

論 文

출입항 조종의 실시간 시뮬레이션 기법 및 부산항에의 적용에 관한 연구

손 경 호* · 이 성 옥** · 배 정 철***

A Study on Real Time Simulation of Harbour Manoeuvre and Its Application to Pusan Harbour

Kyoung-Ho Sohn · Sung-Wook Lee · Jeong-Cheul Bae

< 목 차 >	
Abstract	4. 기본 조종 성능의 확인
1. 서 언	(1) 변침 성능
2. 시뮬레이션 수학적모델	(3) 피항 성능
2.1 조종 운동의 정식화	(3) 예선에 의한 횡이동 성능
2.2 주선체에 작용하는 유체력	(4) 예선에 의한 선회 성능
2.3 프로펠러에 기인하는 유체력	(5) 조종 성능에 미치는 외력의 영향
2.4 조타에 기인하는 유체력	5. 실시간 시뮬레이션 기법 및 부산항에의 적용
2.5 풍압력과 예항력	6. 결 언
2.6 주기관 회전수 및 조타기의 응답 모델	참고문헌
3. 유체력 제 계수의 추정법	

Abstract

This paper deals with desktop simulator which can be utilized for total assessment of safety in harbour manoeuvre on a personal computer.

Current, wind and tug forces are treated as well as precise mathematical model of a ship for low advance speed including stopping behaviour with effect of water depth.

By using the desktop simulator, the real time simulation of berthing and unberthing manoeuvres was

* 정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

** 한국해양대학교 대학원

*** 삼양무선공업주식회사

applied to Pusan harbour as an example.

It is concluded that the above simulation technique will be beneficial to assessment of ship's safety under the environmental conditions in harbour area.

1. 서 언

최근 선박의 대형화, 전용화 추세에 따라, 조종 성능은 또한 다양화, 특수화 경향을 보이고 있다[1]. 이러한 특정 선박, 이를 운항하는 인간, 환경으로서의 항만, 이들 3요소 사이의 적응 관계를 확인하는 문제 또는 종합적 운항 안전성 확보를 평가하는 문제가 아주 중요하게 되었다[2].

특히 항만내에서의 조종 운동의 특징은, 일반 조종 운동과는 달리, 전진속도가 저속이므로 전진속도, 횡이동속도, 회두각속도가 거의 같은 정도(程度)로써 나타나며, 수심의 영향과 조류, 바람 등 외력의 영향이 상대적으로 크게 나타난다. 또한 타선박과의 충돌을 피하기 위하여 가속, 감속, 정지, 후진 등 다양하게 주기관을 사용하며, 접이안할 때에는 예선을 사용하기도 한다.

출입항 조종의 안전성을 평가할 때에는, 항만내에서의 특수한 조종 성능 뿐만 아니라 주어진 환경 조건하에서 선박을 조종하는 인간의 능력도 중요한 요소가 된다. 따라서 인간-기계계(man-machine system) 해석을 위한 도구로서 선박 조종 시뮬레이터의 필요성이 대두되며, 이를 이용하여 항해사의 반복 훈련이나 출입항 가능한 선박의 크기 또는 항만 배치 등의 결정을 보다 효과적으로 수행할 수 있다[2].

본 연구에서는 항만내에서 출입항 조종의 안전성 평가를 목적으로, 실험실에서 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 실제의 출입항 조종 현상을 재현할 수 있는, 데스크탑형 시뮬레이터에 관해서 논의한다. 구체적으로, 항만내에서의 저속시 조종 운동을 구현할 수 있는 수학적모델에 대해서 검토하며, 이 수학적 모델을 이용하여 특정 선박의 기본 조종 성능을 확인하고, 특정 항만내에서의 출입항 조종의 실시간 시뮬레이션 기법 및 부산항에의 적용에 관해서 소개한다.

2. 시뮬레이션 수학적모델

2.1 조종 운동의 정식화

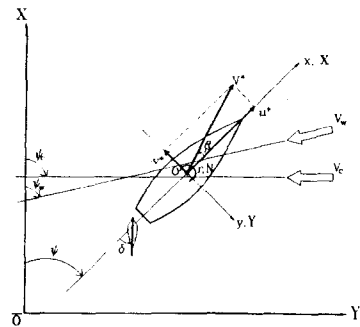


Fig. 1 Coordinate system

일반적으로 선박의 조종 운동 방정식은 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)의 복합 운동으로 표현할 수 있다. Fig. 1과 같이 선체중앙(midship)에 좌표 원점을 둔 동좌표계를 $O-xyz$ 라 할 때, 평수중에서의 조종 운동의 기본 방정식은 다음과 같이 표시된다[3].

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

여기서 m 은 선체의 질량이고, I_{zz} 는 z 축 주위의 관성모멘트이다. u, v, r 은 각각 선체중앙에서의 x 축 방향 속도 성분, y 축 방향 속도 성분, z 축 주위의 각속도 성분이다. $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 는 각각 u, v, r 의 시간에 대한 1차 도함수이고, x_G 는 무게중심의 x 좌표이다. X, Y, N 은 각

각 x , y 축 방향 유체력과, z 축 주위의 유체력 모멘트이다.

식(1)의 유체력중 부가질량력[4]을 좌변에 고려하고, 우변에는 부가질량력을 제외한 유체력으로서 MMG모델[3]을 적용하면 조종 운동 수학모델은 다음과 같이 표시된다. 단, 관례에 따라 Munk 모멘트 등 일부 부가질량력은 우변의 유체력항에 포함시킨다.

$$\begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr - (mx_G + m_y\alpha)r^2 \\ = X_H + X_P + X_R + X_T + X_W \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur + (mx_G + m_y\alpha)\dot{r} \\ = Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_W \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} + (mx_G + m_y\alpha)\dot{v} + mx_Gur \\ = N_H + N_P + N_R + N_T + N_W \end{aligned} \quad (2)$$

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, α 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.

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

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

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

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

2.2 주선체에 작용하는 유체력

항만내에서의 선박 조종은 가속, 감속, 정지, 후진 등 다양한 모드의 운동을 포함할 수 있으므로, 일반 조종 운동 수학모델은 사용할 수 없으며, 저속시의 수학모델을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 저속시의 모델로서 문헌[5]의 결과를 이용한다.

