

타의 형상 변화가 침로안정성에 미치는 영향에 관한 연구

김진형¹⁾, 손경호²⁾

A Study on the Effect of Rudder Shape on Course Stability of a Ship

Jim-Hyoung Kim¹⁾, Kyoung-Ho Sohn²⁾

Abstract

Recently the manoeuvring performance of full-form ship has been of greater importance than ever from a safety point of view. In the background of this trend, IMO(International Maritime Organization) has adopted Interim Standards for Ship Manoeuvrability, which become effective from the 1st day of July, 1991. It is desirable that new ship have to meet the standards.

According to the standards, course stability of a full-form ship is very important. In order to devise the method to improve course stability, the author conducted rudder open test and various captive model test related to course stability problem with versatile rudders. And then the author calculated the effects of rudder shapes on course stability.

1. 서론

- 1) 한국해양대학교 선박공학과 석사과정 선박유체 전공
- 2) 한국해양대학교 조선공학과 교수

선박의 전용화 및 대형화 추세가 본격화된 1970년대부터 조종성과 관련된 문제점이 나타나기 시작하였으며, 조종성이 조선소, 선박 운항자 및 정부 관계자의 관심 기술 분야로서 인식되었다[1]. 그후 IMO에서 검토된 주된 내용은 조종성 기준 제정 및 조종성 소책자(manoeuvring booklet)에 관련된 사항이었으며, 그 결과 1993년 11월 IMO 총회에서 조종성 잠정 기준(Interim Standards for Ship Manoeuvrability) A.751을 채택하게 되었다[2]. 따라서 선진 조선국 및 우리나라의 각 조선소에서는 기본설계 단계에서 조종성을 중요한 설계 요소로서 고려하지 않으면 안될 입장에 놓이게 되었다[3].

한편, 조종성 잠정 기준의 4가지 항목중 특히 대형선의 경우, 가장 문제시 되는 것은 침로안정성이라고 예상된다[4]. 침로안정성은 선체 선미부 측면형상 또는 타의 형상과 관련이 많으므로[5], 일단 선박이 건조된 후에는 선미 형상의 설계 변경은 거의 불가능하므로 침로안정성을 개선시키는 유력한 수단으로서 선미 부가물 설치 또는 타의 형상 개조에 의한 방법이 생각될 수 있다. 이중에서 선미 부가물 설치는 저항 증가와 함께 선박의 운항에 많은 지장을 초래하므로, 우선적으로 생각될 수 있는 것이 타의 형상 개조에 의한 방법이라고 생각된다.

이러한 배경하에, 본 연구에서는 기존타의 형상 개조에 의해서 전체적인 조종성능을 해치지 아니하면서, 침로안정성 개선 효과를 확보할 수 있는 방법을 모색하고자 한다. 구체적으로, 여러 특수 형태의 타를 동일 선체에 적용시켰을 때의 침로안정성의 개선 효과를 조사하기 위해서, 타의 형상 변화에 기인하는 침로안정성의 평가 기법을 논하였으며, 구속모형시험 결과를 이용하여 침로안정성을 분석, 비교하였다.

2. 침로안정성 평가를 위한 운동학적 정식화

Fig. 1과 같이 선체중양(midship)에 좌표 원점을 둔 동좌표계를 $O-xyz$ 라 할 때, 조종운동의 기본방정식은 다음과 같이 표시된다[7].

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

여기서 m 은 선체의 질량이고, I_{zz} 는 z 축 주위의 질량 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 1차 도함수이고, x_G 는 무게중심의 x 좌표이다. X , Y , N 은 각각 x , y 축 방향 유체력과, z 축 주위의 유체력모멘트이다.

식(1)에서 조종운동이 미소하다고 가정하면, 조종운동에 따른 선속 변화는 무시될 수 있으며, 유체력 Y , N 은 선형 유체력미계수로써 표시할 수 있으므로, sway-yaw 선형 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -(m' + m_v')\dot{\beta}' - Y_{\beta}'\beta + (m'x_G' + m_y'a')\dot{r}' - \{Y_r' - (m' + m_x')\}r' &= Y_{\delta}'\delta \\ (I_{zz}' + J_{zz}')\dot{r}' - (N_r' - m'x_G')r' - (m'x_G' + m_y'a')\dot{\beta}' - N_{\beta}'\beta &= N_{\delta}'\delta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 운동변수, 질량 및 유체력 등은 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$\begin{aligned} v' &= v/V, \quad r' = r(L/V), \quad l' = l(V/L), \quad x_G' = x_G/Lm', \\ m_x', m_y' &= m, \quad m_v' = \frac{1}{2}\rho L^2 d, \quad I_{zz}', J_{zz}' = I_{zz}, J_{zz} / \frac{1}{2}\rho L^4 d \\ X', Y' &= X, Y / \frac{1}{2}\rho L d V^2, \quad N' = N / \frac{1}{2}\rho L^2 d V^2 \\ v' &= -\sin\beta \approx -\beta, \quad \dot{v}' \approx -\dot{\beta}', \quad a' = a/L \end{aligned}$$

그리고 ρ 는 유체의 밀도, l 는 시간, L 과 d 는 각각 선체길이(수선간장)와 평균흘수, a 는 m_v 의 중심의 x 좌표이다.

