

선박의 조종성능 평가를 위한 수학모델에 관한 연구

손 경 호*

On the Mathematical Model for Estimating Manoeuvring Performance of Ships

Kyoung-Ho Son

목 차

1. 서 론	2.5 프로펠러 회전수의 수학모델
2. 수학모델 및 유체동역학적계수 추정법	2.6 조타기의 수학모델
2.1 조종운동의 정식화	3. 조종성능 평가기법
2.2 주선체에 작용하는 종방향 유체력 및 프로펠러 유효추력	4. 공시선형 및 표준조종성능 계산결과
2.3 주선체에 작용하는 횡방향 유체력 및 횡두모우먼트	5. 결 론
2.4 조타에 기인하는 유체력	참 고 문 헌
	부 록

ABSTRACT

This paper presents a practical method to predict the characteristics of ship manoeuvring motions. An attempt is made to calculate the manoeuvring motions utilizing principal particulars of ship hull, propeller and rudder as basic input data. The mathematical models, which describe the ship manoeuvring motions, are developed on the basis of MMG[5], Inoue[17], Hooft[18] and so on. Calculations of manoeuvring motions for three kinds of typical characteristics, namely turning motion, zig-zag manoeuvre re-

* 정회원, 한국해양대학

sponse and steady turning performance, are carried out. In order to examine the validity of the calculation method of this paper, simulations are run for seven merchant ships employed by Inoue(4). The computed results by present method are compared with full scale trials and Inoue's calculations(4). It can be concluded that the calculation method proposed in this paper is useful and powerful for prediction of characteristics of ship manoeuvring motions at the initial design phase or the application study on manoeuvring motions.

1. 서 론

최근 해상수송의 발달로 말미암아 고속 컨테이너선, 개스운반선 및 프로덕트케리어 등 여러 종류의 선박이 출현되었다. 이러한 선박의 다양화 및 대형화에 의해 해상교통은 이전보다 더욱 복잡해졌으며, 해상오염의 방지와 항행의 안전성 그리고 경제적 운항의 측면에서 조종성능의 평가는 중요한 문제로 등장하였다. 종래에는 단순히 설계도표를 이용하거나 경험에 의한 타면적의 결정 또는 시운전 자료에 의한 조종성능의 검토만으로서 충분하였으나, 최근에는 새로운 선형의 성능설계에 있어서 추진 성능 못지않게 조종성능의 정도높은 평가가 절실히 요청되고 있다. 한편, 세계해사기구(IMO), 미국 Coast Guard 또는 파나마운하 당국 등에서 요구되는 조종성능 관련 규정 또한 점점 강화되고 있는 실정이다 (1)(2)(3). 그 예로서 IMO는 설계단계에서 조종성능의 검토를 권고하고 있으며, 선박이 건조된 후에는 Manoeuvring booklet를 작성할 것을 요구하고 있다(1).

이러한 현실적 요청 및 국제적 추세에 부응하기 위해서는 정도높은 조종성능 평가법이 개발되어야 한다. 조종성능을 평가하는 유력한 수단으로서, 조종운동 수학적모델을 컴퓨터로 수치계산하여 운동응답을 시뮬레이션하는 방법이 현재 많이 이용되고 있다.

이 방법은 조종운동의 물리적 현상을 수식 모델화한 운동방정식의 확립이 선행되어야 한다. 그리고 선박의 특성에 따르는 유체동역학적계수를 구속도형시험에 의해서 정확하게 구하여야 하며, 아울러 실선에의 확장을 위한 척도효과(Scale effect)를 적절히 고려하여야 한다.

본 연구에서는 실선의 조종성능 평가를 위한 기초적 연구로서, 일본 MMG모델(5)을 참고하여 조종운동 수학적모델을 확립코자 하였다. 그리고 지금까지 발표된 이론계산법을 응용하여 유체동역학적계수를 추정할 수 있는 방법을 모색하였다. 이 방법을 이용하면 선박의 주요목 자료만으로서 실선의 조종성능을 평가할 수 있으며, 특히 선도(Lines)가 완성되기 전인 초기설계단계에서 조종성능의 검토가 이루어질 수 있다. 한편, 본 연구에서 제안한 계산법의 유효성을 검토하기 위해서 Inoue(4)가 다룬 7척의 실선에 대해 조종운동 시뮬레이션 계산을 수행하고, 계산결과를 실선 시험자료 및 Inoue(4) 계산치 등과 비교하였다.

2. 수학적모델 및 유체동역학적계수 추정법

2.1 조종운동의 정식화

일반적으로 선박의 조종운동은 동좌표계(선체고정좌표계)에 대해서 기술되며, 전후

동요(Surge), 수평동요(Sway) 및 선수동요(Yaw)의 연성운동을 다루게 된다. 동좌표계는 Fig. 1과 같이 좌표원점을 선체 무게 중심 G에 두고, 선수방향을 x축, 정횡우현 방향을 y축 그리고 연직하방을 z축으로 취한다. 한편, Fig. 1에서 수면에 고정된 공간 좌표계는 O-x₀y₀z₀이다.

동좌표계의 x, y, z축을 관성주축이라 가정하고, 평수중에서의 전후동요, 수평동요 및 선수동요의 3자유도 운동만을 생각하면 Euler의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X \\ m(\dot{v} + ur) &= Y \\ I_z \dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 m는 선체질량을, I_z는 z축에 대한 선체의 질량관성모멘트를, u, v, r는 각각 선박의 x방향 속도, y방향 속도, z축 주위의 각속도를, X, Y, N는 각각 선체에 작용하는 x방향 유체력, y방향 유체력, z축 주위의 유체력모멘트를 의미한다. 그리고 운동변수 위에 붙인 점(·)은 시간에 대한 1차 도함수를 의미한다.

식(1)의 우변은 일본 MMG 수학모델(5)을 도입하면 다음과 같이 표시된다.

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R \\ Y &= Y_H + Y_R \\ N &= N_H + N_R \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서 첨자 H, R이 붙어 있는 항은 각각 주선체에 작용하는 유체력 및 조타에 기인하는 유체력을, X_P는 프로펠러의 유효추력을 의미한다. 식(2)는 일본조선학회에 설치된 "조종운동 수학모델 검토그룹(약칭 MMG)"에 의해서 제안된 것으로서, 주선체, 프로

펠러 및 타의 각각에 작용하는 단독 유체력과 이들의 상호 간섭유체력을 합성함으로써 전선체에 작용하는 유체력을 구하는 방법이다. MMG 수학모델은 모듈형 수학모델(6) 또는 Differential approach에 의한 수학모델(7)등의 이름으로도 불리고 있으며, 최근 구미 각국에서도 좋은 평가를 받고 있다.

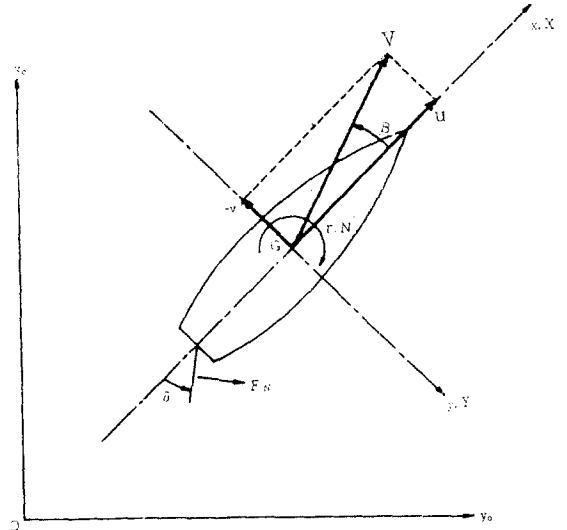


Fig. 1 Co-ordinate system

2.2 주선체에 작용하는 종방향 유체력 및 프로펠러 유효추력

MMG 수학모델(5) 및 Yoshimura(8)등의 문헌을 참고하여, 주선체에 작용하는 종방향 유체력(X_H) 및 프로펠러 유효추력(X_P)를 다음과 같이 표시한다.

$$X_H = \frac{1}{2} \rho L d V^2 \{ -m'_x \dot{u}' + (m'_y + X'_{vr}) v' r' + X'_{uu} u'^2 \} \quad (3)$$

$$X_P = \rho n^2 D^4 \{ C_1 - C_2 \left(\frac{u}{nD} \right) \} \quad (4)$$

식(3)에서 m'_x, m'_y는 각각 x, y축 방향의 부가질량계수이고, X'_{vr}는 v', r'의 상호 간섭영향에 의한 점성유체력이다. X'_{uu}는 저항계수이다. 그리고 L, d는 각각 선박의 길이와 평균홀수를, V는 선박의 합속도를,

ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 한편 v' , r' 는 각각 $v'=v/V$, $r'=r(L/V)$ 와 같이 무차원화 하였다. 식(4)에서 n, D 는 각각 프로펠러의 매초당 회전수와 프로펠러 직경을 나타낸다.

