운동 시 큰 횡동요각을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이러한 선박의 조종성능 예측 시에는 조종운동에 횡동요의 영향을 고려해야만 보다 정확한 결과를 얻을 수가 있다. 즉, 조종운동을 다루는 전후동요, 좌우동요, 선수동요에 횡동요를 포함시키는 4자유도 운동방정식이 요구된다. 본 연구에서는 지금까지 여러 연구자들에 의해 제안되어 있는 4자유도 조종운동 수학적모델을 검토 분석하고, 이들 실험자료를 재정리하여 보다 간결하고 실용적인 새로운 수학적모델을 제안한다. 아울러 기존의 복잡한 수학적모델과 새로운 수학적모델에 의한 조종운동 시뮬레이션을 각각 수행하고 그 결과를 비교 검토하여 본 연구에서 제안한 수학적모델의 유용성을 검증한다.

**핵심용어** : 조종운동, 횡동요영향, 4자유도운동, 메타센터높이

**Abstract** : A ship with small metacentric height or high speed vessel performs relatively large roll angles in her manoeuvring motion. Roll coupling effect should be taken into consideration for accurate prediction of manoeuvring motion of such a ship. This paper proposes a new mathematical model of ship manoeuvring motion taking coupling effect of roll into consideration. Some kinds of manoeuvring motion are simulated by computer, based upon the proposed model. The simulated results by proposed model here are compared with those by existing model. The proposed model is found to be practical and useful for prediction of manoeuvring motion with roll effect.

**Key words** : Manoeuvring motion, Roll coupling effect, 4 degree of freedom, Metacentric height

### 1. 서 론

일반적으로 선박의 조종운동은 전후동요(surge), 좌우동요(sway) 및 선수동요(yaw)의 3자유도 복합운동으로서 취급된다. 그 이유는 조타(steering) 또는 선속 변화에 기인하는 선박의 운동응답주파수가 대단히 낮기 때문에 다른 운동성분은 무시될 수 있기 때문이다. 그러나 상갑판 위에 화물을 다수 적재하는 컨테이너운반선과 같이 메타센터높이(metacentric height)가 작은 선박이나 고속선의 경우에는 조타에 기인하는 횡동요(roll)의 영향이 무시될 수 없는 것으로 지적되고 있다(Inoue, 1979; Eda, 1980; Hirano, 1980; Sohn, 1981; Kijima, 1996). 따라서 이러한 경우에는 조종운동을 횡동요 영향을 고려하여 4자유도 운동으로서 다루어야 한다.

본 연구에서는 지금까지 여러 연구자들에 의해 제안되어 있는 4자유도 조종운동 수학적모델을 검토 분석하고, 이들 실험자료를 재정리하여 보다 간결하고 실용적인 새로운 수학적모델을 제안한다. 아울러 기존의 수학적모델과 새로운 수학적모델에

의한 조종운동 시뮬레이션을 각각 수행하고 그 결과를 비교 검토하여 본 연구에서 제안된 수학적모델의 유용성을 검증한다.

### 2. 횡동요를 고려한 조종운동 수학적모델

#### 2.1 4자유도 조종운동의 기본식

Fig. 1과 같이 선박의 무게중심에 좌표 원점을 둔 물체고정좌표계(body-fixed axes system)를 사용하여 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw) 및 횡동요(roll)의 4자유도 운동을 정식화 한다. 단, 물체고정좌표계의  $y$  축은 항상 수평방향을 취하는 것으로 가정하며, 선박의 운동변수  $u, v, r, \phi$  등은 Fig. 1의 정의에 따르는 것으로 한다.

먼저 유체중에서의 선체운동에 따른 부가질량력(added mass force)을 고려한 4자유도 조종운동의 기본식은 다음과 같이 표시된다(Sohn, 1981).

