

시뮬레이터 구축을 위한 2축2타선박의 조종운동 수학모델에 관한 연구

손 경 호* · 김 용 민**

A Study On Mathematical Model of Manoeuvring Motions
of Twin-propeller Twin-rudder Ship for Construction
of Real-time Ship-handling Simulator

Kyoungho Sohn · Yongmin Kim

<목 차>

Abstract

1. 서 언

2. 시뮬레이션 수학모델

3. 조종성능의 확인

4. 결 언

참고문헌

요 약

선박의 항행안전의 문제가 중요시됨에 따라 선박조종시뮬레이터에 의한 안전성 검토의 필요성이 크게 인식되고 있다. 또한 조종성능을 향상시킬 목적으로 다양한 선종이 출현하고 있고, 이에 따라 선박조종시뮬레이터의 개발에 있어서 선박의 데이터베이스는 필수적이라고 할 수 있다. 따라서 선종에 따른 수학모델을 각각 선박조종시뮬레이터에 적용시킴으로써 다양성이라는 가상현실의 잇점을 한층 부각시킬 수 있다. 본 연구에서는 우수한 추진성능을 목적으로 한 2축2타선박을 대상으로 조종운동 수학모델을 정식화하였다. 구체적으로 항만내에서의 저속시 조종운동을 구현할 수 있는 수학모델에 대해서 검토하였으며, 선체·프로펠러·타의 상호간섭에 대해서도 고려하였다. 또한, 수치시뮬레이션을 수행함으로써 2축2타선박의 기본적인 조종성능을 확인할 수 있었다.

* 한국해양대학교 해양시스템공학부

** 한국해양대학교 대학원 해양시스템공학과

1. 서 언

최근에 해상교통이 복잡해지고 선박의 대형화 추세에 따라 선박의 항행안전의 문제가 대두되고 이에 따라 선박의 조종성능을 향상시킬 목적으로 한 다양한 선종이 출현하고 있다. 또한, 출입항 조종운동은 단순히 선박의 조종성능만으로는 평가될 수 없으며 인간의 능력이 중요한 요소가 됨에 따라 선박조종시뮬레이터의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 배경하에 선박조종시뮬레이터의 개발에 있어서 여러 선박에 대한 데이터베이스는 필수적이라고 할 수 있다. 다양화, 대형화되고 있는 선박들에 대한 데이터베이스는 실시간 시뮬레이터의 구현, 즉 가상현실의 잇점 중의 하나인 다양성에 더욱 충실할 수 있게 하는 것이다.

우수한 추진성능을 목적으로 하는 특수선형 중에 2축2타선박의 조종운동 수학적모델에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 항만 내에서의 즉, 저속시 2축2타선박의 조종특성에 대해서는 1축1타선에 비해 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 항만 내에서의 조종운동은 일반적인 대양 항해시의 조종운동과는 달리 선박은 큰 사항각을 가지고 저속운동을 하며 수심의 영향과 바람, 조류 등 외력의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 특징이 있다. 또한 다른 선박과의 충돌을 피하고 접이안을 하기 위하여 가속, 감속, 정지, 후진 등의 다양한 운동상태를 보이며 예선을 사용하기도 한다. 그리고 2축2타선박의 선체·프로펠러·타의 상호간섭은 1축1타선에 비해 현저하게 다른 경향을 나타내고 있다. 따라서 MMG모델을 사용하여 선박의 조종운동을 추정하는 경우에는 선체·프로펠러·타의 단독성능과 함께 각각의 상호간섭의 취급 및 표현은 중요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 항만 내에서의 조종운동과 2축2타선박의 조종특성을 고려한 수학적모델에 대하여 논의하기로 한다. 구체적으로, 저속시 2축2타선박의 선체에 작용하는 유체력에 대해서 검토하고 선체·프로펠러·타의 상호간섭을 고려하기로 한다. 그리고 수치 시뮬레이션을 수행하여 2축2타선박의 기본적인 조종성능을 확인하고자 한다.

2. 시뮬레이션 수학적모델

2.1 조종운동방정식

일반적으로 선박의 조종운동방정식은 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)의 복합운동으로 표현할 수 있다. Fig. 1과 같이 선체중앙(midship)에 좌표 원점을 둔 동좌표계(moving axes system)를 $O-xyz$ 라 할 때, 평수 중에서의 조종 운동의 기본 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X \\m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\I_{zz} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N\end{aligned}\tag{1}$$

여기서 첨자 H, P, R, T, W 는 각각 주선체, 프로펠러, 타, 예선 및 바람에 기인하는 유체력 또는 외력 성분을 나타낸다. 그리고 m_x, m_y 는 x, y 축 방향의 부가질량, J_{zz} 는 z 축 방향의 부가관성모멘트, a 는 m_y 중심의 x 좌표를 나타낸다.

한편, 조류에 기인하는 유체력은 별도의 항으로써 고려할 필요없이, 식(2)의 유체력 계산에서 운동 변수로서 상대유속 즉, 대수속도를 사용함으로써 조류의 영향이 포함될 수 있다. 조류의 유속 V_c 와 유향각 ϕ_c 를 Fig. 1과 같이 정의할 때 대수속도와 대지속도의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u &= u^* + V_c \cos(\phi_c - \phi) \\
 v &= v^* + V_c \sin(\phi_c - \phi) \\
 \dot{u} &= \dot{u}^* + V_c r \sin(\phi_c - \phi) \\
 \dot{v} &= \dot{v}^* - V_c r \cos(\phi_c - \phi)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $u^*, v^*, \dot{u}^*, \dot{v}^*$ 는 대지속도와 가속도를 u, v, \dot{u}, \dot{v} 는 대수속도와 가속도를 나타낸다. 식(3)의 관계를 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) \dot{u}^* &= (m + m_y)vr + (m x_G + m_y a)r^2 \\
 &\quad - (m + m_x) V_c r \sin(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + X_H + X_P + X_R + X_T + X_W \\
 (m + m_y) \dot{v}^* + (m x_G + m_y a) \dot{r} \\
 &= - (m + m_x)ur \\
 &\quad + (m + m_y) V_c r \cos(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_W \\
 (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} + (m x_G + m_y a) \dot{v}^* \\
 &= - m x_G ur \\
 &\quad + (m x_G + m_y a) V_c r \cos(\phi_c - \phi) \\
 &\quad + N_H + N_P + N_R + N_T + N_W
 \end{aligned} \tag{4}$$

식(4)로부터 축차근사적분법을 이용하여 대지속도 \dot{u}^*, \dot{v}^* 와 회두각속도 r 을 구한 후에, 다시 적분을 수행함으로써 선위(船位)와 회두각을 계산할 수 있다.

2.2 주선체에 작용하는 유체력

항만 내에서의 조종운동은 일반적으로 선박의 전진속도가 저속인 관계로 인하여 전진속도 (u), 횡이동속도(v), 회두각속도(r)가 거의 같은 정도(程度)로써 나타나며, 접이안 시에는 횡이동속도와 회두각속도가 상대적으로 크게 나타나기도 한다. 이러한 항만 내에서 항행하는 선박의 선체에 작용하는 유체력은 일반적인 항행시 선체에 작용하는 유체력과는 다를 것이며 그 표현방법은 조종운동의 추정시 중요한 요소가 된다.