(1) 선속이 0이 아닌 경우($V \neq 0$)

$$\begin{aligned}
 X_H &= \frac{1}{2} \rho L d V^2 \{ X_{uv}' u' | u' | + X_{vr}' v' r' \} \\
 Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d V^2 \{ Y_v' v' + Y_{uv}' u' r' \\
 &\quad + Y_{vr}' v' | v' | \\
 &\quad + Y_{vr}' v' | r' | \\
 &\quad + Y_{uvr}' u' r' | r' | \} \dots\dots\dots (5) \\
 N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \{ N_v' v' \\
 &\quad + N_{uv}' u' v' + N_r' r' + N_{uvr}' v' r' \\
 &\quad + N_{uvr}' u' v' r'^2 + N_{rr}' r' | r' | \}
 \end{aligned}$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, L 과 d 는 각각 선체 길이(수선간장)와 평균홀수이다. 그리고 운동변수와 유체력의 무차원화 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u', v' &= u, v / V, \quad r' = r(L/V) \\
 X', Y' &= X, Y / \frac{1}{2} \rho L d V^2, \quad \dots\dots\dots (6) \\
 N' &= N / \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2
 \end{aligned}$$

(2) 선속이 0인 경우($V = 0$)

선속이 0인 경우의 운동은 선박이 그 장소에서 회전운동만 하게 되므로, 이때 선체에 작용하는 유체력은 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X_H &= 0 \\
 Y_H &= 0 \quad \dots\dots\dots (7) \\
 N_H &= \frac{1}{2} \rho L^4 d N_{rr}' | r |
 \end{aligned}$$

2.3 프로펠러에 기인하는 유체력

프로펠러에 기인하는 유체력은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 다음과 같이 4가지 경우로 나누

어 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 가속 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 프로펠러에 의한 유체력 X_P 는 Fourier 급수전개를 이용하여 다음과 같이 표시될 수 있다[6].

$$\begin{aligned}
 X_P &= \frac{1}{2} \rho (1-t) C_T^* [u_P^2 \\
 &\quad + (0.7 \pi n D)^2] \frac{1}{4} \pi D^2 \\
 &= \frac{1}{8} \rho \pi D^2 (1-t) C_T^* [u_P^2 \\
 &\quad + (0.7 \pi n D)^2] \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_T^* &= \sum_{k=0}^{20} [A(k) \cos \theta k + B(k) \sin \theta k] \\
 &= A(0) + \sum_{k=1}^{20} [A(k) \cos \theta k \\
 &\quad + B(k) \sin \theta k] \quad \dots (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_P &= u(1-w_P) \\
 w_P &= w_{P0} \exp\{-4.0 (v' + x_P' r')^2\} : (u > 0) \\
 w_P &= 0 : (u \leq 0) \quad \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

여기서 t 는 추력감소계수, n 은 프로펠러 회전수 (rps), D 는 프로펠러 원반의 직경, u_P 는 프로펠러에 유입하는 흐름의 평균속도를 나타낸다. w_P 는 프로펠러 위치에서의 유효반류계수, w_{P0} 는 정상 직진시의 w_P 값이다. x_P' 는 프로펠러 위치의 x 좌표의 무차원치를 나타낸다. Fourier 계수 $A(k)$, $B(k)$ 는 프로펠러 단독시험에 의해서 구하거나 van Lammeren[6]의 실험 자료를 이용할 수 있다. θ 는 유체동역학적 피치각(hydrodynamic

pitch angle)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \tan^{-1}(u_p/0.7\pi nD) \dots\dots\dots(11)$$

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 영역에서 정확도가 떨어지는 경향이 있다. 따라서 가장 중요하며 높은 정도(精度)가 요구되는 제 1상한에서의 추력 계산은 다음 식을 이용한다.

$$X_P = (1 - t)K_T \rho n^2 D^4 \dots\dots\dots(12)$$

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

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 특성[6]으로부터 구할 수 있다. van Lammeren 방법에 의한 C_T^* , K_T 의 추정 예를 Figs. 2, 3에 나타낸다.

다음으로 프로펠러 회전에 의한 횡방향 유체력 Y_P 와 회두모멘트 N_P 는 다음과 같이 표시된다.

$$Y_P = \rho n^2 D^4 Y_P^* \dots\dots\dots(13)$$

$$N_P = \rho n^2 D^4 L N_P^*$$

여기서 유체력계수 Y_P^*, N_P^* 는 제 2상한 ($u \geq 0, n \leq 0$) 영역에서만 고려되며, J_S ($J_S = u/nP$)의 함수로써 정리될 수 있다. 프로

펠러 회전에 의한 횡방향 유체력과 회두모멘트까지 제 2상한에서만 고려되는 이유는, 프로펠러의 역회전에 의해서 선미 부분이 프로펠러 후류의 영향을 받게 되며 선체 좌우현에서의 비대칭 압력에 의해 불평형 유체력이 발생되기 때문이다. 그리고 J_S 의 함수로써 표시한 Y_P^*, N_P^* 의 크기와 경향은 선미 형상에 따라서 약간 차이가 난다. 컨테이너 선형에 대한 Y_P^*, N_P^* 의 추정 예로서 Fujino의 실험 결과[7]를 Fig. 4에 보인다.

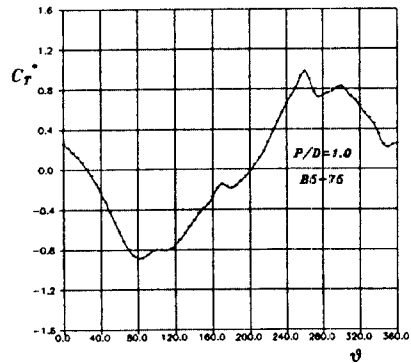


Fig. 2 Thrust coefficient C_T^* for B5-75 screw with $P/D = 1.0$ by four-quadrant measurement in open water

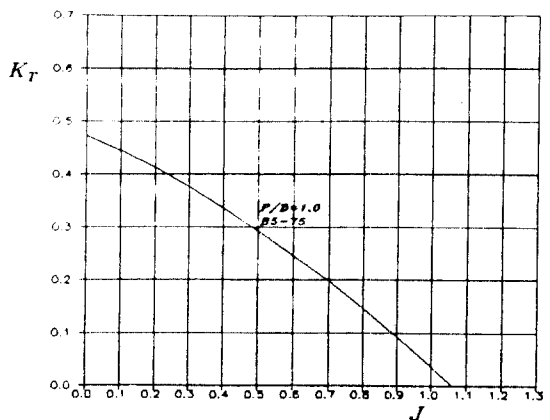


Fig. 3 Thrust coefficient K_T for B5-75 screw with $P/D = 1.0$

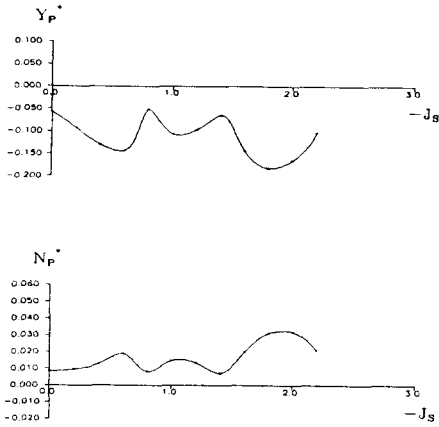


Fig. 4 Unbalanced hydrodynamic forces for container ship model[7]

2.4 조타에 기인하는 유체력

일반적으로 조타에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \quad \dots\dots\dots (14) \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned}$$

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.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 f_a \sin \alpha_R \quad \dots\dots\dots (15)$$

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 Fujii[8]식을 이용한다. 식(15)에서

타에 유입하는 흐름의 유효양각 α_R 과 유효유입속도 V_R 등은 선속과 프로펠러 회전 방향에 따라 각각 다음과 같이 표시된다[9][10].