식(3), (4)의 각 계수는 다음과 같이 추정한다.

$$\left. \begin{aligned} m'_x &= \frac{5.4 (C_B \cdot L \cdot B \cdot d)^{5/3}}{L^4 d} \\ m'_y &= \pi \left(\frac{d}{L} \right) \left\{ 1 + 0.16 C_B \left(\frac{B}{d} \right) - \frac{5.1}{(L/B)^2} \right\} \end{aligned} \right\} (5)$$

여기서 C_B, B 는 각각 방형비적계수와 선폭을 의미한다. 식(5)는 Motora도표(9)로부터 유도된 Clarke(10) 및 Hooff(11)의 회귀식이다.

$$X'_{vr} = (C_B - 1) m'_y \quad (6)$$

$$X'_{uu} = -C_T \left(\frac{S_A}{Ld} \right) \quad (7)$$

식(6)은 Matsumoto(12), Hasegawa(13) 등의 도표로부터 구하였다. 식(7)에서 C_T, S_A 는 각각 전저항계수와 침수표면적을 의미하며 다음 식으로 표시된다.

$$\left. \begin{aligned} C_T &= C_F (1 + k) + C_W \\ &= C_F + C_R \\ \frac{S_A}{Ld} &= 2.6 \sqrt{C_B \left(\frac{B}{d} \right)} \end{aligned} \right\} (8)$$

여기서 C_F, C_W, C_R 는 각각 마찰저항계수, 조파저항계수 및 잉여저항계수를 의미한다. 그리고 k 는 형상영향계수를 의미한다. C_F 는 Schoenherr 식, C_W 는 문현(14), C_R 는 Taylor수조의 도표(14), k 는 Sumiyoshi식(15)등으로부터 선박의 주요특 자료만으로서 추정 가능하다.

식(4)의 유효추력계수 C_1, C_2 는 다음과 같이 추정한다.

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{C_T}{2s_0} \left(\frac{S_A}{Ld} \right) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{d}{D} \right) J_{s_0}^2 \\ C_2 &= C_1 (1 - w_{p0}) / \left(\frac{P}{D} \right) \end{aligned} \right\} (9)$$

여기서 J_{s_0} 는 겉보기 전진상수($J_s=U/nD$), w_p 는 프로펠러 위치에서의 반류계수, s_0 는 슬러피를 의미하며, 첨자 0가 붙은 것은 정상직진시의 값을 의미한다. 그리고 P 는 프로펠러 핏치를 의미한다. 식(9)의 유도과정은 부록에서 상세히 다루기로 한다.

2.3 주선체에 작용하는 횡방향 유체력 및 회두모우멘트

주선체에 작용하는 횡방향 유체력(Y_H) 및 회두모우멘트(N_H)에 대해서 Inoue(16)가 제안한 수학적모델은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d V^2 \left\{ \begin{aligned} &-m'_y \dot{v}' \\ &-m'_x u' r' + Y'_{vv} v' + Y'_{rr} r' \\ &+ Y'_{vv} v' |v'| + Y'_{rr} r' |r'| + Y'_{vr} v' |r'| \end{aligned} \right\} \\ N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \left\{ \begin{aligned} &-J'_z \dot{r}' + N'_{vv} v' \\ &+ N'_{rr} r' + N'_{vv} v'^2 r' \\ &+ N'_{vr} v' |r'| + N'_{rr} r' |r'| \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} (10)$$

여기서 J'_z 는 z축 주위의 부가관성모우멘트 계수이고, Y'_{vv}, N'_{vv} 등은 유체동력학적계수로서 $Y'_{vv} = Y'_{vv} / v'$, $N'_{vv} = Y'_{vv} / V'$ 등을 의미한다.

J'_z 는 Hooff의 회귀식(11)으로부터 다음과 같이 추정한다.

$$\left. \begin{aligned} J'_z &= \frac{\pi}{12} \left(\frac{d}{L} \right) \left\{ 1.0 \right. \\ &\quad \left. + 0.20 C_B \left(\frac{B}{d} \right) - 4.0 \left(\frac{B}{L} \right) \right\} \end{aligned} \right\} (11)$$

Y'_{vv}, N'_{vv} 등의 선형계수는 다음의 Inoue식(16)으로부터 추정한다.

$$\left. \begin{aligned} Y'_{vv} &= -\left(\frac{1}{2} \pi A + 1.4 C_B \frac{B}{L} \right) \\ &\quad \times \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\tau}{d} \right) \\ Y'_{rr} &= \frac{1}{4} \pi A \left(1 + 0.8 \frac{\tau}{d} \right) \\ N'_{vv} &= -A \left(1 - \frac{0.27}{\beta'} \frac{\tau}{d} \right) \\ N'_{rr} &= -(0.54 A - A^2) \left(1 + 0.3 \frac{\tau}{d} \right) \end{aligned} \right\} (12)$$

여기서 r 는 트림량(선미트림 "+")을 의미하며, A 와 ℓ'_v 는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} A &= 2d/L \\ \ell'_v &= A / \left(\frac{1}{2} \pi A + 1.4 C_B \frac{B}{L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

한편, Y'_{vv} , N'_{vvr} 등의 비선형계수는 Inoue 도표(16)로부터 유도된 Hooft의 회귀식(17)을 이용한다.

$$\left. \begin{aligned} Y'_{vv} &= -6.49 (1 - C_B) \frac{d}{B} + 0.0795 \\ Y'_{vr} &= 1.82 (1 - C_B) \frac{d}{B} - 0.447 \\ Y'_{rr} &= -0.4664 (1 - C_B) \frac{d}{B} \\ N'_{rr} &= -1.70 |C_B \frac{B}{L} - 0.157|^{1.5} - 0.010 \\ N'_{vvr} &= -3.25 C_B \frac{B}{L} + 0.35 - 10^{-7} \left(\frac{L}{C_H B} \right)^6 \\ N'_{vrr} &= 0.444 C_B \frac{d}{B} - 0.064 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.4 조타에 기인하는 유체력

MMG 수학적모델(5)을 참고로 하여 조타에 기인하는 유체력(X_R , Y_R , N_R)을 다음 식으로 표시한다.

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(1 + a_H) x_R F_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

여기서 δ 는 타각을, F_N 은 타직압력(Fig. 1 참조)을, x_R 은 타위치의 x좌표를, t_R 과 a_H 는 조타에 의해서 주선체에 유기되는 간섭유체력의 영향을 나타낸다. t_R , a_H , x_R 의 값은 모형실험 결과(18)를 참고하여 대략 다음과 같이 추정한다.

$$\left. \begin{aligned} t_R &= 0.25 \\ a_H &= 0.63 C_B - 0.15 \\ x_R &= -0.5 L \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

한편, 타직압력 F_N 는 Fujii(19)에 의하면 다음과 같이 표시된다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6.13 \lambda}{\lambda + 2.25} A_R V_R^2 \sin \alpha_R \quad (17)$$

여기서 λ , A_R 는 각각 타의 종횡비와 측면적을 나타낸다. 그리고 V_R 는 타에 유입하는 흐름의 유효속도를, α_R 는 타에 유입하는 흐름의 유효양각을 나타낸다. 선체와 프로펠러 후류의 영향을 받는 V_R 와 α_R 는 다음과 같이 구한다.

Yoshimura(8)와 Inoue(4)에 의하면 V_R 는 다음 식으로 표시된다.

$$\left. \begin{aligned} V_R &= V (1 - w_R) \\ &\times [1 + C_3 g(s)]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$g(s) = \eta \kappa \{2 - (2 - \kappa) s\} s / (1 - s)^2$ (19) 식(18)에서 C_3 는 타의 회전방향에 따르는 프로펠러 후류영향의 차이를 나타내는 것으로서, 일반적으로 우회전 프로펠러를 장착한 1축1타 선박의 경우 δ 의 부호에 따라 다음과 같이 표시된다.

$$C_3 = 1 - 0.065 \text{ sign}(\delta) \quad (20)$$

그리고 w_R 은 타위치에서의 반류계수이며 식(19)의 κ 와 다음 관계가 있다.

$$\kappa = 0.6 (1 - w_P) / (1 - w_R) \quad (21)$$

그리고 s (슬립비) 및 η 는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} s &= 1 - u (1 - w_P) / (nP) \\ \eta &= D/H \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

여기서 H 는 타의 높이(Span)를 나타낸다.