일반적으로 주선체에 작용하는 유체력의 표현방법은 3가지로 분류된다. 첫째는 다항식으로써 표현하는 방법(polynomial expression)이고, 둘째는 Fourier급수전개를 이용한 방법(Fourier series expansions)이며, 세 번째는 cross-flow 항력으로써 표현하는 방법(cross-flow drag expression)이다. 본 연구에서 채택한 방법은 Fourier급수전개에 의한 표현방법이며 Takashina와 Yumuro에 의하여 제안되었다.

(1) 선속이 0이 아닌 경우 ($V \neq 0$)

운동변수와 선체에 작용하는 유체력의 무차원화 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u', v' &= u, v / V \\ r' &= r \cdot L / V \\ X_{H'}, Y_{H'} &= X_H, Y_H / 0.5 \rho L d V^2 \\ N_{H'} &= N_H / 0.5 \rho L^2 d V^2 \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서는 주선체에 작용하는 유체력을 사향각(drift angle) β 에 대하여 Fourier급수전개를 행하여 표현하였으며 Fourier계수는 회두각속도 r 의 함수로 표현하였다. Takashina와 Yumuro에 의해 행하여진 LNGC와 VLCC의 두가지 타입의 상선에 대한 구속모형시험 결과를 이용하였다.

사향각 β 는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{v}{u} \right) \quad (6)$$

여기서 β 는 $0^\circ \sim 180^\circ$ 이다.

주선체에 작용하는 유체력은 사향각 β 에 대한 Fourier급수전개에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_{H'} &= X'(u') + \sum_k (S_k^X \sin k\beta + C_k^X \cos k\beta) \\ Y_{H'} &= \sum_k (S_k^Y \sin k\beta + C_k^Y \cos k\beta) \\ N_{H'} &= \sum_k (S_k^N \sin k\beta + C_k^N \cos k\beta) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $X'(u)$ 는 저항계수를 나타내고, S_k, C_k 는 Fourier계수를 나타내며 횡두각속도 r 의 함수로써 표현된다.

Takashina와 Yumuro는 선체에 작용하는 유체력의 표현을 위한 Fourier계수를 얻기 위하여 다양한 사항각 β 에 대해서 사항시험($r' = 0$)을 실시하였다. 그 결과, Takashina는 $S_1^Y, S_3^Y, S_5^Y, S_1^N, S_2^N, S_3^N, S_4^N$ 를 제안하였으며 Yumuro는 $S_1^Y, S_2^Y, S_3^Y, S_1^N, S_2^N, S_4^N$ 를 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 선체에 작용하는 유체력의 Fourier급수 전개에 의한 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_{H'} &= X'(u) + S_1^X \sin \beta \\ Y_{H'} &= S_1^Y \sin \beta + S_3^Y \sin 3\beta \\ N_{H'} &= S_1^N \sin \beta + S_2^N \sin 2\beta \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 2와 Fig. 3은 LNGC 모델과 VLCC모델에 작용하는 y 방향 유체력과 z 축 주위의 모멘트를 사항각 β 에 대해서 나타내고 있다. 그림에서 각 점들은 구속모형시험에서 얻어진 실험결과의 값을 나타내고 있고, 실선은 식(8)에 의해 커브 핏팅한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 식(8)은 보다 간결함에도 불구하고 실제 유체력을 표현함에 있어서 실용적이라고 할 수 있다.

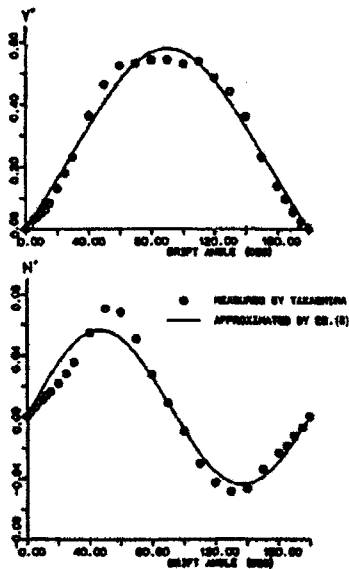


Fig. 2 Non-dimensional sway force and yaw moment on hull as the function of drift angle (2.5 m model of LNGC)

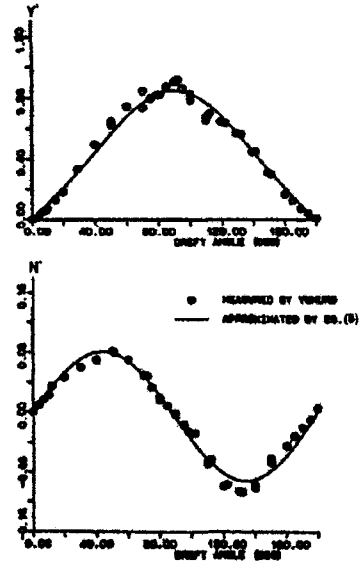


Fig. 3 Non-dimensional sway force and yaw moment on hull as the function of drift angle (4.0 m model of VLCC)

또한 Takashina는 yaw rotating 시험을 실시하여 측정데이터를 분석한 결과, $S_1^Y, S_3^Y, S_5^Y, C_1^Y, C_3^Y, S_1^N, S_2^N, S_3^N, S_4^N, C_0^N, C_1^N, C_2^N$ 를 제안하였다. 이 계수들 중에서 $S_5^Y, C_3^Y, S_3^N, S_4^N, C_1^N$ 는 매우 작은 값을 갖는다고 생각되며 본 연구에서 제안하는 Fourier급수 전개에 의한 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_{H'} &= X'(u') + S_1^X \sin \beta \\ Y_{H'} &= S_1^Y \sin \beta + S_3^Y \sin 3\beta + C_1^Y \cos \beta \\ N_{H'} &= S_1^N \sin \beta + S_2^N \sin 2\beta + C_0^N + C_2^N \cos 2\beta \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 모든 Fourier계수는 회두각속도 r' 의 함수이다. Takashina와 Yumuro의 실험결과값과 선박의 좌우비대성을 고려하여 본 연구에서는 Fourier계수를 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} S_1^X &= S_{11}^X r' \\ S_1^Y &= S_{10}^Y + S_{11}^Y |r'| \\ S_3^Y &= S_{30}^Y \\ C_1^Y &= C_{11}^Y r' + C_{12}^Y r' |r'| \\ S_1^N &= S_{10}^N \\ S_2^N &= S_{20}^N + S_{22}^N r'^2 \\ C_0^N &= C_{01}^N r' + C_{02}^N r' |r'| \\ C_2^N &= C_{21}^N r' \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $S_{10}^Y, S_{30}^Y, S_{10}^N, S_{20}^N$ 은 각각 식(8)의 $S_1^Y, S_3^Y, S_1^N, S_2^N$ 에 해당된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 LNGC 모델에 작용하는 유체력과 모멘트의 표현에 있어서 이용되는 Fourier계수를 나타내고 있다. 그림에서 각 점들은 Takashina에 의한 측정 데이터들이고 실선은 식(10)에 의해 커브 피팅한 것이다.