① $u \geq 0$, $n > 0$ 및 $s \geq 0$ 인 경우

$$\begin{aligned} \alpha_R &= \delta - \tan^{-1}(v_R/u_R) \quad (\text{단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ) \\ V_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \\ u_R &= \epsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta k)s + (1 - \eta k(2 - k))s^2} \\ v_R &= -\gamma_R(v + l_R r) \\ \epsilon &= (1 - w_R)/(1 - w_P) \quad , \quad k = 0.6/\epsilon \\ w_R &= w_{R0} w_P / w_{P0} \\ \eta &= D/H_R \\ s &= 1 - u_P/(nP) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (16)$$

② $u \geq 0$, $n \geq 0$ 및 $s < 0$ 인 경우 u_R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$u_R = u(1 - w_R) \quad \dots\dots\dots (17)$$

③ $u \geq 0$ 및 $n < 0$ 인 경우

$$V_R \approx 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

④ $u < 0$ 및 $n > 0$ 인 경우 u_R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$u_R = u + 0.6\sqrt{\eta} n P \quad (\text{단, } u_R \geq 0) \quad \dots\dots\dots (19)$$

⑤ $u < 0$ 및 $n \leq 0$ 인 경우

$$\begin{aligned} V_R &= \sqrt{u^2 + (v + l_R r)^2} \\ \alpha_R &= -\delta + \tan^{-1}\left(\frac{v + l_R r}{|u|}\right) \quad \dots\dots\dots (20) \\ & \quad (\text{단, } |\alpha_R| \leq 35^\circ) \end{aligned}$$

여기서 w_R 은 타(舵) 위치에서의 유효반류계수,

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

2.5 풍압력과 예향력

바람에 의한 힘과 모멘트는 Isherwood의 회귀분석에 의한 추정식[11]을 이용하여 구한다. Isherwood 추정식에서 얻어지는 계수를 C_X, C_Y, C_N 이라 하면 바람에 의한 힘과 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_W &= C_X(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_T \\ Y_W &= C_Y(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L \quad \dots (21) \\ N_W &= C_N(\psi_A) \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_L L_{OA} \end{aligned}$$

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

단, $I_0 = 1.0, I_1 = 2A_L/L_{OA}^2, I_2 = 2A_T/B^2$
 $I_3 = L_{OA}/B, I_4 = S/L_{OA}, I_5 = C/L_{OA}$
 (22)

여기서 A_j, B_j, C_j 는 Isherwood에 의해서 주어지는 계수이다. 기호 I_j 의 의미와 계산에 필요한 자료의 예를 Table 1에 나타낸다. 이 자료는 제 4장에서 언급하는 중형 컨테이너선(Table 2 참조)에 대한 것이며, 이 선박의 종, 횡방향 투시도를 Fig. 5에 나타낸다. 그리고 상대풍속 V_A 와 상대풍향각 ψ_A 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} V_A^2 &= \sqrt{u_A^2 + v_A^2}, \\ \psi_A &= \tan^{-1}(v_A / u_A) \quad \dots (23) \\ u_A &= V_A \cos \psi_A \\ &= u^* + V_W \cos(\psi_W - \psi) \\ v_A &= V_A \sin \psi_A = v^* + V_W \sin(\psi_W - \psi) \end{aligned}$$

여기서 V_W, ψ_W 는 절대풍속과 절대풍향각을 나타낸다(Fig. 1참조).

Table 1의 자료를 이용하여 중형 컨테이너선에 대한 풍압력계수 C_X, C_Y, C_N 의 계산 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

Table 1 Values of parameters used to predict wind force on container ship

L_{OA}/L	1.078	S/L_{OA}	1.593
A_L/Ld	1.553	C/L_{OA}	0.507
A_T/Ld	0.351	M	1
A_{SS}/A_L	0.384	ρ_A/ρ	0.0012

- 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

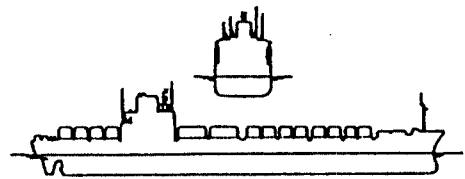


Fig. 5 Projected plan of container ship

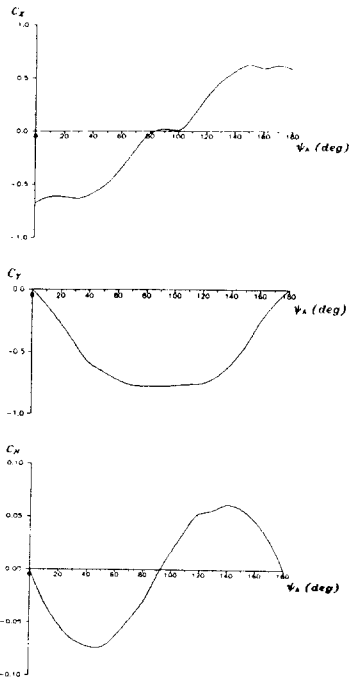


Fig. 6 Wind force coefficients for container ship

다음으로 예선에 의한 예항력과 모멘트는 다음과 같이 계산된다. 예선의 배치를 Fig. 7과 같이 상정하고 고정점에서 예항력이 일정한 방향으로만 작용하는 것으로 가정할 때, X_T , Y_T , N_T 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_T &= F_{15} - F_{16} \\ Y_T &= -F_{11} - F_{12} + F_{13} + F_{14} \quad \dots (24) \\ N_T &= (F_{11} - F_{14})l_a + (F_{13} - F_{12})l_f \end{aligned}$$

여기서 F_{11} , F_{12} , ...는 예선의 추력을 나타내며, l_a 와 l_f 는 각각 $0.4L$ 로 취한다.

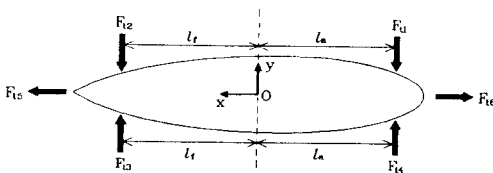


Fig. 7 Layout of tug forces

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[12]. 따라서 수학모델은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_n \dot{n} + n = \begin{cases} n^* & : (n^* < 0 \text{ or } n_i < n^*) \\ n_i & : (0 \leq n^* \leq n_i) \end{cases} \quad \dots (25)$$

여기서 T_n 은 시정수, n^* 는 명령 회전수, n_i 는 유전 회전수를 나타낸다. 그리고 유전 회전수는 슬립비 0 일 때의 프로펠러 회전수에 주기관 및 축계 등의 마찰 토크를 고려하여 다음 식으로 근사 표시된다[12].

$$n_i \approx \frac{0.7u(1-w_p)}{P} \quad \dots (26)$$

조타기의 응답 모델은 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} T_E \dot{\delta} + \delta &= \delta^* \\ &: (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \\ \dot{\delta} &= \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \\ &: (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \end{aligned} \quad \dots (27)$$

여기서 δ^* 는 명령 타각, T_E 는 시정수, $\dot{\delta}_{\max}$ 는 최대 타각속도를 나타낸다.