\* 대표저자 : 손경호(중신회원), sohnkh@kmaritime.ac.kr, 051)410-4303

\*\* 정회원, trueness2000@msn.com, 017-328-1236

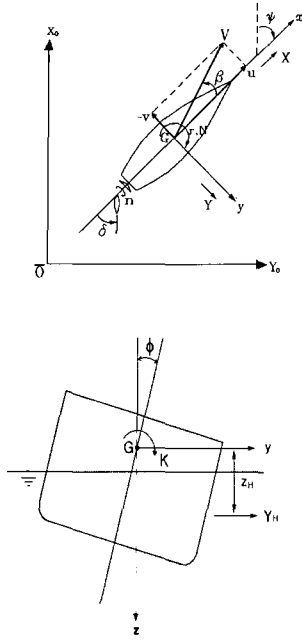


Fig. 1 Coordinate system

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr &= X \\
 (m + m_x) \dot{v} + (m + m_x) ur + m_y a_y \dot{r} - m_y l_y \dot{\phi} &= Y \\
 (I_z + J_z) \dot{r} + m_y a_y \dot{v} &= N \\
 (I_x + J_x) \dot{\phi} - m_y l_y \dot{v} - m_x l_x ur + W \cdot GM \phi &= K
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $X, Y, N, K$ 는 선체에 작용하는 유체력으로서 각각 전후방향힘과 횡방향힘 그리고 선수동요모우멘트와 횡동요모우멘트를 나타낸다.  $m$ 은 선체의 질량,  $I_z, I_x$ 는 각각  $z, x$ 축 주위의 관성모우멘트,  $m_x, m_y$ 는 각각  $x, y$ 축 방향의 부가질량,  $J_z, J_x$ 는 각각  $z, x$ 축 주위의 부가관성모우멘트,  $a_y$ 는  $m_y$  중심의  $x$ 좌표,  $l_x, l_y$ 는 각각  $m_x, m_y$  중심의  $z$ 좌표를 의미한다. 그리고  $W$ 는 배수량,  $GM$ 은 메타센터 높이를 나타낸다. 식(1)의 우변 유체력항은 주선체(hull), 프로펠러(propeller) 및 타(rudder)에 기인하는 유체력을 합성하는 형태의 모듈형(modular type) 모델을 적용하여 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned}
 X' &= X_H' + X_P' + X_R' \\
 Y' &= Y_H' + Y_R' \\
 N' &= N_H' + N_R' \\
 K' &= K_H' + K_R'
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 첨자  $H, P, R$ 은 각각 주선체, 프로펠러, 타를 의미한다. 그리고 유체력의 무차원화 표시는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X', Y' &= X, Y / \left( \frac{1}{2} \rho L d V^2 \right) \\
 N', K' &= N, K / \left( \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $L, d$ 는 선박의 수선간장 (length between perpendiculars)과 흘수,  $V$ 는 선속을 의미한다.

주선체, 프로펠러 및 타에 기인하는 유체력은 각각 다음과 같이 표시된다(Sohn, 1981).

(1) 주선체에 기인하는 유체력

$$\begin{aligned}
 X_H' &= X_{uu}' u'^2 + X_{vr}' v' r' + X_{vv}' v'^2 \\
 &\quad + X_{rr}' r'^2 + X'(\phi) \\
 Y_H' &= Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{\phi}' \phi' + Y_{vvv}' v'^3 \\
 &\quad + Y_{vvr}' v'^2 r' + Y_{vrr}' v' r'^2 \\
 &\quad + Y_{rrr}' r'^3 + Y'(v', r', \phi) \\
 N_H' &= N_v' v' + N_r' r' + N_{\phi}' \phi' + N_{vvv}' v'^3 \\
 &\quad + N_{vvr}' v'^2 r' + N_{vrr}' v' r'^2 \\
 &\quad + N_{rrr}' r'^3 + N'(v', r', \phi) \\
 K_H' &= -Y_H' \cdot z_H'
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $z_H'$ 는  $Y_H$ 의 작용점의  $z$ 좌표의 무차원값 ( $z_H' = z_H/L$ )이고,  $X'(\phi)$ 는 횡동요각  $\phi$ 에 기인하는 저항 증가로서 다음과 같이 표시한다(Sohn, 1981).

$$X'(\phi) = X_{\phi\phi}' \phi^2 \tag{5}$$

그리고  $\phi'$ 는 횡동요각속도의 무차원치를 의미한다.  $Y'(v', r', \phi)$ 와  $N'(v', r', \phi)$ 는 조종운동시 횡동요각  $\phi$ 에 기인하는 유체력을 의미하며, 본 연구에서는  $Y'(v', r', \phi)$ 와  $N'(v', r', \phi)$ 의 새로운 수학모델을 제안하는 데 목표를 두고 있다. 한편, 식(4)에서  $X_{uu}', X_{vr}'$  등은 유체력미계수 (hydrodynamic derivatives)로서 각각  $\partial^2 X' / \partial u'^2, \partial^2 X' / \partial v' \partial r'$  등을 의미하며, 운동변수들의 무차원화는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 u' &= u/V, v' = v/V, \\
 r' &= r(L/V), \phi' = \dot{\phi}(L/V)
 \end{aligned} \tag{6}$$

(2) 프로펠러에 기인하는 유체력

$$X_P' = (1-t) T / \left( \frac{1}{2} \rho L d V^2 \right) \tag{7}$$

단,

$$\begin{aligned}
 T &= \rho n^2 D^4 K_T \\
 K_T &= a_1 + a_2 J_P + a_3 J_P^2 \\
 J_P &= u_P / (nD) = u(1-w_p) / (nD)
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서  $t$ 는 추력감소율,  $K_T$ 는 추력계수로서 전진계수

$J_P$ 의 2차함수로 근사 표시한다.  $n$ 은 매초당 프로펠러 회전 수,  $D$ 는 프로펠러 직경,  $u_p$ 는 프로펠러 위치에서의 선속,  $w_p$ 는 프로펠러 위치에서의 반류계수이다.