조종운동시 사항각 β 와 운동변수 u', v' 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} \sin \beta &= -v', & \sin 2\beta &= -2u'v' \\ \sin 3\beta &= -3v' + 4v'^3 \\ \cos \beta &= u', & \cos 2\beta &= 1 - 2v'^2 \end{aligned} \quad (11)$$

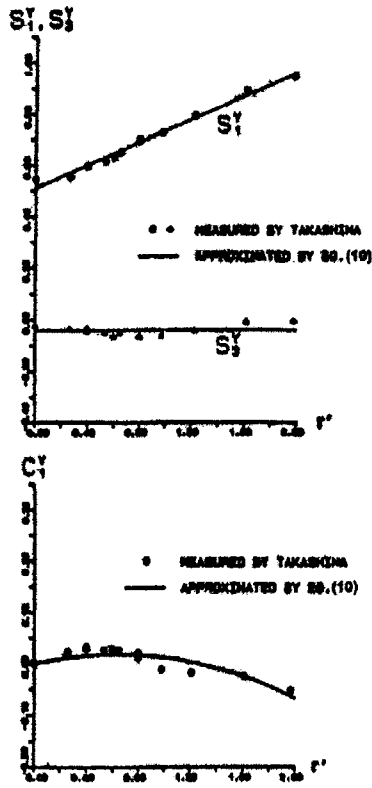


Fig. 4 Coefficients of Fourier series approximating lateral force on hull (2.5 m model of LNGC)

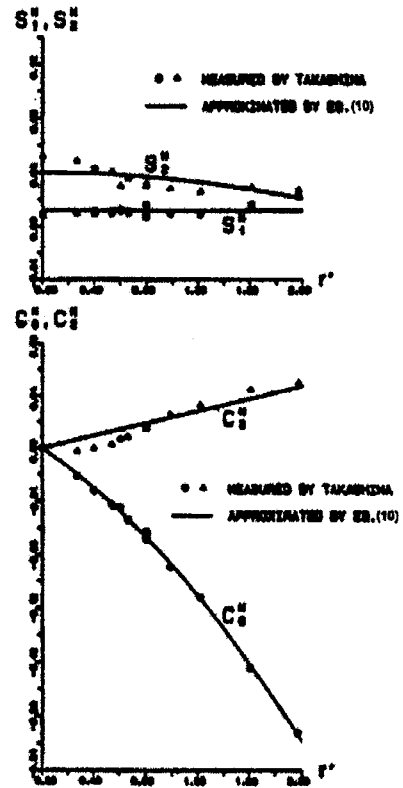


Fig. 5 Coefficients of Fourier series approximating yaw moment on hull (2.5 m model of LNGC)

식(10)과 식(11)을 식(9)에 대입하고, 식(10)의 모든 계수를 널리 쓰이고 있는 유체력미계수 표현으로 고치면, 선체유체력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 X_H' &= X'(u) + X_{vr}' v' r' \\
 Y_H' &= Y_v' v' + Y_{ur}' u' r' + Y_{vvv}' v'^3 + Y_{vr}' v' |r'| \\
 &\quad + Y_{urr}' u' r' |r'| \\
 N_H' &= N_v' v' + N_{uv}' u' v' + N_r' r' + N_{vvr}' v'^2 r' \\
 &\quad + N_{uvr}' u' v' r'^2 + N_{rr}' r' |r'|
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 식(12)의 유체력미계수와 식(10)의 Fourier계수와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_{vr}' &= -S_{11}^X, & Y_v' &= -S_{10}^Y - 3S_{30}^Y \\
Y_{ur}' &= C_{11}^Y, & Y_{vv}' &= 4S_{30}^Y \\
Y_{vr}' &= -S_{11}^Y, & Y_{urr}' &= C_{12}^Y \\
N_v' &= -S_{10}^N, & N_{uv}' &= -2S_{20}^N \\
N_r' &= C_{01}^N + C_{21}^N, & N_{vvr}' &= -2C_{21}^N \\
N_{uvr}' &= -2S_{22}^N, & N_{rr}' &= C_{02}^N
\end{aligned} \tag{13}$$

선박이 횡이동만 할 경우 즉, 사항각 $\beta = 90^\circ$ 일 때, y 방향 유체력은 선체중심에 작용할 것이고 선박의 전반부와 후반부가 대칭적이라면 N_v' 는 거의 영이 될 것이다. 실제 선박의 경우에 있어서 N_v' 는 매우 작은 값을 취하고 있으며 Takashina와 Yumuro의 실험결과에서도 증명되고 있다.

식(12)의 유체력미계수의 값은 모형실험을 통하여 구할 수 있다. 그러나 모형실험은 경제적, 시간적 부담이 되기 때문에 여러 실험결과를 회귀분석한 자료를 이용하는 것이 매우 유용할 것이다. 본 연구에서는 Inoue 추정식을 이용하기로 한다.

Inoue의 추정식을 이용하기 위해서는 v' 의 비선형항에 대한 수정이 필요하게 된다. $Y_{vv}' v'^3$ 을 $Y_{vv}' v'|v'|$ 으로 대체하게 되는데, $Y_{vv}' v'|v'|$ 이 v' 의 비선형성과 선박의 좌우 대칭성을 잘 표현하고 있기 때문에 위와 같은 수정을 하여도 조종운동시 선체의 물리적인 특성을 변하지 아니한다. 또한 $X'(u')$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$X'(u') = X_{uu}' u'|u'| \tag{14}$$

따라서 선체에 작용하는 유체력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_H &= 0.5 \rho L d V^2 \{ X_{uu}' u'|u'| + X_{vr}' v' r' \} \\
Y_H &= 0.5 \rho L d V^2 \{ Y_v' v' + Y_{ur}' u' r' + Y_{vv}' v'|v'| \\
&\quad + Y_{vr}' v'|r'| + Y_{urr}' u' r'|r'| \} \\
N_H &= 0.5 \rho L^2 d V^2 \{ N_v' v' + N_{uv}' u' v' + N_r' r' \\
&\quad + N_{vvr}' v'^2 r' + N_{uvr}' u' v' r'^2 + N_{rr}' r'|r'| \}
\end{aligned} \tag{15}$$

운동변수를 유차원화하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_H &= 0.5 \rho L d \{ X_{uv}' u |u| + X_{vr}' L v r \} \\
Y_H &= 0.5 \rho L d \{ Y_v' v V + Y_{vr}' L v r + Y_{vr}' v |v| \\
&\quad + Y_{vr}' L v |r| + Y_{urr}' L^2 u r |r| / V \} \\
N_H &= 0.5 \rho L^2 d \{ N_v' v V + N_{uv}' u v + N_r' L r V \\
&\quad + N_{vvr}' L v^2 r / V + N_{uvr}' L^2 u v r^2 / V^2 + N_{rr}' L^2 r |r| \}
\end{aligned} \tag{16}$$

식(15), (16)에서의 유체력미계수는 Inoue의 추정식을 이용하여 구할 수 있다. 그런데 Inoue의 추정식은 일반 항행시 즉, 저속시의 유체력미계수에 대한 모델이 아니라는 점에서 문제가 있을 수 있다. 그러나 Inoue 추정식으로부터 구한 유체력미계수 값과 Takashina가 수행한 대각도 운동시의 실험결과로부터 구한 유체력미계수 값 사이에 큰 차이가 없다는 것을 확인하였다.