3. 유체력 제 계수의 추정법

제 2장에서 언급한 저속시 모델에서의 유체력 미계수는 일반 조종 운동 수학모델에서의 유체력 미계수와는 약간 상이하지만, Inoue 추정식 [13][14]을 이용하여, 근사값으로서의 저속시 모델

유체력 미계수를 다음과 같이 구하기로 한다. 여기서 언급한 근사값은 유체력 미계수에 미치는 전진 속도 변화의 영향을 무시한다는 의미이다.

$$\begin{aligned}
 Y_i' &= -\left(\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4C_B\frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{2}{3}\frac{\tau}{d}\right) \\
 Y_{ur}' &= \frac{1}{4}\pi\Lambda\left(1 + 0.8\frac{\tau}{d}\right) \\
 N_i' &\approx 0.0 \\
 N_{ur}' &= -\Lambda\left(1 - \frac{0.27}{l_v'}\frac{\tau}{d}\right) \\
 N_v' &= -(0.54\Lambda - \Lambda^2)\left(1 + 0.3\frac{\tau}{d}\right) \\
 Y_{rv}' &= -6.49(1 - C_B)\frac{d}{B} + 0.0795 \\
 Y_{vr}' &= 1.82(1 - C_B)\frac{d}{B} - 0.447 \\
 Y_{urr}' &= -0.4664(1 - C_B)\frac{d}{B} \\
 N_{rv}' &= -1.70\left|C_B\frac{B}{L} - 0.157\right|^{1.5} \\
 &\quad - 0.010 \\
 N_{urr}' &= -3.25C_B\frac{B}{L} + 0.35 \\
 &\quad - 10^{-7}\left(\frac{L}{C_B \cdot B}\right)^6 \\
 N_{uvrr}' &= 0.444C_B\frac{d}{B} - 0.064 \\
 &\dots\dots\dots(28)
 \end{aligned}$$

여기서 C_B 는 방형계수, L 은 선체길이(수선간장), B 는 선폭, d 는 평균 흘수, τ 는 트림량(선미트림 "+")을 의미하며, Λ 와 l_v' 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Lambda &= \frac{2d}{L} \\
 l_v' &= \Lambda / \left(\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4C_B\frac{B}{L}\right) \dots\dots\dots(29)
 \end{aligned}$$

상기 추정식은 심수역에서의 유체력 미계수를 나타내고 있는데, 이들에 대한 수심의 영향을 다음과 같이 고려하기로 한다.

먼저 선형 유체력 미계수에 대해서는 Kijima의

회귀식[15]을 이용하여 다음과 같이 수심의 영향을 고려한다.

$$D_H = f(h) \times D_{\infty} \dots\dots\dots(30)$$

여기서 D_H , D_{∞} 는 각각 천수역과 심수역에서의 유체력 미계수를 나타내며, $f(h)$ 는 수정계수로서 흘수·수심비의 함수이다.

Y_r' , N_w' 및 N_v' 에 대해서는 $f(h)$ 가 다음 식으로 주어진다

$$f(h) = \frac{1}{(1-h)^c} - h \dots\dots\dots(31)$$

여기서 $h = d/H$ (d : 흘수, H : 수심)이고 계수 c 의 값은 각각의 유체력 미계수에 대해 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_r' : c &= 0.40C_B B/d \\
 N_w' : c &= 0.425C_B B/d \dots\dots\dots(32) \\
 N_v' : c &= -7.14\Lambda + 1.5
 \end{aligned}$$

그리고 $Y_{ur}' - (m' + m_x')$ 에 대해서는 $f(h)$ 가 다음 식으로 주어진다.

$$f(h) = 1 + c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 \dots\dots\dots(33)$$

여기서 계수 c_1 , c_2 , c_3 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 c_1 &= -5.5(C_B B/d)^2 + 26C_B B/d - 31.5 \\
 c_2 &= 37(C_B B/d)^2 - 185C_B B/d - 230 \\
 c_3 &= -38(C_B B/d)^2 + 197C_B B/d - 250 \\
 &\dots\dots\dots(34)
 \end{aligned}$$

다음으로 비선형 유체력 미계수에 대해서는 Inoue의 추정식[16]을 이용하여 다음과 같이 수심의 영향을 고려한다.

$$\begin{aligned}
 Y_{vH}' / Y_{v\infty}' &= 1.80 C_{DH} / C_{D\infty} \\
 Y_{vrH}' / Y_{vr\infty}' &= 0.80 C_{DH} / C_{D\infty} \\
 Y_{vrH}' / Y_{vr\infty}' &= 1.20 C_{DH} / C_{D\infty} \\
 N_{rrH}' / N_{rr\infty}' &= 0.80 C_{DH} / C_{D\infty} \\
 N_{uvrH}' / N_{uvr\infty}' &= 0.80 C_{DH} / C_{D\infty} \\
 N_{tvrH}' / N_{tvr\infty}' &= 0.65 C_{DH} / C_{D\infty}
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

여기서 첨자 H 와 ∞ 는 각각 천수역과 심수역을 나타낸다. 그리고 C_D 는 선체를 정횡 방향으로 예항할 때의 저항계수로서 Inoue는 $C_{DH} / C_{D\infty}$ 의 값을 Fig. 8과 같이 구하였다. 아울러 Fig. 8에는 Yoshimura의 실험치도 함께 표시하였다[17].

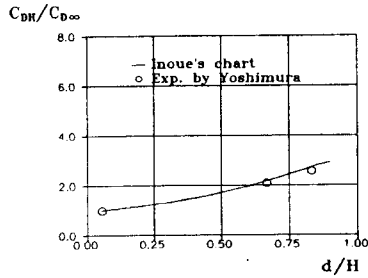


Fig. 8 Shallow water effect on $C_{DH} / C_{D\infty}$

부가질량과 부가관성모멘트에 대한 수심의 영향은 Sheng[18]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 m_{yH}' / m_{y\infty}' &= K_0 + \frac{2}{3} K_1 \frac{B}{d} + \frac{8}{15} K_2 \left(\frac{B}{d}\right)^2 \\
 J_{zzH}' / J_{zz\infty}' &= K_0 + \frac{2}{5} K_1 \frac{B}{d} + \frac{24}{105} K_2 \left(\frac{B}{d}\right)^2
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 K_0 &= 1 + \frac{0.0775}{(h-1)^2} - \frac{0.0110}{(h-1)^3} \\
 K_1 &= -\frac{0.0643}{(h-1)} + \frac{0.0724}{(h-1)^2} - \frac{0.0113}{(h-1)^3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_2 &= \frac{0.0342}{(h-1)} \\
 h &= d/H
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

X_{vr}' 는 Yoshimura의 실험 자료[17], a_H , x_H' 는 Hirano의 실험 자료[19]를 이용하여 천수역에서의 값으로 수정한다. Fig. 9는 X_{vr}' 에 관한 Yoshimura의 실험 자료를, Fig. 10은 a_H , x_H' 에 관한 Hirano의 실험 자료를 나타내고 있다. 기타의 유체력 계수는 제 2장에서 언급한 바와 같이 구하거나 또는 관례에 따라서 구하고, 이들 값에는 특별히 수심의 영향을 고려하지 아니한다.