식(2)로부터 보통의 배수량형 선박의 침로안정성은 다음 식에 의해서 판별된다.

$$l_d' = \frac{N_r' - m'x_G'}{Y_r' - (m' + m_x')} - \frac{N_{\beta}'}{Y_{\beta}'} > 0 \quad (3)$$

여기서 l_d' 를 침로안정성 레버(stability lever)라 정의한다. 침로안정 즉, $l_d' > 0$ 의 조건은 yaw damping 레버가 sway damping 레버보다 크야 한다.

타의 형상 변화에 기인하는 침로안정성을 보다 분석적으로 평가하기 위해서, 유체력미계수를 분리형 수학모델[7]을 이용하여 표시하면 식(2)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -(m' + m_v')\dot{\beta}' - Y_{\beta}'_{HP}\beta + (m'x_G' + m_y'a')\dot{r}' - \{Y_r'_{HP} - (m' + m_x')\}r' &= Y_R'\delta \\ (I_{zz}' + J_{zz}')\dot{r}' - (N_r'_{HP} - m'x_G')r' - (m'x_G' + m_y'a')\dot{\beta}' - N_{\beta}'_{HP}\beta &= N_R'\delta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 좌변의 유체력미계수에 표시한 하침자 HP 는 타가 설치되지 아니한 상태(즉, hull + propeller)를 의미한다. 그리고 Y_R' 와 N_R' 는 타(rudder)의 존재에 기인하는 유체력($Y_R' = Y_R / \frac{1}{2}\rho L d V^2$, $N_R' = N_R / \frac{1}{2}\rho L^2 d V^2$)을 의미하며, 타각 δ 및 조종운동 β , r' 의 함수이다.

타에 기인하는 유체력은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \\ F_N &= 1/2 \rho A_R V_R^2 f_a \sin \alpha_R \end{aligned} \quad (5)$$

타에 유입하는 흐름의 유효앙각 α_R 은 Fig. 2를 참조하여 다음과 같이 표시한다.

$$\alpha_R = \delta - \gamma(\beta - l'_R r') \quad (6)$$

여기서 γ 를 정류계수라 정의한다. 그리고 $l'_R = l_R/L$ 이다.

식(6)으로부터 조종운동중 타직압력이 영이 되는 타각을 δ_R 이라 하면

$$\delta_R = \gamma(\beta - l'_R r') \quad (7)$$

식(5), (6)을 식(4)에 대입하면 미소 타각과 미소 조종운동에 대해서는 근사적으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} &-(m' + m_y')\dot{\beta}' - Y'_{\beta HP}\beta + (m'x'_G + m_y'\alpha')\dot{r}' - \{Y'_{r HP} - (m' + m_x')\}r' \\ &= -\left(\frac{A_R}{Ld}\right)\left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a (1 + a_H) \{ \delta - \gamma(\beta - l'_R r') \} \\ &(I_{zz}' + J_{zz}')\dot{r}' - (N'_{r HP}r' - m'x'_G) - (m'x'_G + m_y'\alpha')\dot{\beta}' - N'_{\beta HP}\beta \\ &= -\left(\frac{A_R}{Ld}\right)\left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a (x'_R + a_H x'_H) \{ \delta - \gamma(\beta - l'_R r') \} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $x'_R, x'_H = x_R, x_H/L$ 이다. 식(2)과 식(8)를 각각 비교함으로써 HPR 상태 (즉, hull+propeller+rudder)에서의 유체력미계수 Y'_{β}, N'_r, \dots 는, HP 상태에서의 유체력미계수 $Y'_{\beta HP}, Y'_{r HP}, \dots$ 와 다음 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} Y'_{\beta} &= Y'_{\beta HP} + \left(\frac{A_R}{Ld}\right)\left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a (1 + a_H)\gamma \\ N'_{\beta} &= N'_{\beta HP} + \left(\frac{A_R}{Ld}\right)\left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a (x'_R + a_H x'_H)\gamma \\ Y'_{r} &= Y'_{r HP} - \left(\frac{A_R}{Ld}\right)\left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a (1 + a_H)\gamma l'_R \\ N'_{r} &= N'_{r HP} - \left(\frac{A_R}{Ld}\right)\left(\frac{V_R}{V}\right)^2 f_a (x'_R + a_H x'_H)\gamma l'_R \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)를 이용하여, HP 상태에서의 유체력미계수 ($Y'_{\beta HP}, Y'_{r HP}, \dots$) 및 타직압력과 관련된 실험정수를 각각 구해줌으로써 타의 형상 변화에 따른 HPR 상태에서의 유체력미계수를 결정할 수 있고, 이들 유체력미계수를 이용하여, 식(3)으로부터 침로안정성을 평가할 수 있다.