또한 식(15), (16)은 일반 선속영역에서 저속영역의 조종운동을 추정하는데 이용될 수 있다. 즉 $u \gg v$ 인 경우에는 $u' = u/V \approx 1$ 이므로 일반 선속영역에서의 조종운동 수학 모델과 일치한다. 그러나 극단적인 후진, 횡이동 등의 경우에는 오차가 있을 것으로 사료되지만, 이 때에는 조종운동으로 인한 선박의 이동량이 작기 때문에 무난할 것으로 생각된다.

(2) 선속이 0인 경우 ($V = 0$)

선속이 0인 경우의 운동은 선박이 그 장소에서 회전운동만 하게 되므로, 이 때 선체에 작용하는 유체력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_H &= 0 \\
Y_H &= 0 \\
N_H &= 0.5 \rho L^4 d N_{rr}' r |r|
\end{aligned} \tag{17}$$

2.3 프로펠러에 기인하는 유체력

2축2타선박의 프로펠러에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
X_P &= (1 - t) (T^{(b)} + T^{(s)}) \\
Y_P &= \Delta Y_P \approx 0 \\
N_P &= (1 - t) b_p / 2 (T^{(b)} - T^{(s)}) + \Delta N_P \\
&\approx (1 - t) b_p / 2 (T^{(b)} - T^{(s)})
\end{aligned} \tag{18}$$

여기서 위 첨자 (s), (p) 은 각각 우현측(starboard side)과 좌현측(port side)을 나타내고 t 는 추력감소계수, b_p 는 프로펠러간의 거리를 나타낸다. 그리고 $\angle Y_P$ 와 $\angle N_P$ 는 프로펠러 회전에 의한 불평형유체력 성분을 나타내며, 2축2타선박에 있어서는 양쪽의 주기관이 동일회전수로 정회전 또는 역회전하는 경우 서로 상쇄되기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않기로 한다.

따라서 2축2타선박의 프로펠러에 기인하는 유체력은 우현측과 좌현측의 추력을 각각 계산하여 구하면 된다. 각각의 추력은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 다음과 같이 4가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

- ① $u \geq 0$, $n \geq 0$, ② $u \geq 0$, $n \leq 0$
 ③ $u \leq 0$, $n \geq 0$, ④ $u \leq 0$, $n \leq 0$

①,②는 정상적인 전진 상태와 감속 또는 정지 조종시의 경우를 나타낸다. ③,④는 각각 후진으로부터 전진 방향으로 가속하는 상태와 정상적인 후진 상태를 나타낸다. ①~④와 같이 가속, 감속 및 후진 등의 광범위한 프로펠러 하중도(荷重度)하에서의 프로펠러의 추력은 Fourier급수전개를 이용하여 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \rho C_T^* [u_P^2 + (0.7 \pi n D)^2] \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (19)$$

$$= \frac{1}{8} \rho \pi D^2 C_T^* [u_P^2 + (0.7 \pi n D)^2]$$

$$C_T^* = \sum_{k=0}^{20} [A(k) \cos \theta k + B(k) \sin \theta k] \quad (20)$$

$$= A(0) + \sum_{k=1}^{20} [A(k) \cos \theta k + B(k) \sin \theta k]$$

$$u_P = u(1 - w_P) \quad (21)$$

여기서 n 은 프로펠러 회전수(rps), D 은 프로펠러 원반의 직경, u_P 는 프로펠러에 유입하는 흐름의 평균속도를 나타낸다. 그리고 w_P 는 프로펠러 위치에서의 유효반류계수를 의미하여, Lee는 2축2타선박의 $(1 - w_P)$ 에 대해서 다음과 같은 추정식을 제안하고 있다.

i) ($u > 0$) 인 경우

$$(1 - w_P)^{(p)} = 0.6 (v_P' - v_P^*)^2 + (1 - w_{P0}) \quad (22)$$

$$(1 - w_P)^{(s)} = 0.6 (v_P' + v_P^*)^2 + (1 - w_{P0})$$

$$v_P' = -\sin \beta + x_P' r' \quad , \quad v_P^* = \left| \frac{y_P}{x_P} \right|$$

ii) ($u \leq 0$) 인 경우

$$\begin{aligned} (1 - w_p)^{(p)} &= 1 \\ (1 - w_p)^{(s)} &= 1 \end{aligned} \tag{23}$$

여기서 v_p' 는 프로펠러 위치에서의 횡방향 유속, x_p' 는 프로펠러 위치의 x 좌표, v_p^* 는 $(1 - w_p)$ 의 값이 최소가 되는 프로펠러 위치에서의 횡방향 유속을 나타내며, w_{p0} 는 정상 직진시의 w_p 값이다. 그리고 x_p, y_p 는 프로펠러 위치의 x, y 좌표를 나타낸다. Fig 6은 우현측과 좌현측의 프로펠러 위치에서의 $(1 - w_p)$ 의 값을 보여주고 있다.

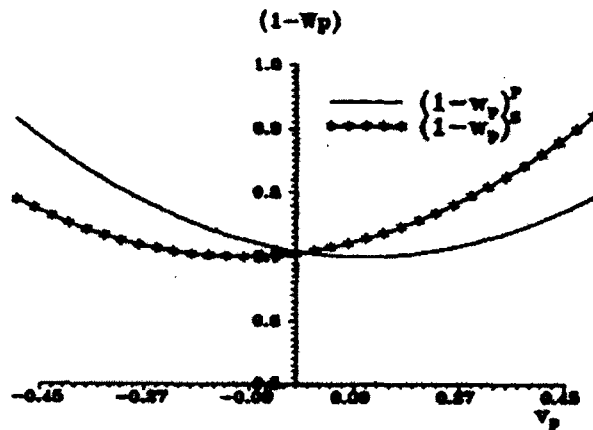


Fig. 6 $(1 - w_p)$ for port and starboard propeller

식(20)에서의 Fourier 계수 $A(k), B(k)$ 는 프로펠러 단독시험에 의해서 구하거나 van Lammeren의 실험 자료를 이용할 수 있다. θ 는 유체동역학적 피치각(hydrodynamic pitch angle)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \tan^{-1}(u_p / 0.7\pi nD) \tag{24}$$

θ 는 0° 에서 360° 까지 변화하며, 제 1상한($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)에서는 $u \geq 0, n \geq 0$, 제 2상한($90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)에서는 $u \geq 0, n \leq 0$, 제 3상한($180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$)에서는 $u \leq 0, n \leq 0$, 제 4상한($270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)에서는 $u \leq 0, n \geq 0$ 의 영역에 해당된다. 그러나 이러한 방법은 광범위한 프로펠러 하중도를 다루게 되므로, 특히 제 1상한 영역에서는 정확도가 떨어지는 경향이 있다. 따라서 가장 중요하며 높은 정도(精度)가 요구되는 제 1상한에서의 추력 계산은 다음 식을 이용한다.

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (25)$$

$$K_T = a_1 + a_2 J + a_3 J^2$$

여기서 K_T 는 추력계수로서 전진계수 J ($J = u_p / nD$)의 2차식으로 근사 표시한다(a_1 , a_2 , a_3 는 상수). K_T 는 프로펠러 단독시험에 의해서 구하거나 van Lammeren B-Screw series 프로펠러 특성으로부터 구할 수 있다. van Lammeren 방법에 의한 C_T^* , K_T 의 추정예를 Figs. 7, 8에 나타낸다.