한편, 식(21)에서 조종운동중의 w_P 및 w_R 은 정상적진시의 값 w_{R0} 및 w_{P0} 와 다르며, w_P 및 w_R 은 조종운동 변수 및 프로펠러 하중도의 영향을 받는다. Inoue(4)는 w_P 및 w_R 가 조종운동만의 영향을 받는다고 가정하여 다음과 같이 제안하였다.

$$w_P = w_{P0} \exp(-4.0 \beta_P^2) \quad (23)$$

$$w_R = w_P w_{R0} / w_{P0} \quad (24)$$

여기서 $\beta_p = -v' - x'_p r'$ (단, $x'_p = -0.5$)이다. 식(23)의 w_{p0} 는 모형선의 경우 Harvald, Lammeren 등의 도표(14)로부터 추정될 수 있으며, 실선·모형선 상관관계 즉, 척도영향은 Yazaki 도표(14) 또는 ITTC식(20)으로부터 추정될 수 있다. 그리고 w_{R0} 는 Yoshimura(8)에 의하면 모형선의 경우 선형에 관계없이 대략 0.5정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 실선의 경우에는 척도영향을 고려하여 대략 0.25라 가정한다(4)(21).

타에 유입하는 흐름의 유효양각 α_R 는 다음 식으로 표시된다.

$$\alpha_R = \delta + \delta_0 - r \beta_R \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &= \pi s_0 / 90 \\ \beta_R &= -v' - 2.0 x'_R r' \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

여기서 s_0 는 정상직진시의 슬립비이다. 식(25)에서 정류계수 r 는 Yumuro(22)에 의하면 다음 식으로 표시된다.

$$r = C_p \cdot C_s \quad (27)$$

여기서 C_p 는 프로펠러 정류계수를, C_s 는 선체 정류계수를 의미한다.

C_p , C_s 에 대해서 Inoue(4)는 다음 식을 제안하였다.

$$\left. \begin{aligned} C_p &= 1 / [1 + 0.6 \eta (2 - 1.4s)s / (1 - s)^2]^{1/2} \\ C_s &= 0.45 |\beta_R| \quad ; (|\beta_R| \leq 1.11) \\ &= 0.5 \quad ; (|\beta_R| > 1.11) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

2.5 프로펠러 회전수의 수학모델

조종운동중에 일어나는 프로펠러 회전수 변동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$2\pi (I_p + J_p) \dot{n} = Q_p + Q_E \quad (29)$$

여기서 I_p , J_p 는 각각 프로펠러와 축의 극관성모우먼트 및 부가관성 모우먼트를 나타낸다. Q_p , Q_E 는 각각 프로펠러의 토오크 및

주기관의 토오크를 나타낸다.

$(I_p + J_p)$ 는 문헌(14)로부터 다음과 같이 추정한다.

$$(I_p + J_p) = 2.0 D^5 (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2) \quad (30)$$

프로펠러의 토오크 Q_p 는 다음 식으로 표시된다.

$$Q_p = -\rho n^2 D^5 K_Q(J) \quad (31)$$

여기서 프로펠러 추력계수 K_Q 는, 전진상수

$$J = u(1 - w_p) / nD \quad (32)$$

의 함수로서 표시되며, 프로펠러 특성곡선으로부터 구할 수 있다. $K_Q(J)$ 는 Lammeren(23)의 실험자료로부터 추정될 수 있다.

선박의 주기관으로서는 저속디젤엔진과 증기터어빈을 생각한다. 저속디젤엔진은 토오크일정, 증기터어빈은 동력일정이라 가정할 때 Q_E 는 다음 식으로 표시된다.

(i) 저속디젤엔진

$$\left. \begin{aligned} Q_E &= |Q_p| : (|Q_p| \leq Q_{E0}) \\ &= Q_{E0} : (|Q_p| > Q_{E0}) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

여기서 Q_{E0} 는 정상직진시의 값으로서 다음과 같다.

$$Q_{E0} = \rho n_0^2 D^5 K_Q(J_0) \quad (34)$$

(ii) 증기터어빈

$$Q_E = 75 \text{ SHP}_0 / 2\pi n \quad (35)$$

여기서 SHP_0 는 정상직진시의 주기관의 유효축마력을 의미한다.

한편, 정상직진시의 프로펠러 회전수 n_0 는, 추진계수를 0.6이라 가정할 때 다음 식으로 표시된다.

$$n_0 = 0.51 \left(\frac{V_0}{D} \right) \left(\frac{S_A}{D} \right) \left(\frac{C_T}{K_Q(J_0)} \right)^{1/3} \quad (36)$$

여기서 첨자0는 정상직진시의 값을 의미한다. 한편, $K_Q(J_0)$ 는 미지수 이므로, 근사적으로 프로펠러 특성곡선에서 프로펠러 단독효율이 최대일때의 K_Q 의 값을 $K_Q(J_0)$ 라 가정한다.

2.6 조타기의 수학기초모델

일반적으로 가장 많이 쓰이고 있는 전동 유압식 조타기의 수학기초모델은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta} &= (\delta^* - \delta) / T_E \\ &: (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{max}|) \\ &= \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{max}| \\ &: (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{max}|) \end{aligned} \right\} (37)$$

여기서 $T_E=2.5\text{sec}$, $|\dot{\delta}_{max}|=3.0 \text{ deg/sec}$ 의 값을 취한다. 그리고 δ^* 는 명령타각을 의미한다.

3. 조종성능 평가기법

제2장에서 논한 유체동력학적계수 추정법에 따라서 결정된 각 계수를 수학기초모델(운동방정식)에 대입하여 u, v, r 등의 변수에 대해서 풀면 선박의 조종운동을 구할 수 있다. 선박의 조종운동을 나타내는 수학기초모델은 비선형 연립미분방정식에 해당되므로 컴퓨터에 의한 수치적분법을 이용하면 해를 구할 수 있다. 수치계산은 Runge-Kutta-Gill법에 의한 축차근사적분법을 이용해서 다음과 같이 수행된다.

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= u(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{u}(\tau) \Delta t \\ v(t) &= v(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{v}(\tau) \Delta t \\ r(t) &= r(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{r}(\tau) \Delta t \\ \Psi(t) &= \Psi(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} r(\tau) \Delta t \\ x_u(t) &= x_u(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \{u(\tau) \cos \Psi(\tau) - v(\tau) \sin \Psi(\tau)\} \Delta t \\ y_u(t) &= y_u(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \{u(\tau) \sin \Psi(\tau) + v(\tau) \cos \Psi(\tau)\} \Delta t \\ \delta(t) &= \delta(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{\delta}(\tau) \Delta t \\ n(t) &= n(0) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{n}(\tau) \Delta t \end{aligned} \right\} (38)$$

여기서 x_0, y_0 는 Fig.1과 같이 수면에 고정된 공간좌표계를, Ψ 는 횡두각을, t 는 시간을 그리고 Δt 는 미소 시간간격을 의미한다. 실제 계산시에 실선의 경우 $\Delta t=0.5\text{sec}$ 로 취하였다.

한편, Fig.1에서의 횡류각(Drift angle) β 는 다음 식으로 계산된다.

$$\beta(t) = \tan^{-1}(-v(t) / u(t)) \quad (39)$$

4. 공시선형 및 표준조종성능 계산 결과

선박의 조종성능은 선회시험, Zig-zag조종시험, Spiral시험 그리고 신침로 시험 등으로부터 판단된다. 이 중에서 표준조종시험이라고 불리우는 35°선회시험, 10°-10° Zig-zag 조종시험 그리고 Spiral 시험(역 Spiral 시험 포함)이 가장 많이 실시되고 있다.