(3) 타에 기인하는 유체력

$$\begin{aligned} X_R' &= -(1 - t_R) F_N' \sin \delta \\ Y_R' &= (1 + a_H) F_N' \cos \delta \\ N_R' &= (x_R' + a_H x_H') F_N' \cos \delta \\ K_R' &= -(1 + a_H) z_R' F_N' \cos \delta = -Y_R' \cdot z_R' \end{aligned} \quad (9)$$

단,

$$\begin{aligned} F_N' &= (A_R/Ld) f_a (V_R/V)^2 \sin \alpha_R \\ f_a &= 6.13 \lambda / (\lambda + 2.25), \quad \alpha_R = \delta - \gamma(\beta - l_R' r') \\ V_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \\ u_R &= \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta k)s + (1 - \eta k(2 - k))s^2} \\ v_R &= u_R \tan \{\gamma(\beta - l_R' r')\} \\ \varepsilon &= (1 - w_R) / (1 - w_p), \quad k = 0.6 / \varepsilon \\ w_p &= w_{p0} \exp(-4.0(\beta - x_p' r')^2) \\ w_R &= w_{R0} \cdot w_p / w_{p0}, \quad \eta = D/H \\ s &= 1 - u_p / (nP) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $P$ 는 프로펠러 펄치,  $w_{p0}$ ,  $w_{R0}$ 는 각각 정상직진시의 프로펠러 위치에서의 반류계수 및 타위치에서의 반류계수를 의미한다.  $A_R$ 은 타면적,  $\lambda$ 는 타의 총횡비,  $H$ 는 타의 높이를 나타낸다. 그리고  $t_R$ ,  $a_H$ ,  $x_H$  등은 타와 선체의 상호 간섭효과를 나타내는 실험계수이다.  $x_R'$ ,  $z_R'$ 는 각각 타적압력  $F_N$ 의 작용점의  $x$ ,  $z$ 좌표의 무차원값을 나타낸다.  $\gamma$ 는 정류계수(flow straightening coefficient),  $l_R'$ 는 실험계수이다.

### 2.2 횡동요각에 기인하는 유체력의 수학모델

지금까지 횡동요각에 기인하는 유체력의 수학모델에 관한 연구는 (Inoue, 1979; Eda, 1980; Hirano, 1980; Sohn, 1981; Kijima, 1996) 등에 의해 연구되었다. 먼저 이들 각각의 연구 결과를 간단히 검토해 보고, 아울러 새로운 수학모델을 제안하고자 한다. 한편, (Inoue, 1979)는 실험자료만을 제시하였으며 후일 모델(Hirano, 1980)의 기초가 되었으므로, Inoue 모델은 별도로 언급을 하지 않고 Hirano 모델로 간주하기로 한다.

(1) Eda 모델

Eda는 조종운동에 미치는 횡동요의 영향으로서  $Y_\phi' \phi$ ,  $N_\phi' \phi$  항만을 제안하였는데(Eda, 1980), 대각도 조종운동시 선형항만으로서 횡동요 영향을 정확하게 고려하는 데에는 부적절하다고 판단된다.

(2) Hirano 모델

$$\begin{aligned} Y'(v', r', \phi) &= Y_\phi' \phi + Y_{v|\phi}' v' |\phi| + Y_{r|\phi}' r' |\phi| \\ N'(v', r', \phi) &= N_\phi' \phi + N_{v|\phi}' v' |\phi| + N_{r|\phi}' r' |\phi| \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)로 표시되는 Hirano 모델(Hirano, 1980)의 경우, 횡동요각  $\phi$ 에 절대치 기호가 붙어 있으므로 만약  $v'$  또는  $r'$ 가 일정한 경우,  $\phi > 0$  일 때의 횡방향힘과  $\phi < 0$  일 때의 횡방향힘이 서로 같다고 간주된다. 이러한 현상은 선수동요모멘트의 경우에도 마찬가지이다. 따라서 Hirano 모델은 조종운동시 횡동요에 기인하는 좌우선체의 비대칭 영향을 반영하고 있지 못하므로 불합리하다고 판단된다.

(3) Sohn 모델

식(12)로 표시되는 Sohn 모델(Sohn, 1981)의 경우, 유체력의 구성이 Fig. 2와 같으며 조종운동시 횡동요에 기인하는 선체의 좌우 비대칭 영향을 잘 반영하고 있으나, 수학모델의 비선형항이 많아서 구축모형실험에 의해 이들 계수를 전부 구한다는 것은 현실적으로 굉장히 어려우며 비실용적이라고 판단된다.

$$\begin{aligned} Y'(v', r', \phi) &= Y_\phi' \phi + Y_{vv\phi}' v'^2 \phi \\ &\quad + Y_{v\phi\phi}' v' \phi^2 + Y_{rr\phi}' r'^2 \phi \\ &\quad + Y_{r\phi\phi}' r' \phi^2 \\ N'(v', r', \phi) &= N_\phi' \phi + N_{vv\phi}' v'^2 \phi \\ &\quad + N_{v\phi\phi}' v' \phi^2 + N_{rr\phi}' r'^2 \phi \\ &\quad + N_{r\phi\phi}' r' \phi^2 \end{aligned} \quad (12)$$

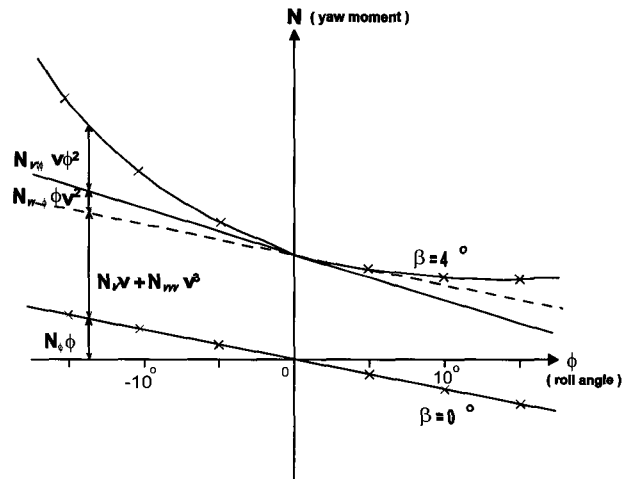


Fig. 2 유체력의 구성 ( $\beta = -v'$ )