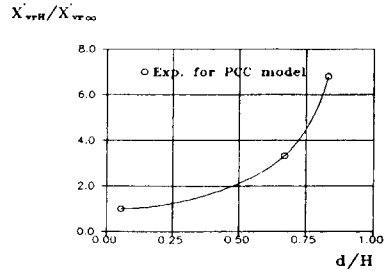


Fig. 9 Shallow water effect on X_{vr}

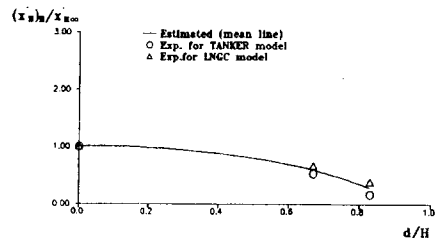
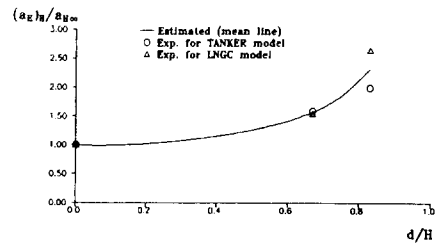


Fig. 10 Shallow water effect on a_H and x_H'

4. 기본 조종 성능의 확인

특정 항만에서 출입항 조종에 관한 실시간 시뮬레이션을 수행하기에 앞서서, 다음과 같은 기본 조종 성능을 계산하여 제 2장에서 언급한 수학적모델의 유용성을 확인한다. 실시간 시뮬레이션은 이러한 기본 조종 성능을 종합한 것이라고 할 수 있다.

계산에 이용한 대상 선박은 Table 2에 보인 중형 컨테이너선이며 수심 13.0 m의 천수역에서 계산을 수행하였다.

Table 2 Principal particulars of container ship

HULL		
Length over all	$LOA (m)$	188.0
Length B.P.	$L (m)$	175.0
Breadth(moulde)	$B (m)$	25.4
Draft(moulded)	$d (m)$	8.50
Trim	$\tau (m)$	1.0
Block coefficient	C_B	0.559
RUDDER		
Height	$H_R (m)$	7.70
Area ratio	A_R/Ld	1/45.8
Aspect ratio	λ	1.827
PROPELLER		
Diameter	$D (m)$	6.50
Pitch ratio	P/D	1.055
Expanded area ratio		0.730
No. of blades		5

(1) 변침 성능

조타어 의해서 예정대로의 침로 변경이 가능한가를 확인하기 위해서 신침로시험[20]을 시뮬레이트 한다. Fig. 11은 신침로시험에 대한 계산 결과로서, 요구되는 변침 성능이 얻어지고 있음을 알 수 있다. 여기서 초기 선속은 6.293 kt(dead slow ahead)이다.

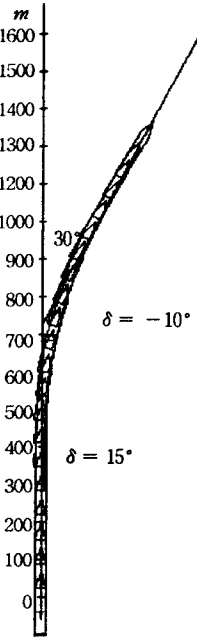


Fig. 11 Simulation on course changing in shallow waters

(2) 피항 성능

임의 선속으로 항진중 장애물 또는 타 선박을 발견하고 이를 피하기 위해서 어떠한 피항 동작을 취할 것인가 하는 문제는 대단히 중요하다. 피항 동작은 본선 주기관과 타를 같이 사용하는 경우와, 예선만을 사용하는 경우와, 예선과 본선 주기관과 타를 같이 사용하는 경우 등이 있을 수 있다. 피항 성능의 계산 예를 Fig. 12에 보인다. 여기서 초기 선속은 12.58 kt(half ahead)이다. 계산 결과는 종합 시뮬레이션을 수행할 때 피항 방법을 선택하기 위한 참고 자료가 될 것이다.

(3) 예선에 의한 횡이동 성능

계선 예정인 부두 가까이에서 선박을 접안 또는 부두로부터 이안시킬 때 예선에 의한 횡이동 성능도 대단히 중요하다. Fig. 13은 정지 상태에 있던 선박을 예선만에 의해서 횡방향으로 이동시키는 것을 시뮬레이트한 것이다.