문헌[4]에서는 Table 1에 나타난 7척의 선박에 대해서 실선의 표준조종시험결과와 계산결과와의 비교를 다루고 있다. 본 연구에서도 상기 7척의 선박에 대해서 제2장, 제3장에서 논한 계산법에 따라서 계산한 결과를 문헌[4]의 자료와 비교, 검토하였다. 공시선의 선체, 프로펠러 및 타의 주요목과 시험상태 등은 Table 1에 명시되어 있으며,

Table 1 Principal particulars of hull, Propeller and rudder

ship	A	B	C	D	E	F	G
kind of ship	container carrier	cargo boat	ro/ro carrier	pure car carrier	bulk carrier	VLCC	ULCC
loading condition	ballast	ballast	ballast	ballast	ballast	full	ballast full
hull							
L (m)	202.00	160.00	212.00	180.00	230.00	318.00	248.00
B (m)	31.20	23.56	22.26	32.00	32.20	56.00	63.40
d (m)	6.93	5.20	6.29	6.80	7.24	29.58	9.64
r (m)	1.95	3.78	1.13	1.03	1.05	0.0	3.95
C_B	0.518	0.600	0.612	0.566	0.820	0.827	0.788
rudder							
A_R/Ld	1/10.1	1/31.7	1/50.6	1/34.8	1/37.9	1/58.6	1/31.5
λ	1.40	1.57	1.22	1.19	1.38	1.55	1.28
propeller							
D (m)	7.10	5.70	6.60	6.20	6.70	8.90	8.60
P/D	1.04	1.14	0.97	0.95	0.71	0.71	0.71
No. of blades	6	4	5	5	4	5	5

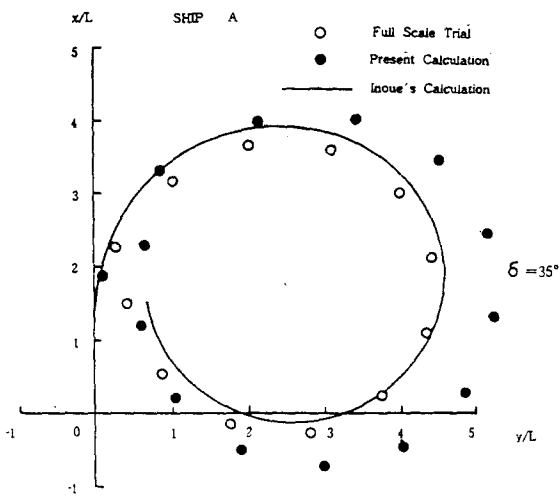


Fig. 2 Turning trajectory (ship A)

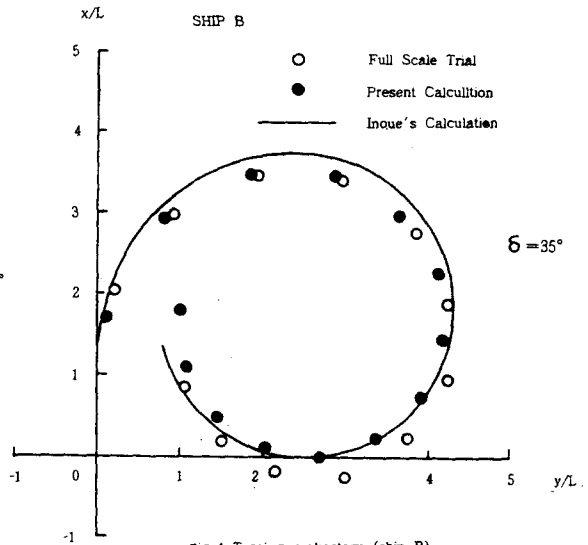


Fig. 4 Turning trajectory (ship B)

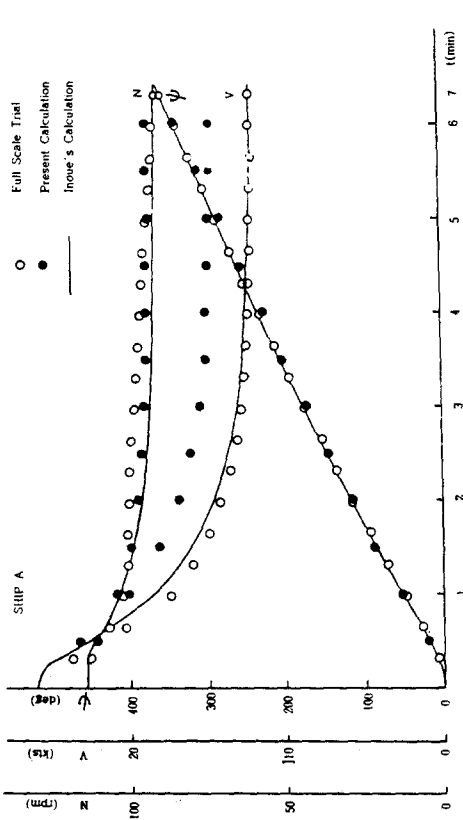


Fig. 3 Time histories of heading angle, ship speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship A)

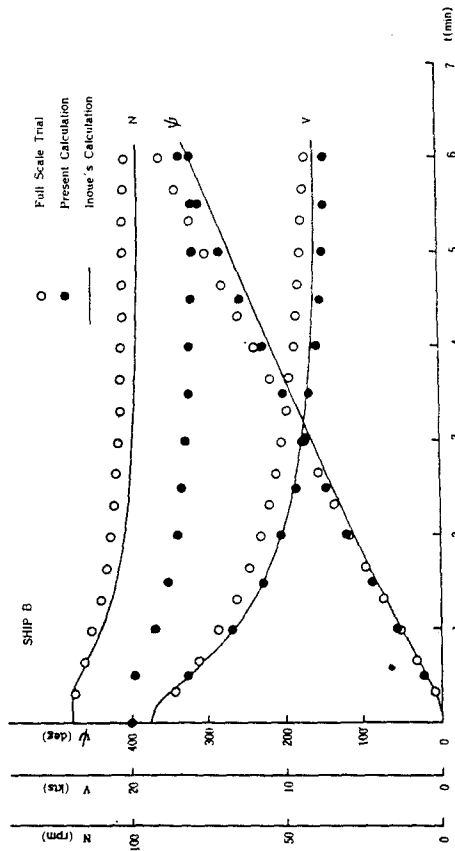


Fig. 5 Time histories of heading angle, ship speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship B)

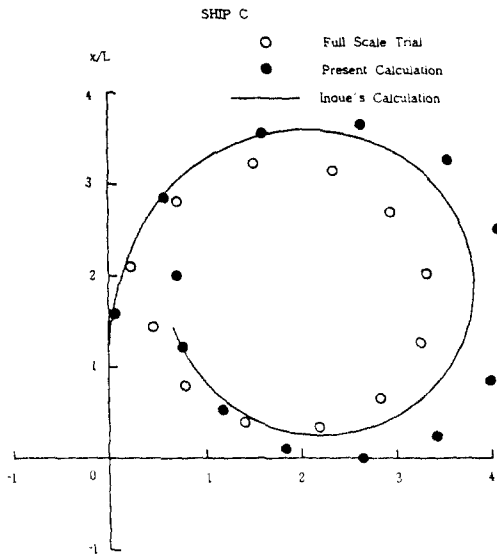


Fig. 6 Tuning trajectory (ship C)

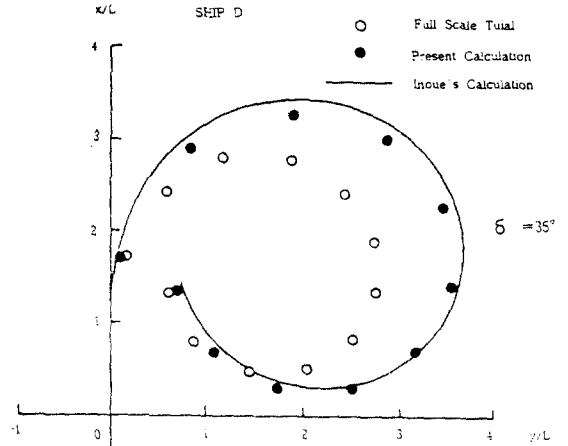


Fig. 8 Turning trajectory (ship D)

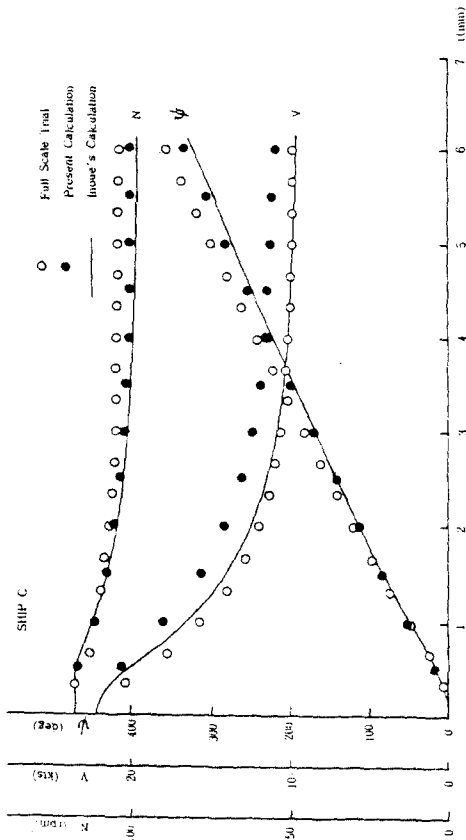


Fig. 7 Time histories of heading angle, ship speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship C)