(4) Kijima 모델

$$\begin{aligned} Y'(\beta, r', \phi) &= Y_\phi' \phi + Y_{\beta\phi}' \beta \phi + Y_{r\phi}' r' \phi \\ &\quad + Y_{\beta\beta\phi}' \beta |\beta| |\phi| + Y_{rr\phi}' r' |r| |\phi| \\ &\quad + Y_{\beta r\phi}' \beta^2 r' |\phi| + Y_{\beta r r\phi}' \beta r'^2 \phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N'(\beta, r', \phi) = & N_{\phi}' \phi + N_{\beta\phi}' \beta \phi + N_{r\phi}' r' \phi \\
 & + N_{\beta\beta\phi}' \beta |\beta| \phi + N_{rr\phi}' r' |r'| \phi \\
 & + N_{\beta\beta r\phi}' \beta^2 r' \phi + N_{\beta r r\phi}' \beta r'^2 \phi
 \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)으로 표시되는 Kijima 모델(Kijima, 1996)의 경우, 조종운동시 횡동요에 기인하는 선체 좌우 비대칭 영향을 반영하고 있으나, Sohn 모델과 마찬가지로 수학모델의 비선형항이 많아서 비실용적이라고 판단된다. 단, Kijima 모델에서는 운동변수  $v'$  대신 사항각  $\beta$ 를 사용하고 있다.  $\beta$ 와  $v'$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\sin \beta = -v' \approx \beta \quad (14)$$

(5) 새로운 수학모델의 제안

본 연구에서는 지금까지 타 연구자들에 의해 수행된, 횡동요시의 구속모형시험 결과(Inoue, 1979; Sohn, 1981; Kijima, 1996)를 검토 분석하여 보다 실용적이고 간편한 수학모델을 제안하고자 한다.

일반적으로 선박이 조타(steering)에 의해 선회운동을 하게 되면 횡동요각은 시간에 따라 Fig. 3과 같이 변화한다(Lewis, E., 1989). 선회초기의 짧은 과도시간을 제외하면 운동변수  $v', r', \phi$ 의 부호는 다음과 같이 변화한다.

● 우선회시

$$r' > 0, v' < 0, \beta > 0, \phi < 0$$

● 좌선회시

$$r' < 0, v' > 0, \beta < 0, \phi > 0$$

즉, 횡동요각은 외측경사를 일으키도록 작용한다. 따라서 선박의 조종운동에 있어서 고려해야 할 영역은 상기와 같이 우선회시(starboard turn)와 좌선회시(port turn)의 두 영역으로 구분하여 생각할 수 있다. (Inoue, 1979; Sohn, 1981; Kijima, 1996)에 의한 횡동요시의 구속모형시험 결과를 Figs. 4~7과 같이 재정리한다.

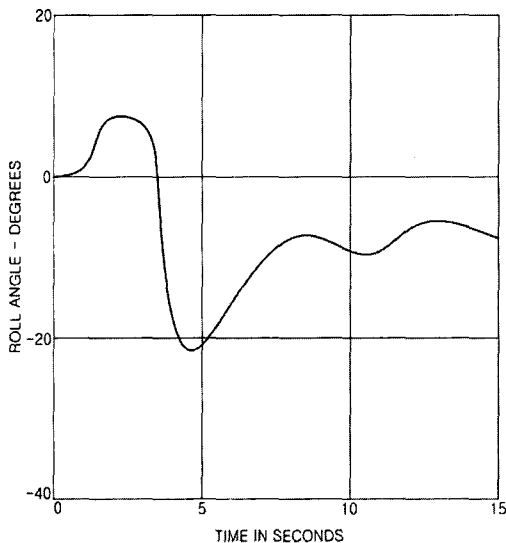


Fig. 3 Roll angle time records for a starboard turn(Lewis, 1989)

Fig. 4로부터 횡동요시  $v'$ 에 기인하는 유체력  $Y'(v', \phi)$ 를 다음과 같이 표시할 수 있다. 먼저  $\phi < 0$  일 때 즉, 우선회시에는

$$\begin{aligned}
 Y'(v', \phi) = & Y_v'(1 + 0.2853 \phi) v' \\
 = & Y_v' v' + 0.2853 Y_v' v' \phi
 \end{aligned}$$

와 같이 표시된다. 여기서 수치 0.2853은 Fig. 4의 실험결과의 평균기울기를 나타내며, 음(-)의  $\phi$  값이 커질수록 양(+)의  $Y'$  값은 작아진다. 좌선회시( $\phi > 0$ )에는

$$Y'(v', \phi) = Y_v' v' - 0.2853 Y_v' v' \phi$$

로 표시된다. 이때에는 양(+)의  $\phi$  값이 커질수록 음(-)의  $Y'$  값은 작아진다. 상기 두 경우를 하나의 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y'(v', \phi) = & Y_v' v' - 0.2853 Y_v' |v'| \phi \\
 = & Y_v' v' + Y_{v\phi}' |v'| \phi
 \end{aligned} \quad (15)$$