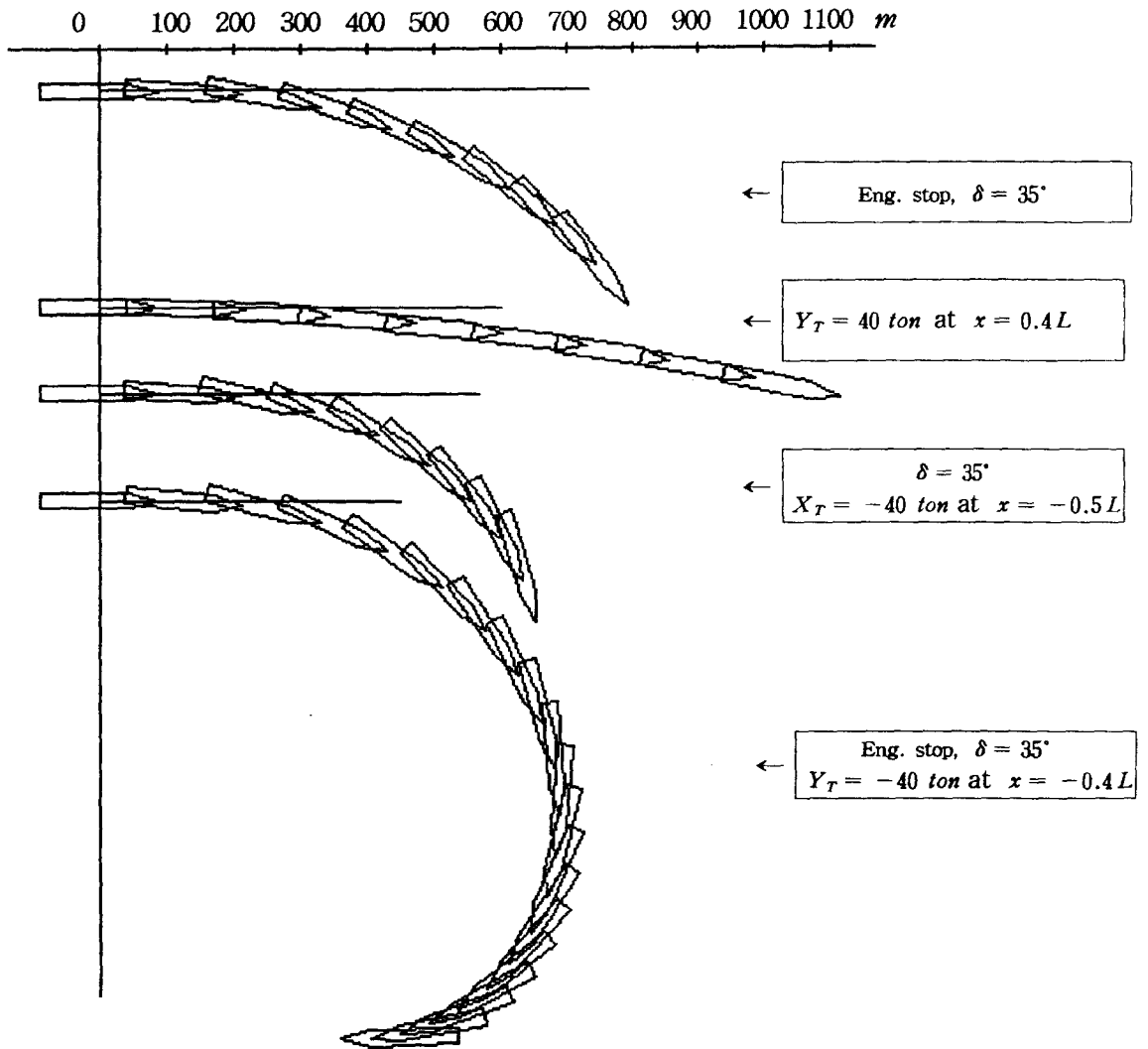


Fig. 12 Simulation on collision-avoidance manoeuvre in shallow waters

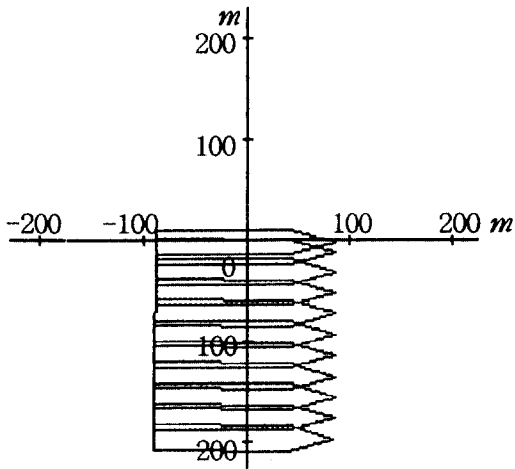


Fig. 13 Simulation on lateral shifting operation in shallow waters ($Y_T = 40 \text{ ton}$ at $x = 0.4L$ and $Y_T = 40 \text{ ton}$ at $x = -0.4L$)

(4) 예선에 의한 선회 성능

부두로부터 선박을 이안시킨 후 선수를 예정 방향으로 향하도록 하기 위해서, 일반적으로 선미를 선회 중심으로 하여 회두시키는 방법과 선체 중앙을 중심으로 하여 회두시키는 방법을 생각할 수 있다. Figs. 14, 15는 정지 상태에 있던 선박을 예선만에 의해서 그 장소에서 선회시키는 것을 시뮬레이트한 것이다.

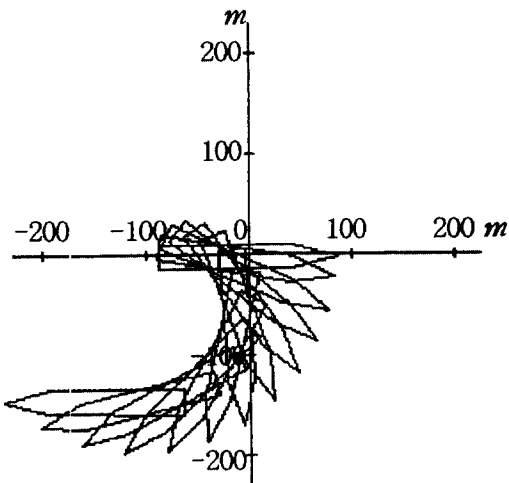


Fig. 14 Simulation on turning operation in shallow waters ($Y_T = 40 \text{ ton}$ at $x = 0.4L$)

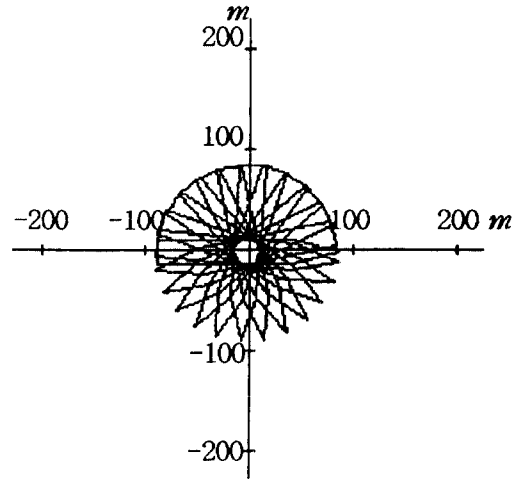


Fig. 15 Simulation on turning operation in shallow waters ($Y_T = 40 \text{ ton}$ at $x = 0.4L$ and $Y_T = -40 \text{ ton}$ at $x = -0.4L$)

(5) 조종 성능에 미치는 외력의 영향

선박의 조종 성능에 미치는 바람과 조류의 영향을 확인하기 위해서 선회 성능에 미치는 이들 각각의 영향을 검토한 것이 Figs. 16, 17이다. 여기서 초기 선속은 12.58 kt 이며, 바람은 225° 방향에서 20 m/sec 로, 조류는 225° 방향에서 1.0 kt 로 작용하는 것으로 상정하였다. 계산 결과 이들 각각의 외력 영향이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