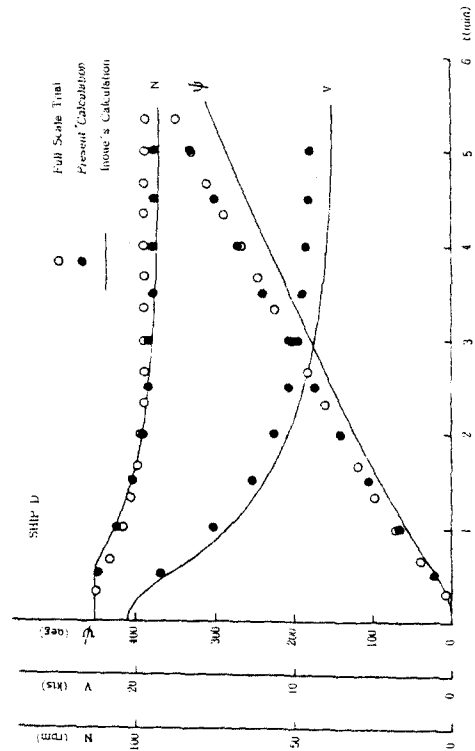


Fig. 9 Time histories of heading angle, ship speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship D)

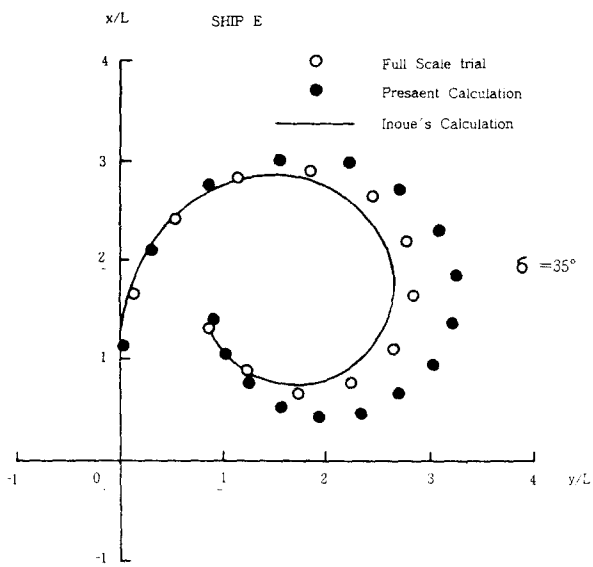


Fig. 10 Turning trajectory (ship E)

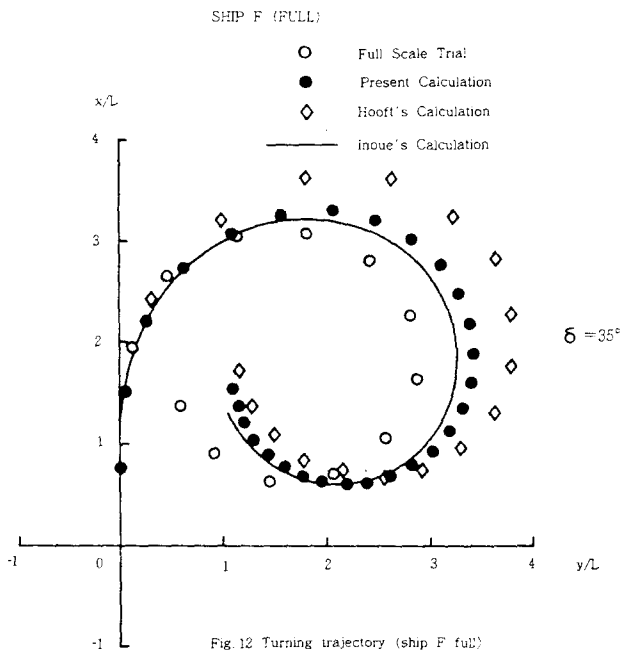


Fig. 12 Turning trajectory (ship F full)

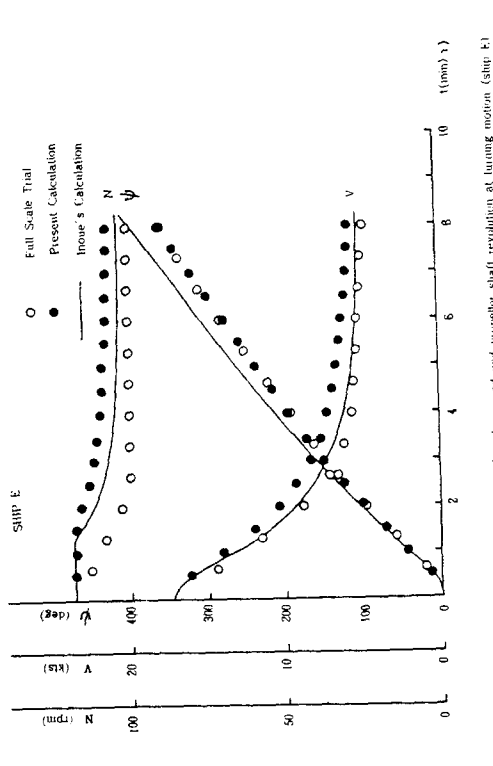


Fig. 11 Time histories of heading angle, ship speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship E)

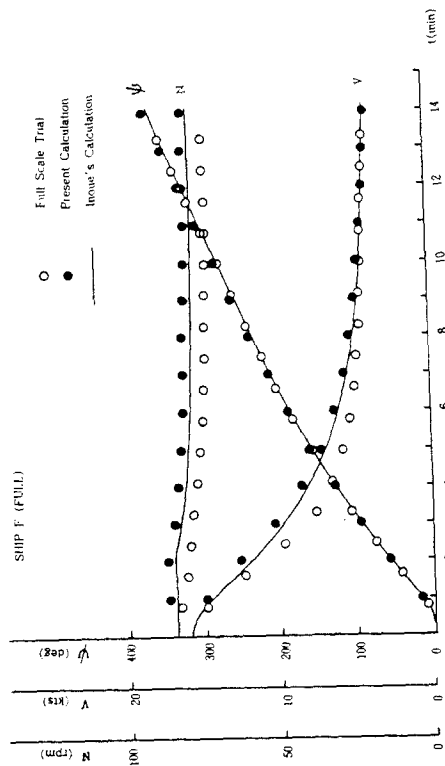


Fig. 13 Time histories of heading angle, ship speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship F full)

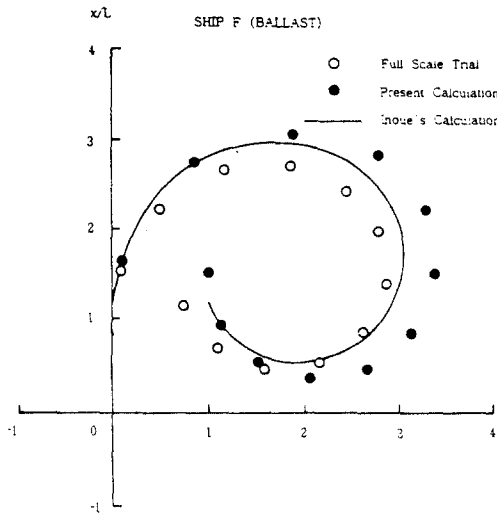


Fig. 14 Turning trajectory (ship F ballast)

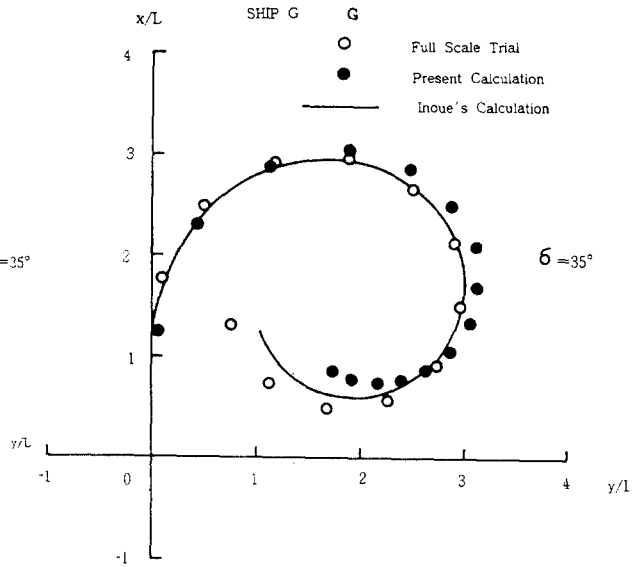


Fig. 16 Turning trajectory (ship G)