단,  $Y_{v\phi}' = -0.2853 Y_v'$

이상의 고찰 결과, 횡동요시  $v'$ 와  $r'$ 에 기인하는 유체력의 수학모델을 다음과 같이 제안한다.

$$\begin{aligned}
 Y'(v', r', \phi) = & Y_{\phi}' \phi + Y_{v\phi}' |v'| \phi + Y_{r\phi}' |r'| \phi \\
 N'(v', r', \phi) = & N_{\phi}' \phi + N_{v\phi}' |v'| \phi + N_{r\phi}' |r'| \phi
 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $Y_{v\phi}', Y_{r\phi}', N_{v\phi}', N_{r\phi}'$  등 간섭유체력미계수는 Fig. 4~7에서의 평균기울기(mean slope)와  $v'$  또는  $r'$ 와 관련된 선형 유체력미계수를 이용하여 식(15) 및 식(17)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 Y_{r\phi}' = & 0.0137 Y_r' \\
 N_{v\phi}' = & 1.21 N_v' \\
 N_{r\phi}' = & 0.90 N_r'
 \end{aligned} \quad (17)$$

한편,  $N_{r\phi}'$ 의 값을 결정하는 과정에서 Fig. 7의 평균기울기 값을 사용하지 않고 Kijima의 실험결과를 사용하기로 한다. 왜냐하면 Inoue의 실험 결과는 다소 기울기가 큰 경향이 있었고, 다음과 같이 검증하였을 때 평균기울기 값을 이용하면 추정치와 상당한 차이를 보인다는 것을 알 수 있었기 때문이다. 검증 방법은 다음과 같다.

본 연구에서 조종운동 시뮬레이션 검증에 이용한 SR-108 컨테이너운반선(Table 1)의  $N_r'$ 와  $N_v'$ 의 구속모형시험 결과값은 다음과 같다(Sohn, 1981).

$$N_r' = -0.0457, N_v' = -0.07936$$

(i) 평균기울기(mean slope) 사용시

$$N_{r\phi}' = 1.734 \times N_r' = 1.734 \times (-0.0457) \approx -0.07924$$

(ii) Kijima 실험치 사용시

$$N_{r\phi}' = 0.90 \times N_r' = 0.90 \times (-0.0457) \approx -0.0411$$

(iii) 추정치

일반적으로 선박의 조종운동시  $v'$  와  $r'$  의 관계는 다음과 같이 표시되며 이 관계를 동시편류현상(simultaneous drifting phenomenon)이라고 한다.

$$v' = -l_p' \cdot r'$$

여기서  $l_p'$  는 정상선회시의 피봇팅포인트(pivoting point)의  $x$  좌표의 무차원치 ( $l_p' = l_p/L$ ) 로서, 보통  $l_p' \approx 0.45 \sim 0.5$  의 값을 취한다(Yoshimura, 1978).

$$N_{r\phi}' = \frac{\partial^2 N'}{\partial |r'| \partial \phi} = l_p' \times \frac{\partial^2 N'}{\partial |v'| \partial \phi} = l_p' \cdot N_{v\phi}'$$

즉,

$$\begin{aligned} N_{r\phi}' &= 0.45 \times (1.21 \times N_{v\phi}') \\ &= 0.45 \times 1.21 \times (-0.07936) \approx -0.0432 \end{aligned}$$

상기 (ii), (iii)의 결과는 거의 일치하지만, (i), (iii)의 결과는 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는  $N_{r\phi}'$  의 값을 결정할 때에만 Kijima의 실험치를 이용하기로 한다.

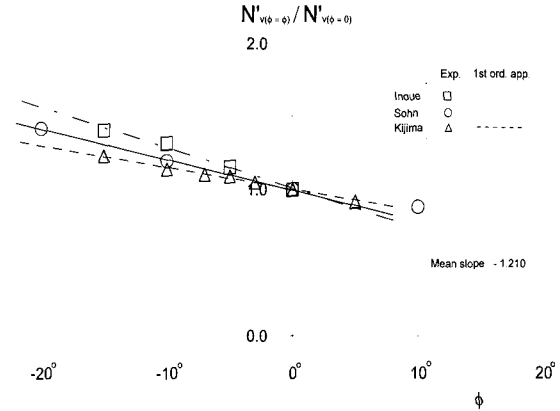


Fig. 6 Linear derivative  $N_{v\phi}'$  as function of roll angle while starboard turn

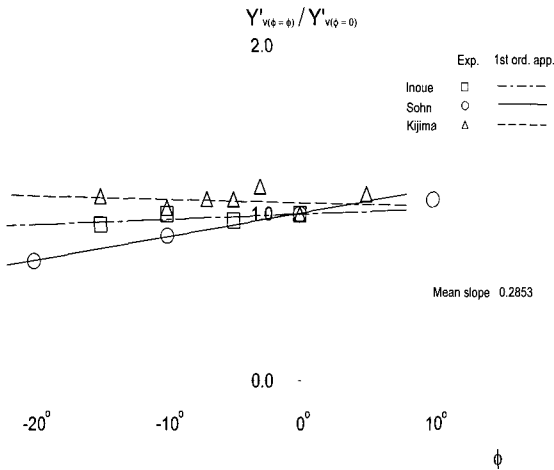


Fig. 4 Linear derivative  $Y_{v\phi}'$  as function of roll angle while starboard turn