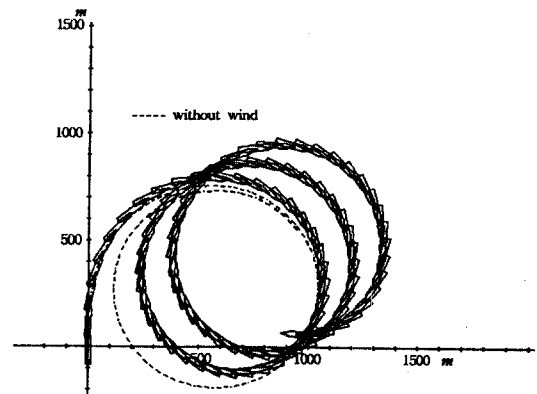


Fig. 16 Wind effect on turning performance in shallow waters

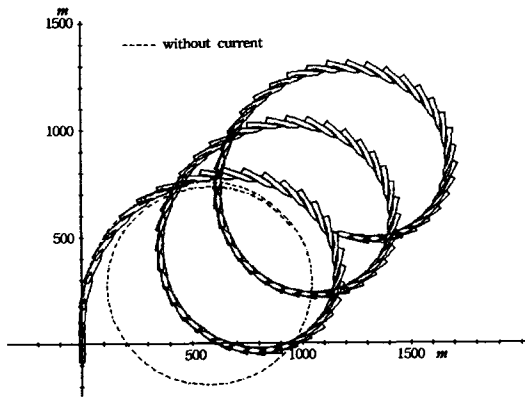


Fig. 17 Current effect on turning performance in shallow waters

5. 실시간 시뮬레이션 기법 및 부산항에의 적용

출입항 조종의 실시간 시뮬레이션을 위한 데스크탑형 시뮬레이터의 구성에 관한 블록 다이어그램은 Fig. 18과 같다. 본선과 예선의 조종 제어, 초기 조건 및 외력 조건 등은 키보드로 입력하며, 실시간으로 계산된 선체 운동은 시시각각 CRT 화면과 X-Y 플로터에 표시된다. 즉, CRT 화면에는 선수방위, 회두각속도, 전진속도, 횡이동속도, 프로펠러 회전수, 타각, 예선 등의 운항 정보가 표시되며, X-Y 플로터에는 해도, 항로 등과 함께 본선의 위치와 자세를 나타내는 선체 형상이 bird's-eye-view 방식으로 20초 마다 표시된다. 해도, 항로 등은 스캐너로 입력하였으며, 선체 형상은 실제 크기의 1.5배 확대 표시되도록 하였다. 실제 선박의 운항에서는 시계(視界) 정보가 중요한 요소이긴 하지만, 본 시뮬레이터에서는 X-Y 플로터에 의한 본선 형상의 표시만으로써 시계 장치를 대신하도록 하였다. Fig. 19는 CRT 화면에 표시되는 운항 정보 예이다. 예선은 미리 지정된 위치에서 최대 6척까지 원하는 수만큼 사용될 수 있으며, 각 예선의

출력 변환은 4단계로 나누어져 있다. Fig. 20은 본 시뮬레이터를 이용하여 제 4장에서 언급한 중형 컨테이너선을 부산 외항 방파제 부근으로부터 항로를 따라 입항하여 자성대 컨테이너 부두에 접안시키는 전 과정을 X-Y 플로터에 나타낸 것이다. 부산 외항 방파제 부근에서 선박의 초기 속도는 6.38 kt(dead slow ahead)이며, 외력으로서 바람의 경우 $V_w = 10 \text{ m/sec}$, $\psi_w = 45^\circ$, 조류의 경우 $V_c = 0.5 \text{ kt}$, $\psi_c = 180^\circ$ 를 상정하였다. 실제 시뮬레이션시에는 CRT 화면 뿐만 아니라 X-Y 플로터상의 모든 정보는 원하는 색상으로 컬러 표시가 된다. Fig. 21은 본 시뮬레이터를 이용하여 자성대 컨테이너 부두로부터 이안하여 항로를 따라 출항하는 전 과정을 보이고 있다. 이때도 외력 조건은 입항시와 동일한 것으로 상정하였다. 그리고 시뮬레이션 전 과정에서의 선체 운동 변수들의 시계열 값은 실시간 시뮬레이션이 완료된 후에 Fig. 22와 같이 프린터에 출력되었다.