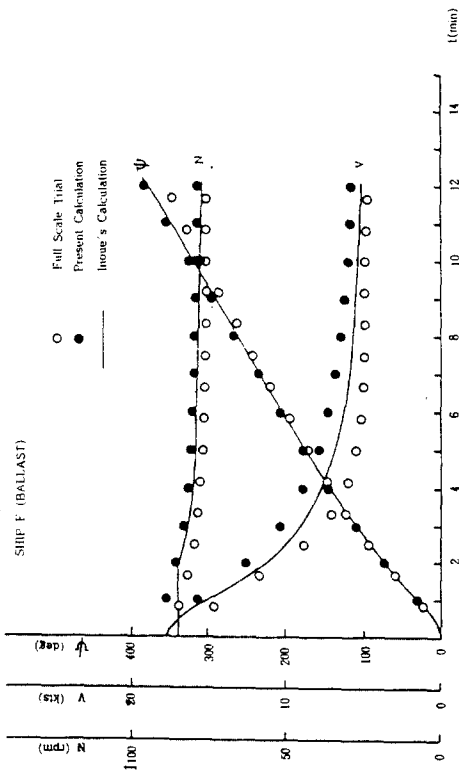


Fig. 15 Time histories of heading angle, slip speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship F ballast)

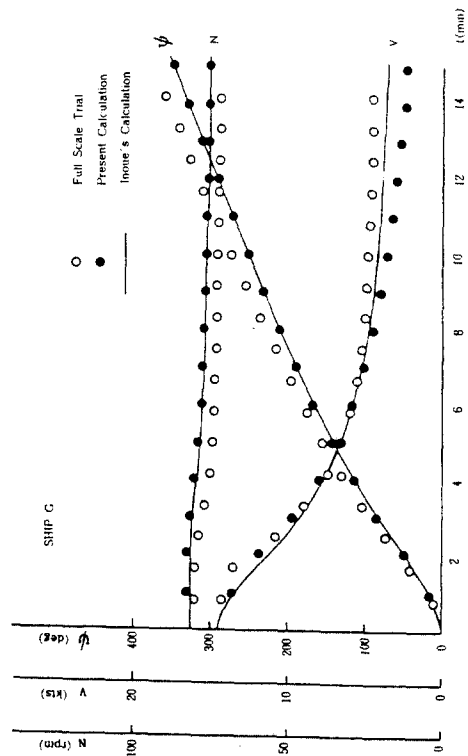


Fig. 17 Time histories of heading angle, slip speed and propeller shaft revolution at turning motion (ship G)

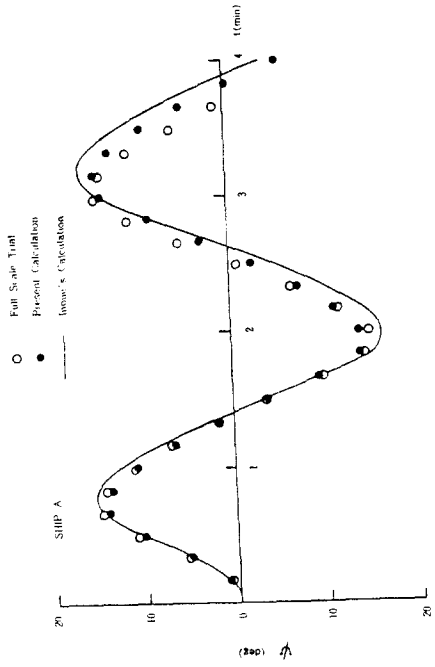


Fig. 18 10° Zig-Zag maneuver response (ship A)

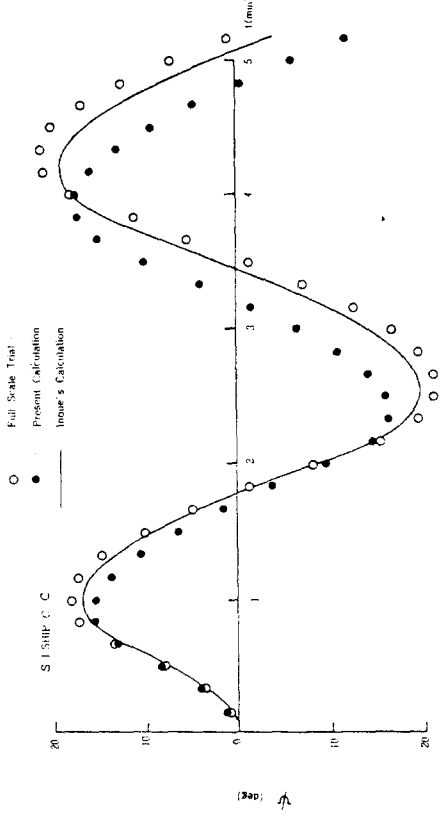


Fig. 20 10° Zig-Zag maneuver response (Ship C) Response

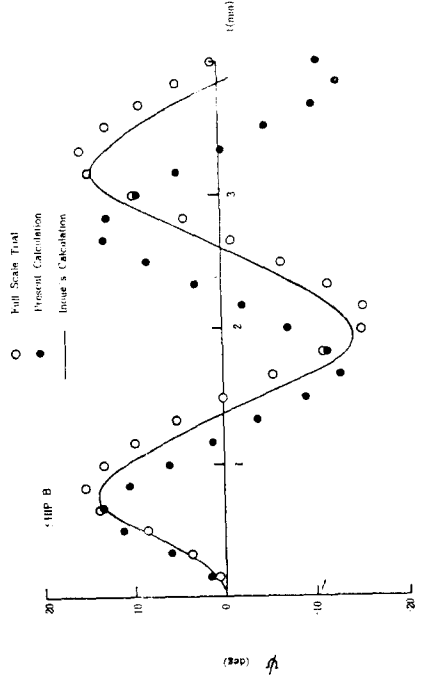


Fig. 19 10° Zig-Zag maneuver response (ship B)

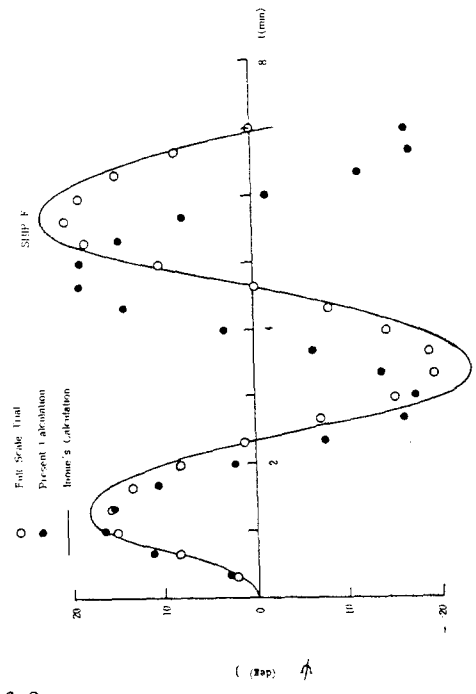


Fig. 21 10° Zig-Zag maneuver response (Ship E)

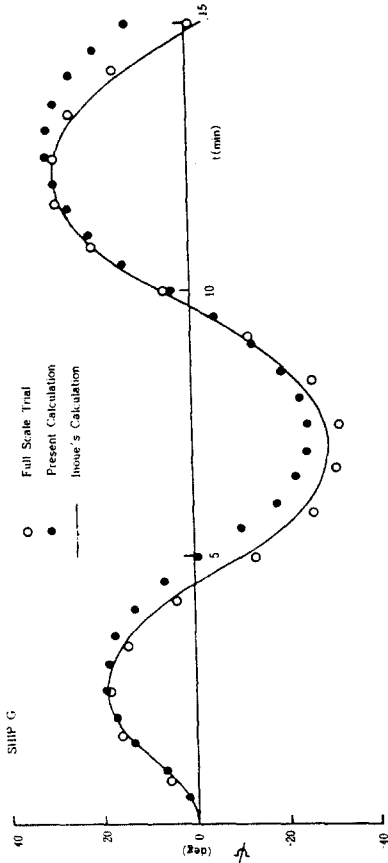


Fig. 22 10^{-6} Zig-Zag maneuver response (ship G)