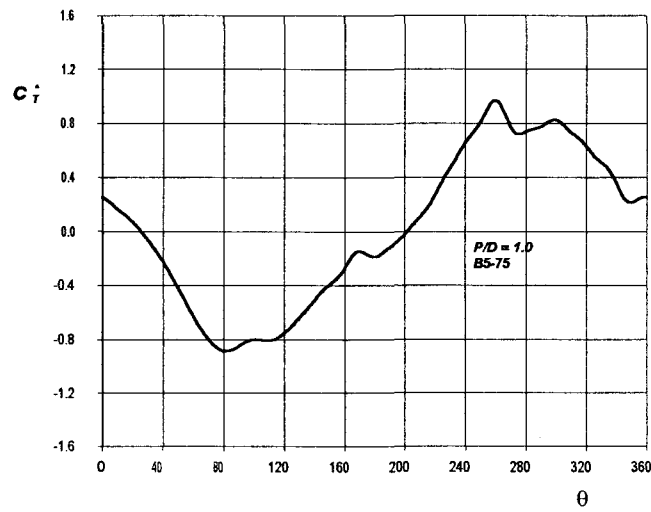


Fig. 7 Thrust coefficient C_T^* for B5-75 screw with $P/D = 1.0$ by for-quadrant measurement in open water

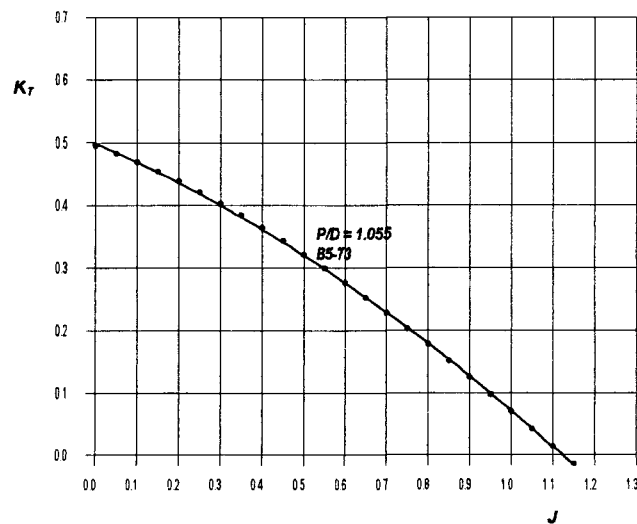


Fig. 8 Thrust coefficient K_T for B5-73 screw with $P/D = 1.055$

2.4 조타에 기인하는 유체력

2축2타선박에서 조타에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1 - t_R)(F_N^{(\phi)} + F_N^{(s)}) \sin \delta \\
 Y_R &= -(1 + a_H)(F_N^{(\phi)} + F_N^{(s)}) \cos \delta \\
 N_R &= -(x_R + a_H x_H)(F_N^{(\phi)} + F_N^{(s)}) \cos \delta \\
 &\quad - (1 - t_R) \frac{b_R}{2} (F_N^{(\phi)} - F_N^{(s)}) \sin \delta
 \end{aligned} \tag{26}$$

여기서 F_N 은 타수직력, x_R 은 타수직력의 착력점의 x 좌표, t_R , a_H 는 선체에 작용하는 타의 간섭력을 나타내는 계수, x_H 는 선체에 작용하는 타의 간섭력의 작용 위치의 x 좌표를 나타낸다. 그리고 F_N 은 다음과 같이 표시된다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 f_a \sin \alpha_R \tag{27}$$

여기서 A_R 은 타의 면적, V_R 은 타에 유입하는 흐름의 유효유입속도, α_R 은 타에 유입하는 흐름의 유효양각, f_a 는 타수직력계수의 경사이다. f_a 에 관해서는 Fujii식을 이용한다.

따라서 2축2타선박의 조타에 기인하는 유체력은 식(26), (27)을 이용하여 좌현측과 우현측의 타수직력을 각각 계산하여 구하면 된다. 식(27)에서 타에 유입하는 흐름의 유효양각 α_R 과 유효유입속도 V_R 등은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 각각 다음과 같이 표시된다.

i) $u \geq 0$, $n > 0$ 및 $s \geq 0$ 인 경우

$$\begin{aligned}
 \alpha_R &= \delta - \delta_R \quad (\text{단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ) \\
 V_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \\
 u_R &= \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta \kappa)s + \{1 - \eta \kappa(2 - \kappa)\}s^2} \\
 v_R &= u_R \tan \delta_R \\
 \varepsilon &= (1 - w_R) / (1 - w_P) \quad , \quad \kappa = 0.6 / \varepsilon \\
 w_R &= w_{R0} \cdot w_P / w_{P0} \\
 \eta &= D / H_R \\
 s &= 1 - u_P / (nP)
 \end{aligned} \tag{28}$$

ii) $u \geq 0$, $n \geq 0$ 및 $s < 0$ 인 경우 u_R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$u_R = u(1 - w_R) \quad (29)$$

iii) $u \geq 0$ 및 $n < 0$ 인 경우

$$V_R \approx 0 \quad (30)$$

iv) $u < 0$ 및 $n > 0$ 인 경우 u_R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$u_R = u + 0.6\sqrt{\eta} nP \quad (\text{단, } u_R \geq 0) \quad (31)$$

v) $u < 0$ 및 $n \leq 0$ 인 경우

$$\begin{aligned} V_R &= \sqrt{u^2 + (v + l_R r)^2} \\ \alpha_R &= -\delta + \tan^{-1}\left(\frac{v + l_R r}{|u|}\right) \quad (\text{단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ) \end{aligned} \quad (32)$$

여기서 w_R 은 타 위치에서의 유효반류계수, w_{R0} 는 정상 직진시의 w_R 값이다. s 는 프로펠러 슬립비, H_R 은 타의 높이, P 는 프로펠러 핏치를 나타낸다.

식(28)에서 δ_R 은 조종운동중 타수직력이 영(zero)이 되는 타각으로서, Lee는 CMT 실험 결과를 토대로 2축2타선박에 대해 다음과 같은 추정모델을 제안하였다.

i) $\beta_R \geq 0$ 인 경우

$$\begin{cases} \delta_R^{(p)} = 0.4\beta_R + \tan^{-1}\left|\frac{y_R}{x_R}\right| \\ \delta_R^{(s)} = 0.6\beta_R - \tan^{-1}\left|\frac{y_R}{x_R}\right| \end{cases} \quad (33)$$

ii) $\beta_R < 0$ 인 경우

$$\begin{cases} \delta_R^{(p)} = 0.6\beta_R + \tan^{-1}\left|\frac{y_R}{x_R}\right| \\ \delta_R^{(s)} = 0.4\beta_R - \tan^{-1}\left|\frac{y_R}{x_R}\right| \end{cases} \quad (34)$$

$$\beta_R = \beta - l_R' r'$$

여기서 β_R 은 타 위치에서의 기하학적 횡류각, l_R' 는 선체의 무게중심으로부터 타 중심까지의 무차원화된 수평거리를 나타낸다. 그리고 식(33)을 Fig. 9에 나타낸다.