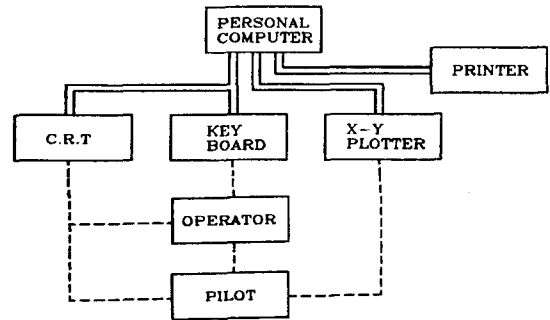


Fig. 18 Block diagram of desktop simulator

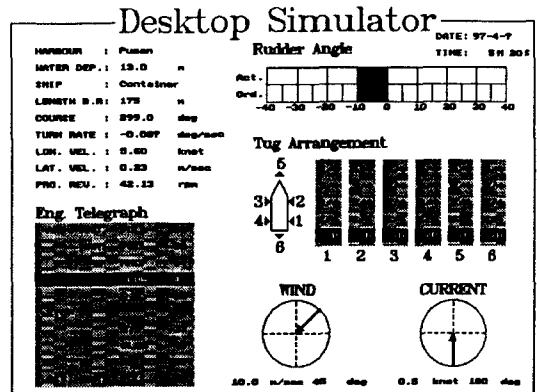


Fig. 19 CRT display of desktop simulator

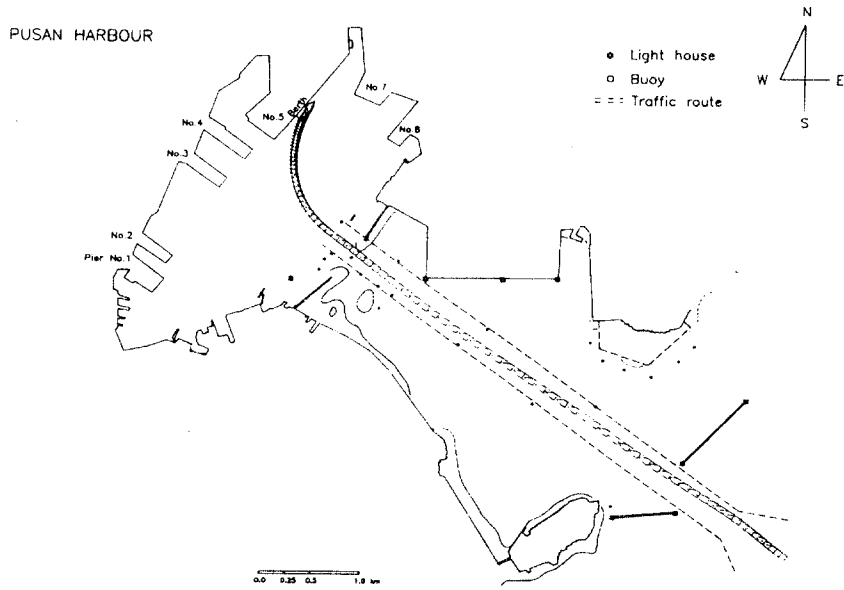


Fig. 20 X-Y Plotter display of berthing manoeuvre

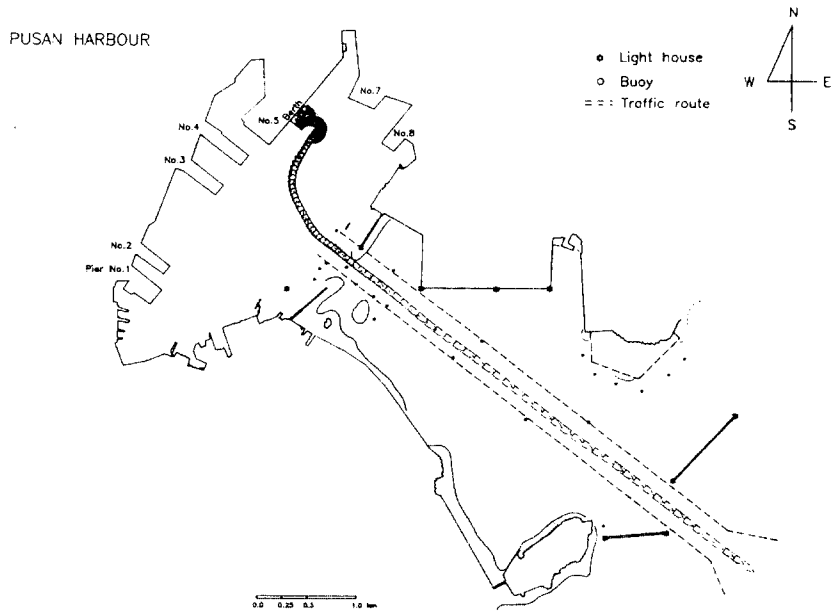
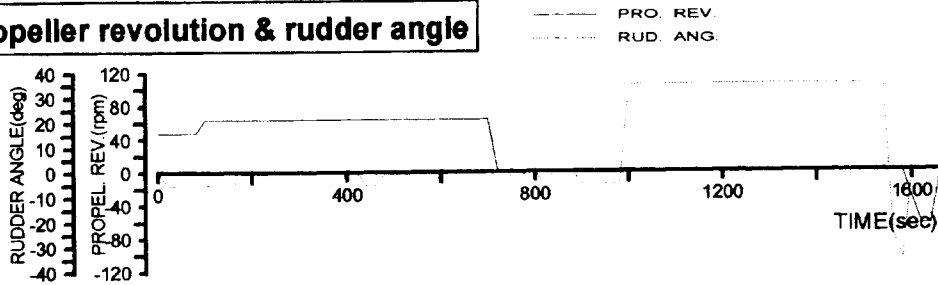


Fig. 21 X-Y Plotter display of unberthing manoeuvre

TIME HISTORY OF MANOEUVRING SIMULATION RESULTS

(1) Propeller revolution & rudder angle



(2) Course & velocity

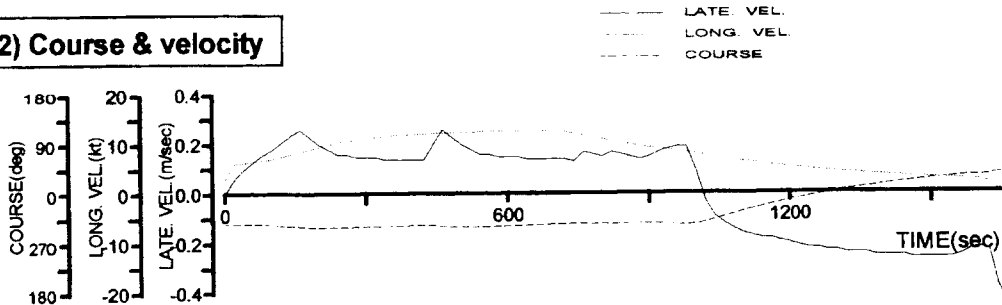


Fig. 22 Time histories of ship motion parameters in harbour manoeuvre

6. 결 언

본 연구에서는 출입항 조종의 안전성 평가를 위한 데스크탑형 시뮬레이터와 이를 이용한 실시간 시뮬레이션 기법 및 부산항에서의 적용에 관해서 소개하였다.

실제 선박의 조종시에는 시계 정보가 대단히 중요한 요소이지만, 본 시뮬레이터에서는 X-Y 플로터에 의한 선체 형상 표시와 CRT 화면상의 운항 정보로써 시계 정보를 대신하고 있기 때문에 현장감이 떨어진다고 할 수 있다. 이 점은 앞으로 개선해야 할 문제점이라 생각된다. 그러나 초급 선원의 훈련용이 아니라, 실험실에서 직업 도선사에 의한 출입항 안전성 검토용으로서의 활용 가치가 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) 강 창구, "IMO 선박 조종성 기준", 대한조선학회지, 제30권 제2호, 1993.
- 2) Kose, K. et al., "出入港操船の安全性に關する Simulator Studyの例", 日本造船學會論文集, 第156号, 1984.
- 3) Ogawa, A., et al., "MMG報告(I) - 操縱運動の數學Modelについて-", 日本造船學會誌, 第575号, 1977.
- 4) Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", page 135 ~ 144, The MIT Press, Cambridge, 1978.
- 5) 손 경호, "Hydrodynamic Force and

- Manoeuvring Characteristics of Ship at Low Advance Speed”, 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, 1992.
- 6) van Lammeren, W.P.A., et al., “The Wageningen B-Screw Series”, Trans. SNAME, Vol. 77, 1969.
 - 7) Fujino, M. et al., “プロペラ逆轉による制動時の船の操縦性について”, 日本關西造船協會誌, 第173号, 1977.
 - 8) Fujii, H., “自航模型船による舵特性の研究”, 日本造船協會論文集, 第107号, 1960.
 - 9) Yoshimura, Y., et al., “増減速を伴う操縦運動の取扱いについて(第2集)”, 日本造船學會論文集, 第144号, 1978.
 - 10) Kobayashi, H., et al., “曳船による操縦運動に関する研究”, 日本航海學會論文集, 第88号, 1992.
 - 11) Isherwood, R. M., “Wind Resistance of Merchant Ship”, Trans. RINA, Vol. 114, 1972.
 - 12) Mori, M., “操縦性 Simulation”, 第4回 日本造船學會 夏季講座 『新しい造船學』, page 179, 1978.
 - 13) Inoue, S., et al., “Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring”, ISP, Vol. 28, No. 325, 1981.
 - 14) Hoof, J. P., et al., “Design Information on the Ship Manoeuvrability”, NSMB, Report No.320, 1981.
 - 15) Kijima, K., et al., “Prediction Method of Ship Manoeuvrability in Deep and Shallow Waters”, MARSIM & ICSM '90, Tokyo, 1990.
 - 16) Inoue, S., “淺水域における操縦微係數の非線形項の推定”, 長岐綜合科學大學工學研究所報, 第1号, 1984.
 - 17) Yoshimura, Y., “淺水域の操縦運動數學 Modelの檢討(第2報) — 低速操船時, 主船体に働く流體力について —”, 日本關西造船協會誌, 第210号, 1988.
 - 18) Sheng, Z. Y., “Contribution to the Discussion of the Manoeuvrability Committee Report”, Proceedings of 16th ITTC, Leningrad, 1981.
 - 19) Hirano, M., et al., “An Experimental Study on Manoeuvring Hydrodynamic Forces in Shallow Water”, 日本西部造船會會報, 第69号, 1984.