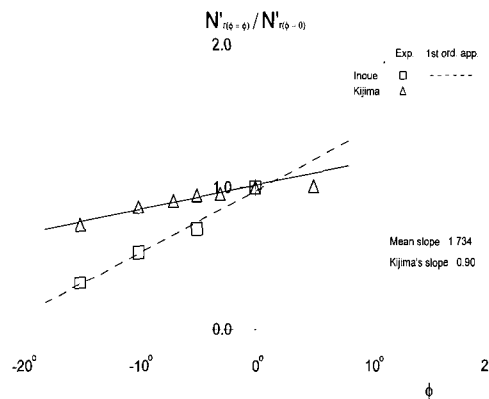


Fig. 7 Linear derivative  $N_{r\phi}'$  as function of roll angle while starboard turn

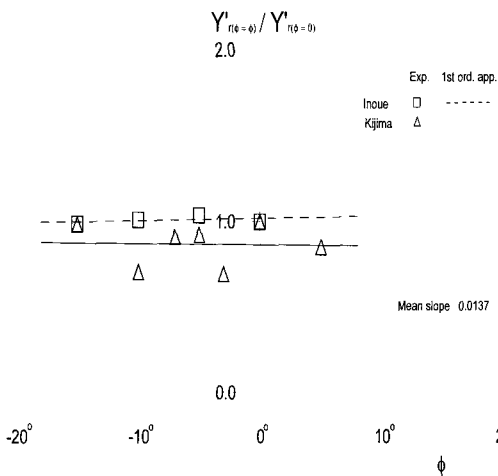


Fig. 5 Linear derivative  $Y_{r\phi}'$  as function of roll angle while starboard turn

### 3. 수치계산 및 고찰

Table 1 Principal dimensions of SR-108 container ship

Hull		Rudder	
Length B. P.	175.0 m	Area	33.0376 m <sup>2</sup>
Breadth	25.4 m	Height	7.7583 m
Draft	8.5 m	Aspect ratio	1.8219
Disp. Vol.	21222 m <sup>3</sup>	Area ratio	1/45.0
KM	10.39 m	Propeller	
KB	4.6154 m	Diameter	6.533 m
C <sub>B</sub>	0.559	Pitch ratio	1.009
C <sub>P</sub>	0.580	Exp. area ratio	0.67
C <sub>W</sub>	0.686	Boss ratio	0.18
C <sub>M</sub>	0.966	Number of blades	5
LCB from FP	0.518 L		

본 연구에서 제안된 조종운동시 횡동요에 기인하는 유체력에 관한 새로운 수학모델의 유용성을 확인 검증하기 위해서, SR-108 컨테이너운반선에 대한 조종운동 수치계산 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 선박의 주요목과 정면도는 각각 Table 1 및 Fig. 8과 같다.

메타센터높이(GM) 0.3m, 0.5m, 3.0m에 대한 선회궤적과 횡동요각, 지그재그시험의 궤적과 횡동요각 그리고 정상선회시의 스파이럴특성 등을 비교하였다. GM값이 0.3m이면 작은 값으로서 횡동요의 영향이 크게 나타날 것이며 GM값이 3.0m이면 큰 값으로서 횡동요의 영향이 거의 나타나지 않을 것이다. 계산 결과는 Fig. 9~16에 나타냈으며, 본 연구에서 제안된 수학모델과 기존의 수학모델(Sohn, 1981)에 의한 각각의 계산결과를 비교하였다. 단, 수치계산시  $Y'(v', r', \phi)$  및  $N'(v', r', \phi)$ 와 관련된 유체력미계수 이외의 모든 계수는 문헌(Sohn, 1981)의 자료를 이용하였다. 본 연구에서 제안된 수학모델은 비교적 간편하면서도 기존의 복잡한 수학모델(Sohn, 1981)과 계산 정도(精度) 면에서 크게 차이가 나지 아니하며 조종성능에 미치는 횡동요 영향이 적절하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, 조종성능에 미치는 GM의 영향은 다음과 같다. 선회성능에서는 GM값이 작을수록 선회반경이 줄어들고 횡경사각은 커진다(Fig. 9~12). 지그재그성능에서는

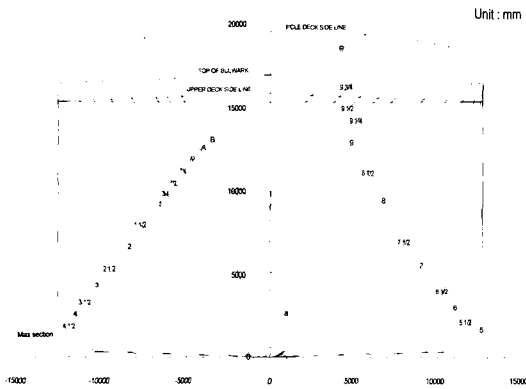


Fig. 8 Body plan of SR-108 container ship

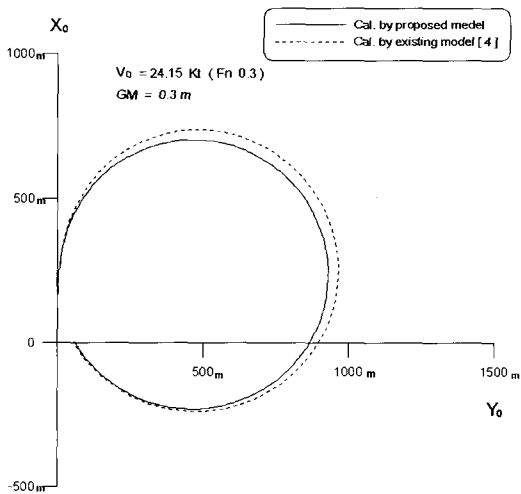


Fig. 9 turning trajectory (  $\delta = 15^\circ$  , GM = 0.3 m )

GM값이 작을수록 오버슈트각(overshoot angle)과 횡경사각이 동시에 커진다(Fig. 13~15).