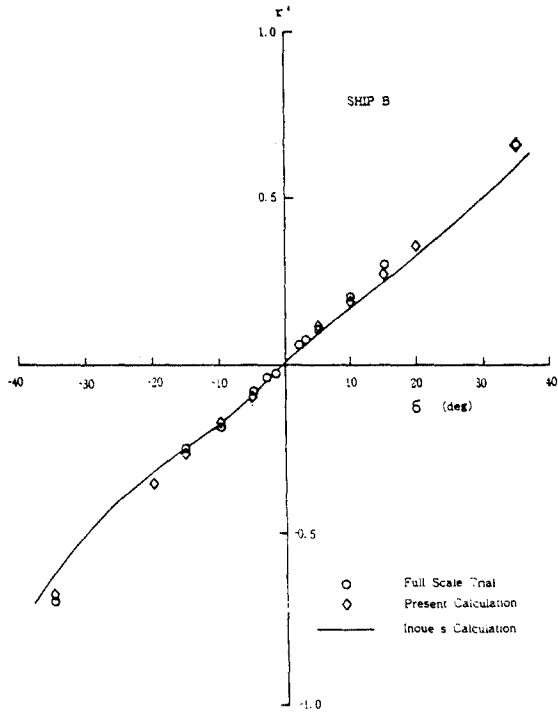


Fig. 24 Steady turning performance (ship B)

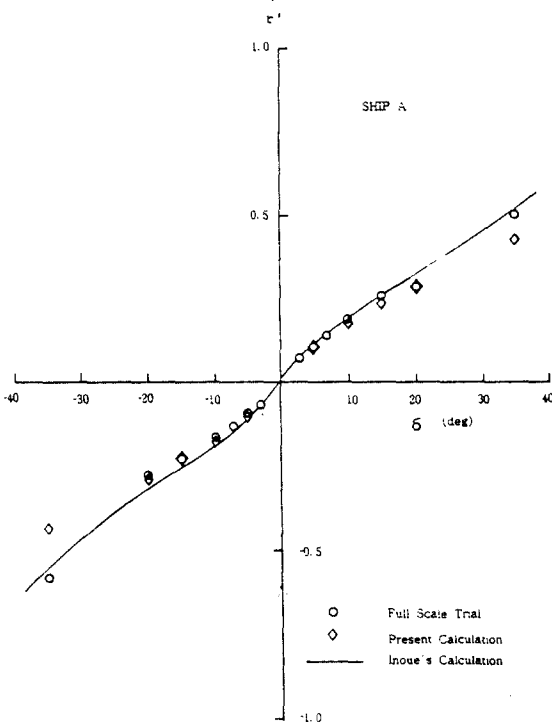


Fig. 23 Steady turning performance (ship A)

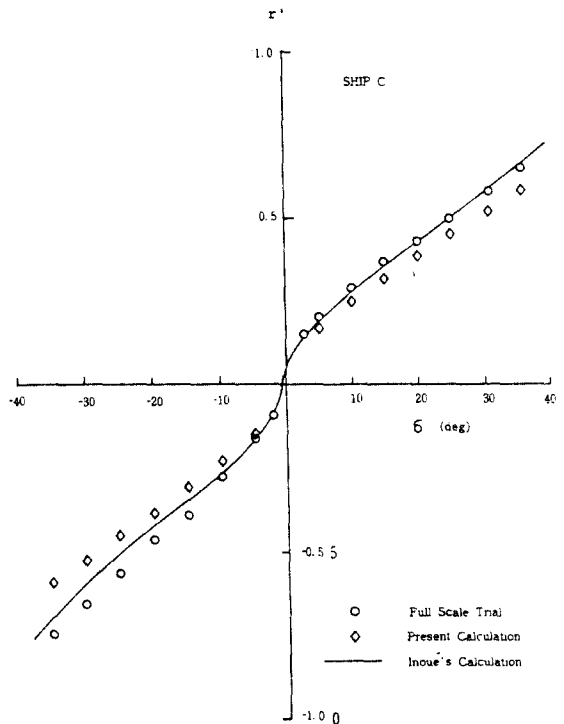


Fig. 25 Steady turning performance (ship C)

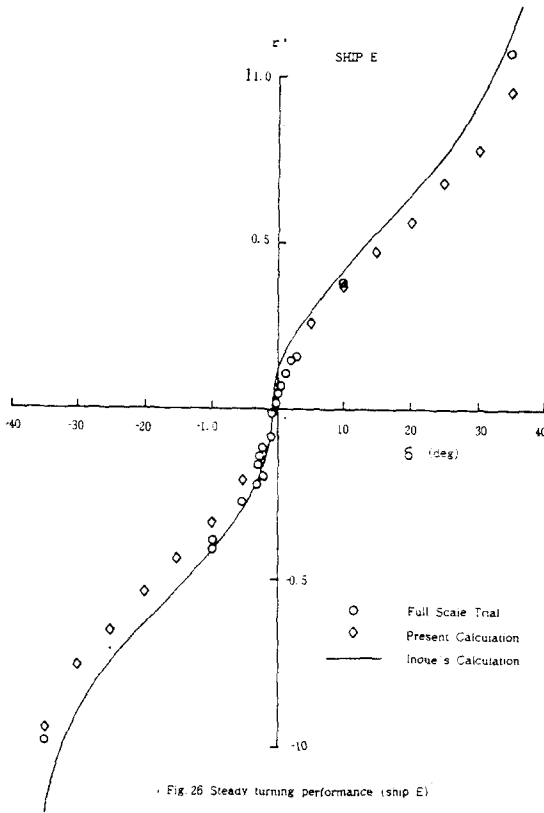


Fig. 26 Steady turning performance (ship E)

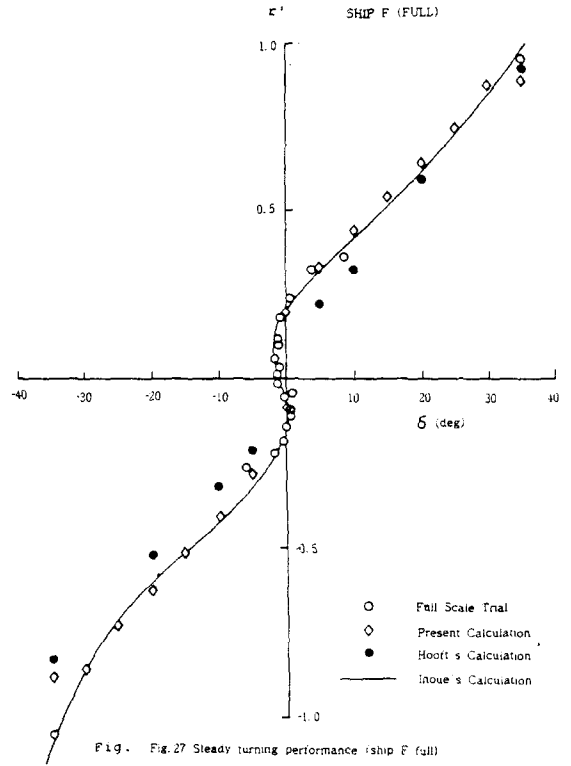


Fig. 27 Steady turning performance (ship F (full))

주기궤은 F, G선박이 증기터어번이고 나머지 선박은 모두 저속디젤엔진이다.

계산결과는 다음과 같다. Fig. 2~17은 A~G선박의 타각 35° 우회조타에 대한 선회운동의 계산결과이다. 그리고 이 계산결과를 문헌(4)의 자료와 비교하였다. 아울러 Fig. 12에는 동일한 선형에 대한 Hooft의 계산결과(17)를 추가하여 비교하였다. 선회운동의 계산결과는 선회항적, 선속변화, 회두각 및 프로펠러 회전수 변화에 대해서 나타내었다. 정상 직진시에 있어서의 선속과 프로펠러 회전수는 문헌(4)의 자료로부터 읽은 값을 이용하였다. 단, Fig. 5의 B선박에 대해서는 정상직진시의 프로펠러회전수를 식(36)에 의해서 추정된 값을 이용하였

다. 재화중량 1만톤급의 화물선에서부터 초대형 유조선에 이르는 모든 공시선형에 대해서 계산결과는 대략 실선시험결과와 일치하는 경향을 나타내고 있으며, 초기단계에서는 충분한 정도로서 조종성능평가가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 18~22는 A, B, C, E, G선박의 10°-10° Zig-zag 조종운동의 계산결과이다. Zig-zag 조종운동의 계산결과는 회두각에 대해서만 문헌(4)의 자료와 비교하였다. 계산결과는 실선시험결과 및 Inoue(4)의 계산치와 약간의 차이는 보이지만 어느정도 일치하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 23~27은 A, B, C, E, F선박의 Spiral 특성의 계산결과이다. Spiral 특성의 계

산결과는 실선시험결과 및 Inoue[4]의 계산치와 일치하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 미소타각의 Spiral특성이 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

이상, 선박의 조종성능평가를 위한 수학적모델에 관해서 고찰하였으며, 특히 초기설계단계에서 주선체, 프로펠러 및 타의 주요 목 자료만을 이용하여 임의의 선형에 대한 실선조종성능 평가법을 논하였다. 그리고 본 계산법에 따른 공시선의 계산결과를 실선시험결과[4]과 비교함으로써 본 계산법의 유효성을 검토하였다.