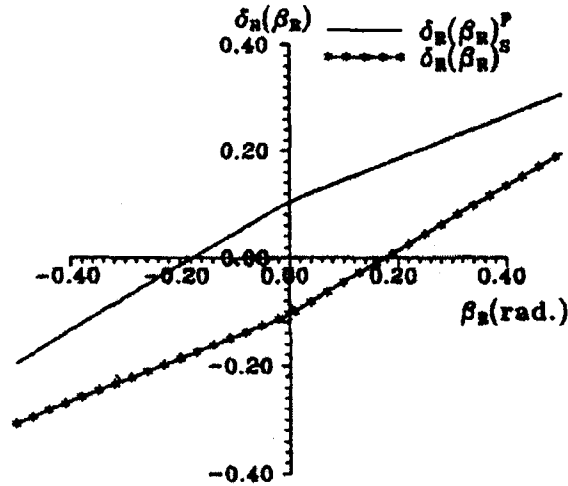


Fig. 9 δ_R for port and starboard rudder

2.5 풍압력과 예항력

바람에 의한 힘과 모멘트는 Isherwood의 회귀분석에 의한 추정식을 이용하여 구한다. Isherwood 추정식에서 얻어지는 계수를 C_X , C_Y , C_N 이라 하면 바람에 의한 힘과 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_W &= C_X(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_T \\
 Y_W &= C_Y(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L \\
 N_W &= C_N(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L L_{OA}
 \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{pmatrix} C_X \\ C_Y \\ C_N \end{pmatrix} = \sum_{j=0}^5 \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \\ C_j \end{pmatrix} \cdot I_j + \begin{pmatrix} A_6 \cdot M \\ B_6 \cdot A_{SS} / A_L \\ 0 \end{pmatrix} \tag{36}$$

단, $I_0 = 1.0$, $I_1 = 2A_L / L_{OA}^2$, $I_2 = 2A_T / B^2$
 $I_3 = L_{OA} / B$, $I_4 = S / L_{OA}$, $I_5 = C / L_{OA}$

- L_{OA} : Length overall
- A_L : Lateral projected area
- A_T : Transverse projected area
- A_{SS} : Lateral projected area of superstructure
- S : Length of perimeter of lateral projection of vessel
excluding waterline and slender bodies such as masts and ventilaters
- C : Distance from bow of centroid of lateral projected area
- M : Number of distinct groups of masts or kingposts seen in lateral projection

여기서 A_j , B_j , C_j 는 Isherwood에 의해서 주어지는 계수이다.

상대풍속 V_A 와 상대풍향각 ϕ_A 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 V_A^2 &= \sqrt{u_A^2 + v_A^2} \quad , \quad \phi_A = \tan^{-1}(v_A / u_A) \\
 u_A &= V_A \cos \phi_A = u^* + V_W \cos(\phi_W - \phi) \\
 v_A &= V_A \sin \phi_A = v^* + V_W \sin(\phi_W - \phi)
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

여기서 V_W , ϕ_W 는 절대풍속과 절대풍향각을 나타낸다.

다음으로 예선에 의한 저항력과 모멘트는 다음과 같이 계산된다. 예선의 배치를 Fig. 10과 같이 상정하고 고정점에서 저항력이 일정한 방향으로만 작용하는 것으로 가정할 때, X_T , Y_T , N_T 는 다음과 같다.

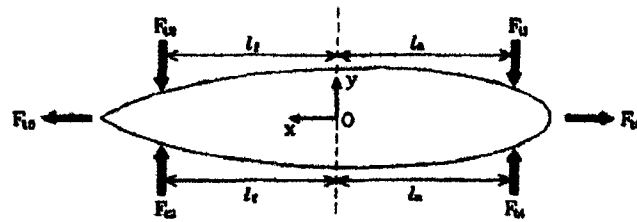


Fig. 10 Layout of tug forces

$$\begin{aligned}
 X_T &= F_{t5} - F_{t6} \\
 Y_T &= -F_{t1} - F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} \\
 N_T &= (F_{t1} - F_{t4}) l_a + (F_{t3} - F_{t2}) l_f
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

여기서 F_{t1} , F_{t2} , ...는 예선의 추력을 나타내며, l_a 와 l_f 는 각각 $0.4L$ 로 취한다.

2.6 주기관 회전수 및 조타기의 응답 모델

엔진 텔레그래프의 명령 회전수에 대해 주기관 회전수는 다음과 같이 응답하는 것으로 가정한다. 즉, 기본적으로는 1차 지연 요소의 전달 특성을 상정하고, 만약 명령 회전수가 그 당시 선속에 상응하는 유전(idling) 회전수보다 낮은 경우에는 유전하는 것으로 생각한다. 따라서 수학모델은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_M \dot{n} + n = \begin{cases} n^* & : (n^* < 0 \text{ or } n_i < n^*) \\ n_i & : (0 \leq n^* \leq n_i) \end{cases} \quad (39)$$

여기서 T_M 은 시정수, n^* 는 명령 회전수, n_i 는 유전 회전수를 나타낸다. 그리고 유전 회전수는 슬립비 0일 때의 프로펠러 회전수에 주기관 및 축계 등의 마찰 토오크를 고려하여 다음 식으로 근사 표시된다.

$$n_i \approx \frac{0.7 u (1 - w_P)}{P} \quad (40)$$

조타기의 응답 모델은 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} T_E \dot{\delta} + \delta &= \delta^* \\ &: (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \\ \dot{\delta} &= \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \\ &: (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \end{aligned} \quad (41)$$

3. 조종 성능의 확인

본 연구에서 제안된 수학모델을 이용하여 2축2타선박의 수치시뮬레이션을 수행하였다. 대상 선형은 기존의 SR-108 컨테이너운반선을 2축2타선박으로 가정한 선박으로서, 기본제원은 Table. 1과 같다. 수치시뮬레이션을 수행하여 얻은 2축2타선박의 조종운동 추정결과를 Figs. 11~19에 나타낸다.

Table. 1 Principal dimensions of Twin-propeller Twin-rudder ship

Hull			
Length over all	LOA	(m)	188.0
Length bet. per.	L _{pp}	(m)	175.0
Breadth	B	(m)	25.4
Depth	D	(m)	15.4
Draft	d	(m)	8.5
Trim	τ	(m)	1.0
Block coef.	C _B		0.559
Prismatic coef.	C _P		0.58
Distance between 2 propellers			0.3B
Angle of bossing to horizontal		(deg)	90
Radius of gyration about z-axis			0.24
	k_z / L_{pp}		
Longitudinal center of gravity from midship			-0.018
	x_G / L_{pp}		
Rudder			
Area	A _R	(m ²)	13.345×2
Height	H	(m)	5.44
Aspect ratio	λ		1.833
Area ratio	A _R /Ld		1/55.73
Propeller			
Diameter	D	(m)	4.6
Pitch Ratio	P/D		1.055
Expanded area ratio			0.73
Number of Blades			5
Turning direction (looking from stern)			outboard