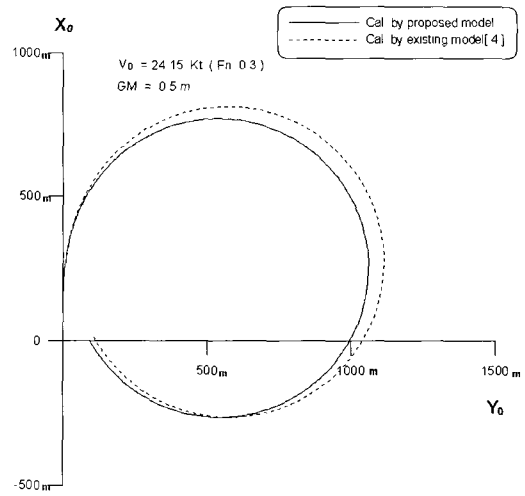


Fig. 10 turning trajectory (  $\delta = 15^\circ$  , GM = 0.5 m )

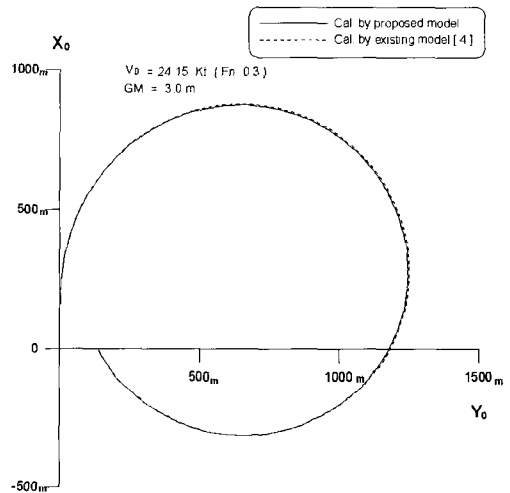


Fig. 11 turning trajectory (  $\delta = 15^\circ$  , GM = 3.0 m )

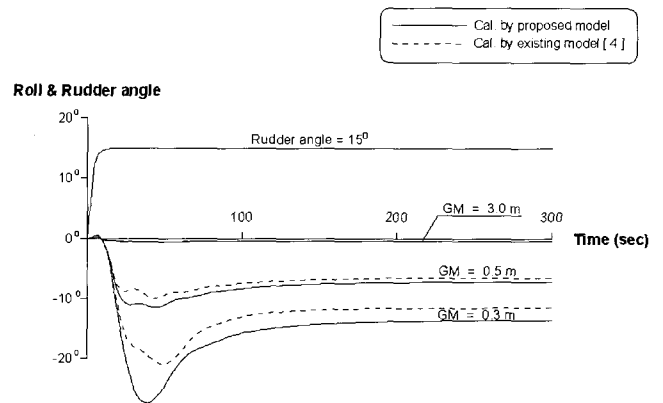


Fig. 12 Variation of roll angle in turning

Fig. 16의 스파이럴특성곡선에서는 GM값이 3.0m 일 때 즉, 횡동요의 영향이 거의 나타나지 않을 때 양 수확모델에 의한 스파이럴특성의 수치계산 결과는 서로 일치하고 있으며 이 선박의 자유항주모형실험결과(Matsumoto, 1980)와도 거의 일치함을 알 수 있다.

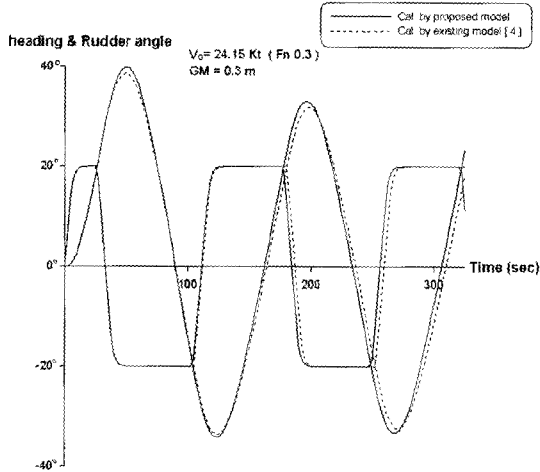


Fig. 13 20° / 20° Zig-zag manoeuvre ( GM = 0.3 m )