계산결과는 재화중량 1만톤급의 화물선으로부터 초대형 유조선에 이르는 모든 공시선에 대해서 실선시험결과를 잘 시뮬레이트하고 있으며, 초기설계단계에서는 충분한 정도(精度)로서 조종성능평가가 가능함을 확인할 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 조종운동의 유체현상을 수식 모델화하고 유체동역학적계수의 추정식을 유도하는 과정에서 많은 타 연구자들의 부분적 연구성과를 집대성하였으므로, 부분적 연구에서 다루었던 물리적 의미를 상세하게 논하지 못하였다. 이러한 점에 대해서는 관련되는 참고문헌을 활용하길 바라며, 앞으로의 연구성과에도 기대하는 바이다. 아울러 외력 및 제한수로 등과 같은 환경조건에 따르는 조종성능의 적절한 평가법 등의 문제는 앞으로의 중요 연구과제라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] IMO : Interim Guidelines for Estimating Manoeuvring Performancen in Ship Design. IMO MSC/Circ. 389(1985)
- [2] 貴島勝郎 : 操縦性能基準 と Manoeuvring Booklet に関する國際動向, 日本造船學會運動性能研究委員會 第2回 シンポジウム(1985)
- [3] Cojeen, H.P. et al. : One Approach to the Development and Achievement of Manoeuvring Standards, Proc. International Conference on Ship Manoeuvrability, Vol.1(1987)
- [4] Inoue, S. et al. : A Practical Calculation Method of Ship Maneuvering Motion, Intertnational Shipbuilding Progress, Vol.28, No. 325(1981)
- [5] 小川陽弘 et al. : MMG報告-I, II, III, IV, V, 日本造船學會誌, 第575, 577, 578, 579, 616號(1977~1980)
- [6] Dand, I.W. : On Modular Manoeuvring Models, Proc. Intern. Conf. on Ship Manoeuvrability, Vol.1(1987)
- [7] Asinovsky, V. et al. : Ship Manoeuvrability Analysis Using The Differential Approach, Proc. Intern. Conf. on Ship Manoeuvrability, Vol.1(1987)
- [8] 芳村康男 et al. : 増減速を伴う操縦運動の取扱いについて, 日本造船學會論文集, 第144號(1978)
- [9] 元良誠三 : 船體運動に對する附加質量及び附加慣性モーメントについて(1), (2), (3) 日本造船協會論文集, 第105, 106號(1959)
- [10] Clarke, D. et al. : The Apprication of Manoeuvring Criteria in Hull

- Design Using Linear Theory, The Naval Architect, March(1983)
- [11] Hooft, J.P. et al. :
Maneuverability of Frigates in Waves, Marine Technology, Vol. 25, No. 4(1988)
- [12] 松本憲洋 : 操縦流體力の數學モデルと操縦性能の推定, 日本大阪大學 博士學位論文(1983)
- [13] Hasegawa, K. : On a Performance Criterion of Autopilot Navigation, 日本關西造船協會誌, 第178號(1980)
- [14] 日本關西造船協會 : 造船設計便覽, 海文堂(1983)
- [15] 住吉弘己 : 水槽試驗結果の統計解析による一軸船の滿載状態における形狀影響係數の推定, 造技センター技報, 第2號(1974)
- [16] Inoue, S. et al. : Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring, Intern. Shipuiding Progress, Vol 28, No. 320(1981)
- [17] Hooft, J.P. et al. : Design Information on the Ship Manoeurability, NSMB Report No. 45931-1/2-NS(1984)
- [18] 小瀬邦治 et al. : 操縦性能推定に用いる數學モデルと模型試驗, 日本造船學會誌, 第668號(1985)
- [19] 藤井 齊 : 自航模型船による舵特性の研究(1), 日本造船學會論文集, 第107號(1960)
- [20] ITTC : Report on Performance Committee, 15th ITTC Proceedings(1978)
- [21] Yoshimura, Y. et al. : Steering Quality and Scale Effect on It for 564,000 DWT ULCC, 日本 關西造船協會誌, 第183號(1981)
- [22] 湯室彰規 : 斜航するプロペラの整流効果に関する實驗結果について, 日本造船學會論文集, 第145號(1979)
- [23] van Lammeren, W.P.A. et al. : Wageningen B-Screw Series, Trans. SNAME, Vol. 77(1969)

부 록 : 유효추력계수 C_1 , C_2 의 유도

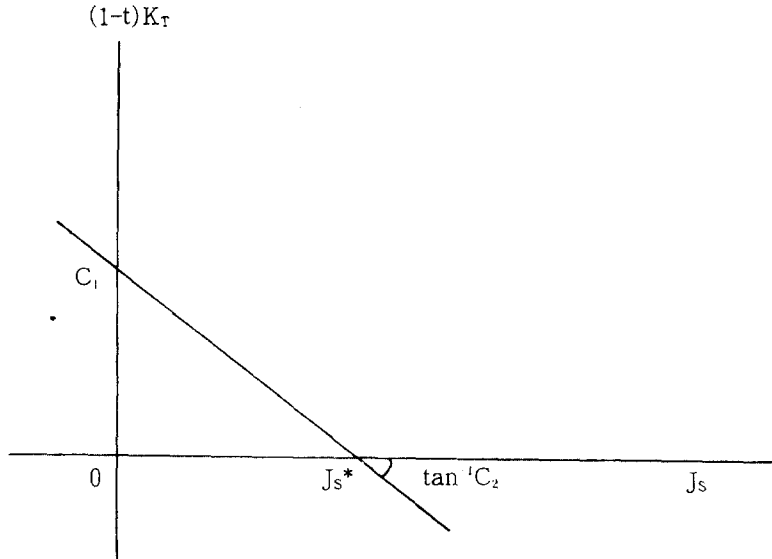


Fig. A-1

Fig. A-1의 횡축은 길보기 전진상수 J_s 를, 종축은 유효추력계수 $(1-t)K_T$ 를 나타낸다고 할 때, Yoshimura(8)는 $(1-t)K_T$ 를 J_s 의 1차함수로서 근사할 수 있음을 밝혔다. 즉

$$(1-t)K_T = C_1 - C_2 J_s \quad (A-1)$$

여기서 t 는 추력감소계수이다. 그리고 K_T , J_s 는 선박의 직진속도를 V , 프로펠러추력을 T 라 할 때 다음과 같이 표시된다.

$$\left. \begin{aligned} K_T &= T / \rho n^2 D^4 \\ J_s &= V / nD \end{aligned} \right\} (A-2)$$

한편, 정상직진시에는 다음 식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} R_T &= \frac{1}{2} \rho S_A V^2 C_T \\ &= \rho n^2 D^4 (C_1 - C_2 J_{s0}) \end{aligned} \right\} (A-3)$$

여기서 R_T 는 전저항, J_{s0} 는 정상직진시의 J_s 의 값을 의미한다.

유효추력계수 $(1-t)K_T$ 가 0이면 프로펠러 슬립 또한 거의 0이라 가정할 수 있으므로 다음 식이 성립한다.

$$J_s^* = \left(\frac{P}{D}\right) \frac{1}{1 - w_{p0}} \quad (A-4)$$

여기서 J_s^* 는 $(1-t)K_T=0$ 일때의 J_s 를 나타낸다. 따라서

$$C_2 = C_1 / J_s^* \quad (A-5)$$

식(A-3), (A-4), (A-5)로부터 C_1 , C_2 는 다음과 같이 구해진다.

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{C_T}{2s_0} \left(\frac{S_A}{Ld}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{d}{D}\right) J_{s0}^2 \\ C_2 &= C_1 (1 - w_{p0}) / \left(\frac{P}{D}\right) \end{aligned} \right\} (A-6)$$

식(A-6)은 본문의 식(9)이다.