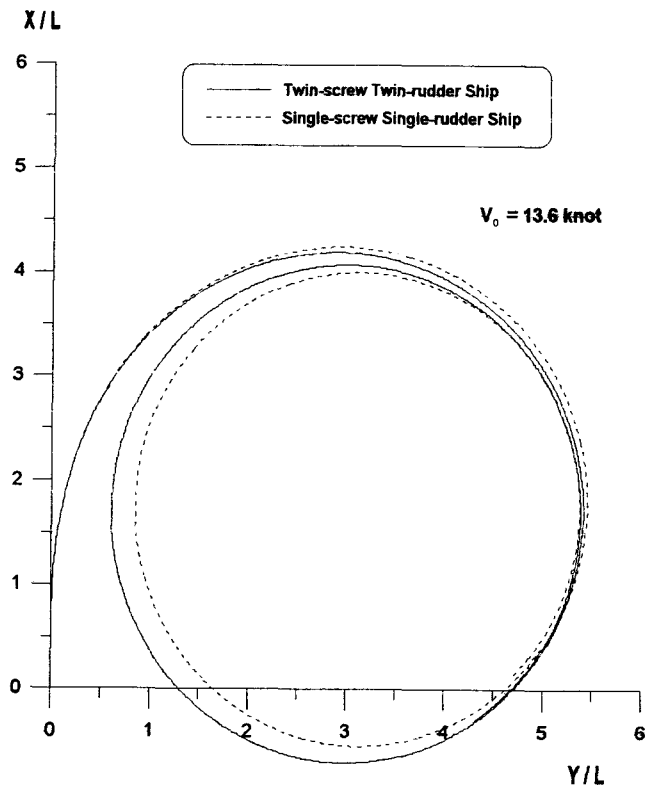


Fig. 11 Conventional turn

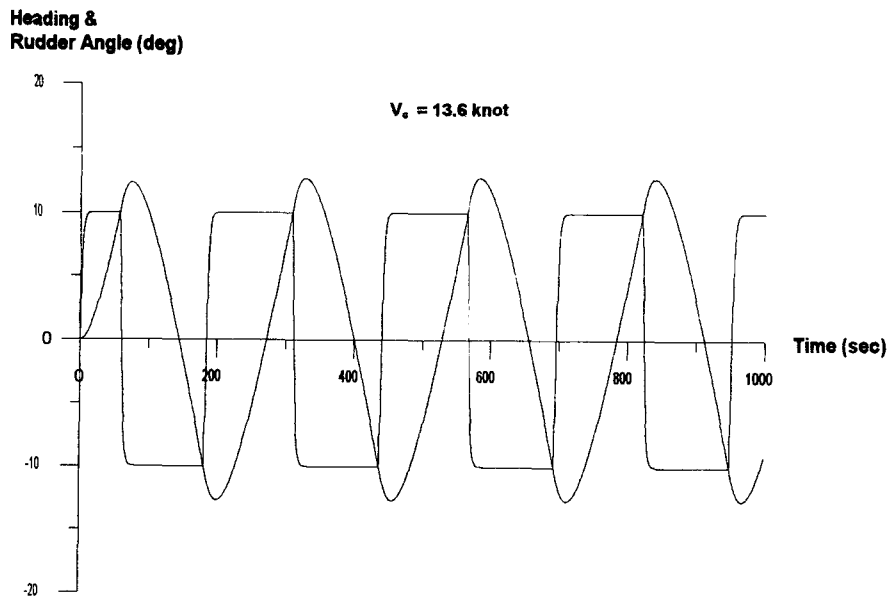


Fig. 12 $10^\circ / 10^\circ$ Zigzag maneuver

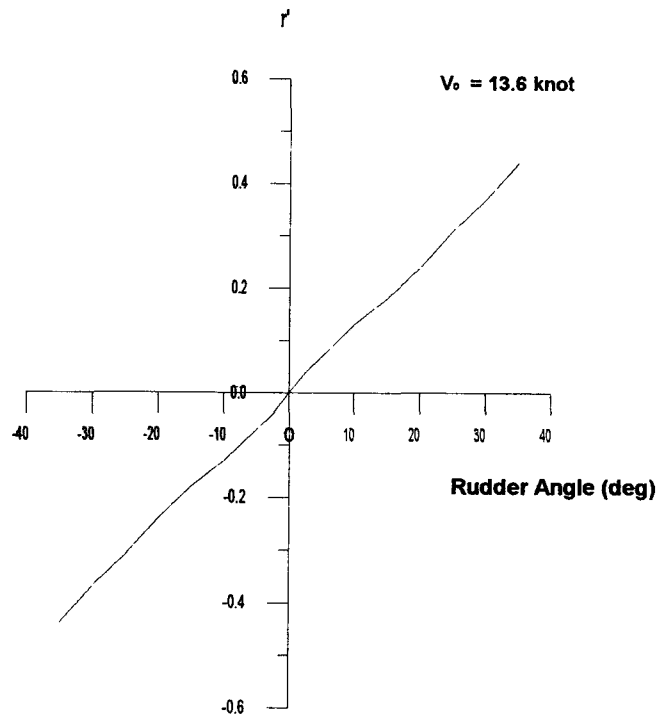


Fig. 13 Turning characteristics

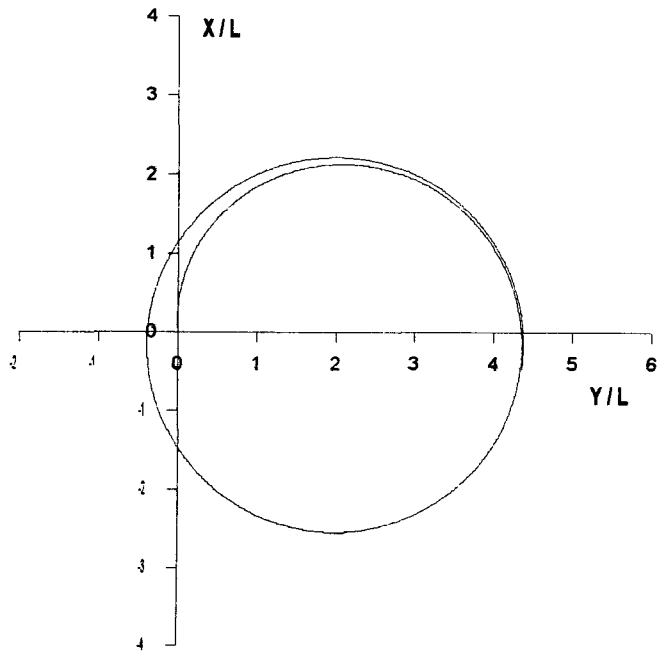


Fig. 14 Accelerating turn

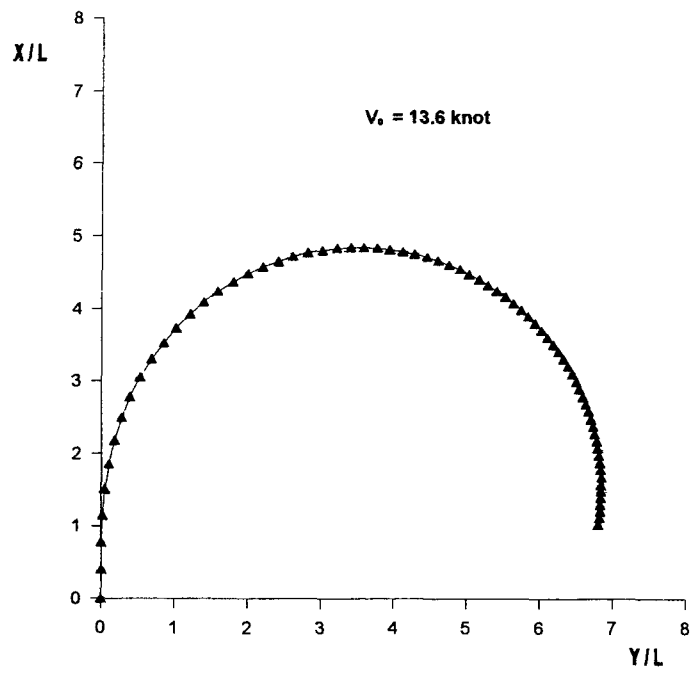


Fig. 15 Coasting turn

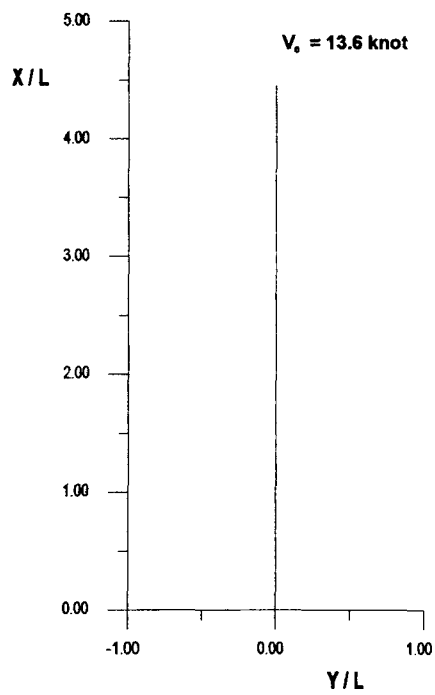


Fig. 16 Stopping distance

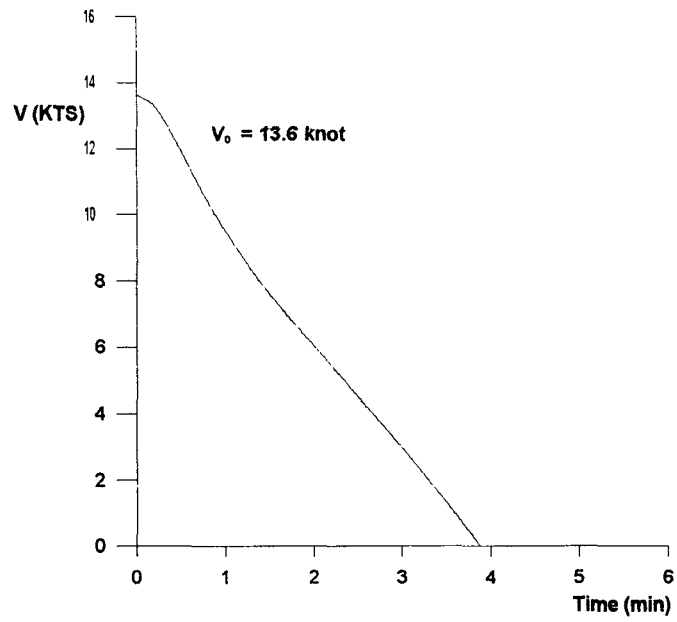


Fig. 17 Stopping time

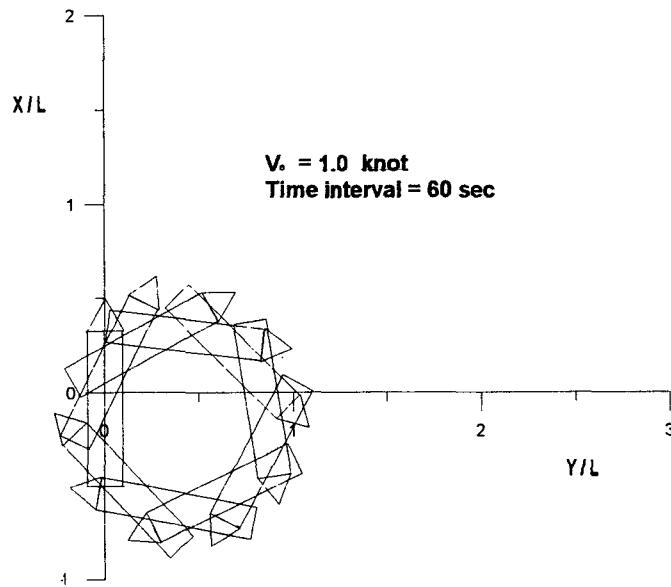


Fig. 18 Simulation on turning operation
by both bow and stern tugs

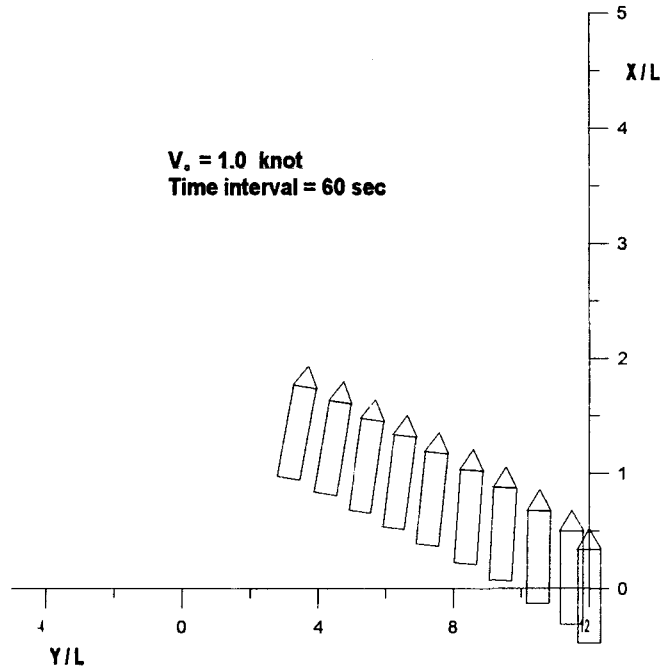


Fig. 19 Simulation on lateral shifting operation by both bow and stern tugs

4. 결 언

본 연구에서는 시뮬레이터 구축을 위한 2축2타선박의 조종운동 수학적모델에 대해서 논의하였다. 또한 수치시뮬레이션을 수행하여 조종운동을 추정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 제안된 수학적모델은 2축2타선박의 출입항 조종운동을 추정하는데 유용할 것이며, 일반 선속영역까지의 조종운동을 포함할 수 있다.
- (2) 프로펠러에 기인하는 유체력과 타에 기인하는 유체력은 우현측과 좌현측을 각각 고려하여 표현할 수 있다.
- (3) 2축2타선박의 선체와 타의 상호간섭력은 1축1타선과는 달리 표현해야 한다.
- (4) 제안된 수학적모델을 시뮬레이터에 적용시킴으로써 다양한 선박에 대한 데이터베이스가 가능할 것이라고 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Takashina, J., "Ship Maneuvring Motion due to Tugboats and Its Mathematical Model", Naval Architecture and Ocean Engineering, Japan, Vol.25, 1987.
- [2] Yumuro, A., "Some Experiments on Manoeuvring Hydrodynamic Forces in Low Speed Condition", Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.209, 1988
- [3] 손경호, "Hydrodynamic Forces and Maneuvering Characteristics of Ships at Low Advane Speed", 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, 1992.
- [4] 이승진, et al., "Research on the Prediction of Maneuvering Motion for a Twin-screw Twin-rudder Ship", 대한조선학회논문집, 제33권, 제4호, 1996.
- [5] 손경호, et al., "출입항 조종의 실시간 시뮬레이션 기법 및 부산항에의 적용에 관한 연구", 해양안전학회지, 제3권, 2호, 1997.