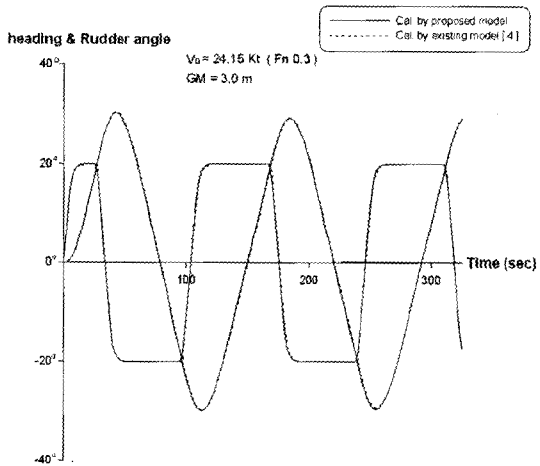
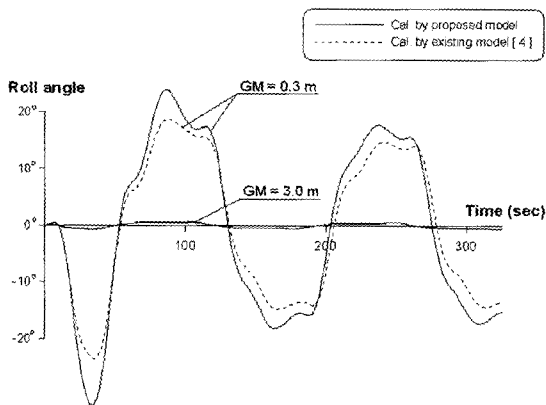


Fig. 14 20° / 20° Zig-zag manoeuvre ( GM = 3.0 m )



g. 15 Variation of roll angle in 20° / 20° Zig-zag manoeuvre

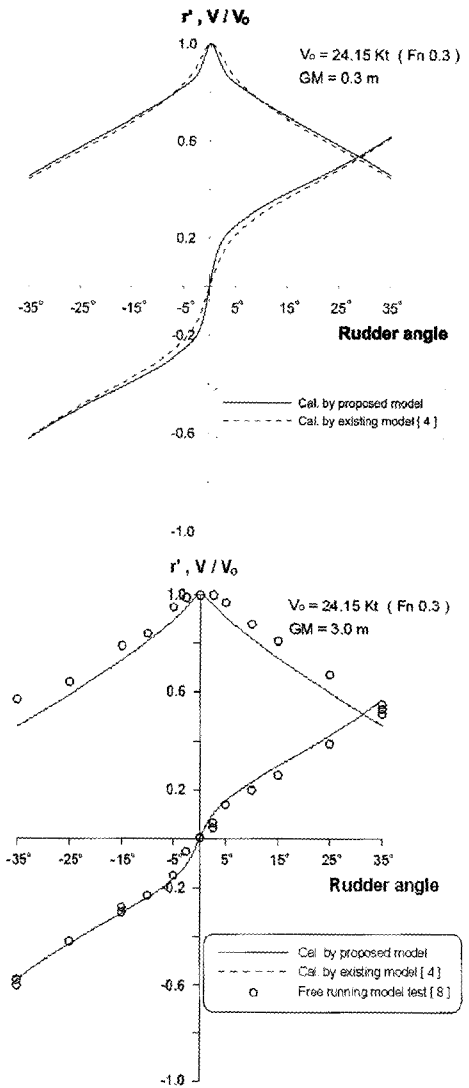


Fig. 16 Spiral characteristics

### 5. 결 론

본 연구에서는 선박의 4자유도 조종운동의 추정 기법에 대하여 논하였다. 3자유도 운동방정식에 횡동요의 영향을 추가함으로써 조종운동을 보다 정확하게 추정할 수 있었고, 이 추가항에 대한 새로운 모델을 제안하였다.

아울러 본 연구에서 제안된 수확모델을 포함한 4자유도 운동방정식을 이용하여 조종운동 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 메타센타높이가 작은 선박의 경우 조종성능을 보다 정확하게 추정할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 제안된 수확모델은 기존의 수확모델(Sohn, 1981)에 의한 시뮬레이션 결과와 약간의 차이는 있으나 간편하면서도 실용적인 수확모델임을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2000-000-

00320-0(2002)) 지원으로 수행되었음

### 참 고 문 헌

- [1] Eda, H., (1980), "Rolling and Steering Performance of High Speed Ships", The 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, Japan.
- [2] Kijima, K., (1996), "Influence of Roll Motion on Ship Manoeuvrability", 西部造船會會報 第93號.
- [3] Hirano, M., (1980), "A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect Due to Heel into Consideration", 西部造船會會報 第59號.
- [4] Inoue, S., (1979), "Hydrodynamic Derivatives of Ship Maneuvering Motion at Heeled Condition", Technical Report SP80, Technical Committee of the West-Japan Society of Naval Architects.
- [5] Lewis, E., (1989), "Principles of Naval Architecture", 2nd Revision, Volume III Motions in Waves and Controllability, page 213, Published by SNAME, USA.
- [6] Matsumoto, M., (1980), "The Prediction of Manoeuvring Performance by Captive Model Tests", 關西造船協會誌 第176號.
- [7] Sohn, K., (1981), "On the Coupled Motion of Steering and Rolling of a High Speed Container Ship", 日本造船學會論文集 第150號.
- [8] Yoshimura, Y., (1978), "Modeling of Manoeuvring Behaviour of Ships with Propeller Idling, Boosting and Reversing", 日本造船學會論文集 第144號.

---

원고접수일 : 2003년 7월 10일

원고채택일 : 2003년 12월 4일