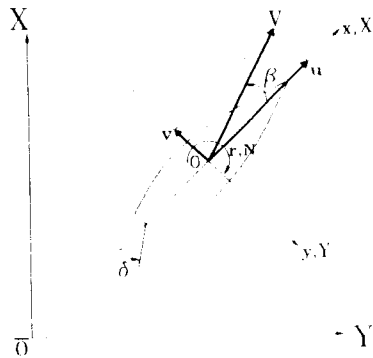


Fig. 1 Coordinate system

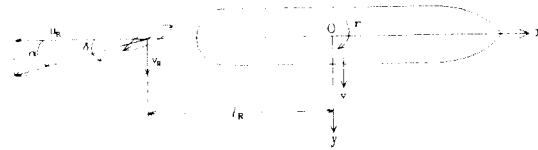


Fig. 2 Effective inflow angle of attack to rudder

3. 구속모형시험 및 침로안정성

3.1 실험시설, 공시선 및 공시타

본 연구에 이용한 회류수조는 길이 12.5 m , 폭 2.2 m , 높이 5.2 m 인 2 임펠러 방식의 수직순환형으로서, 관측부인 개구부는 길이 5 m , 폭 1.8 m , 수심 0.9 m 이다. 본 회류수조의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. 그리고 구속모형시험시 관측부에서의 수직방향 유속분포의 측정 결과의 일부를 Fig. 4에 나타낸다.

본 연구에서 채택한 선형은 실선 264 m 의 탱커 선형으로서 실선과 모형선의 주요목은 Table 1과 같다. 그리고 본 연구에서 채택한 모형타는 Table 1에 나타낸 원형타(original rudder)를 포함하여 총 5종이며 단면 형상은 NACA0020으로서 동일하다. 그리고 모형타의 주요목과 측면 형상을 Fig. 5에 나타낸다.

A타는 원형타이며, B타는 볼록타로서 측면에 일정한 간격으로 수평방향으로 볼록한 띠를 설치하였으며, C타는 오목타로서 측면에 일정한 간격으로 수평방향으로 오목한 홈을 설치하였다. D타는 플랩타(flap rudder)인데, 본 연구에서는 플랩의 양각(θ)을 15° 로 일정하게 유지하여 주타와 플랩을 일체형으로 고정시켰다. E타는 상하면에 판(end plate)을 설치한 타(이하 엔드플레이트 타라 함)이며 엔드플레이트는 Schilling 타를 참고하여⁸⁾ 제작하였다.

Table 1 Principal particulars of ship and model

items		ship	model
HULL			
Length B.P.	L (m)	264.0	2.0
Breadth(moulded)	B (m)	47.8	0.3621
Draft(moulded)	d (m)	16.0	0.1212
Trim	τ (m)	0.0	0.0
Block coefficient	C_B	0.8210	0.8210
Midship section coefficient	C_M	0.9978	0.9978
RUDDER			
Height	H (m)	11.5	0.0825
Area ratio	A_R/Ld	1/57.1	1/51.0
Aspect ratio	λ	about 1.5	1.4323
PROPELLER			
Diameter	D (m)	8.0	0.061
Pitch ratio	P/D	0.709	0.709
Expanded area ratio	A_e/A_o	0.490	0.490
No. of blades		4	4

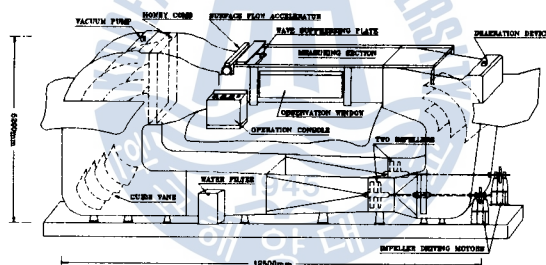
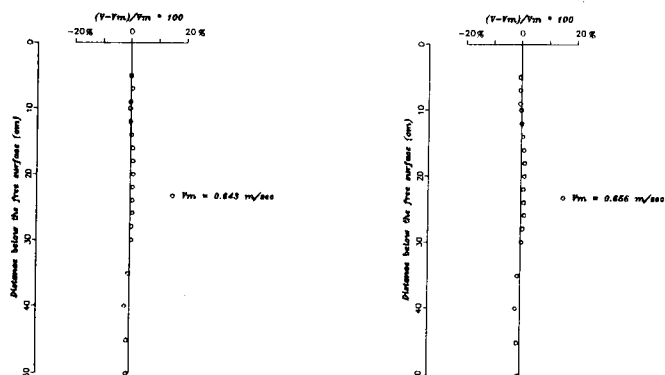


Fig. 3 Schematic diagram of circulating water channel

Fig. 4 Velocity distribution depth-wise at working section
(V_m : mean velocity)

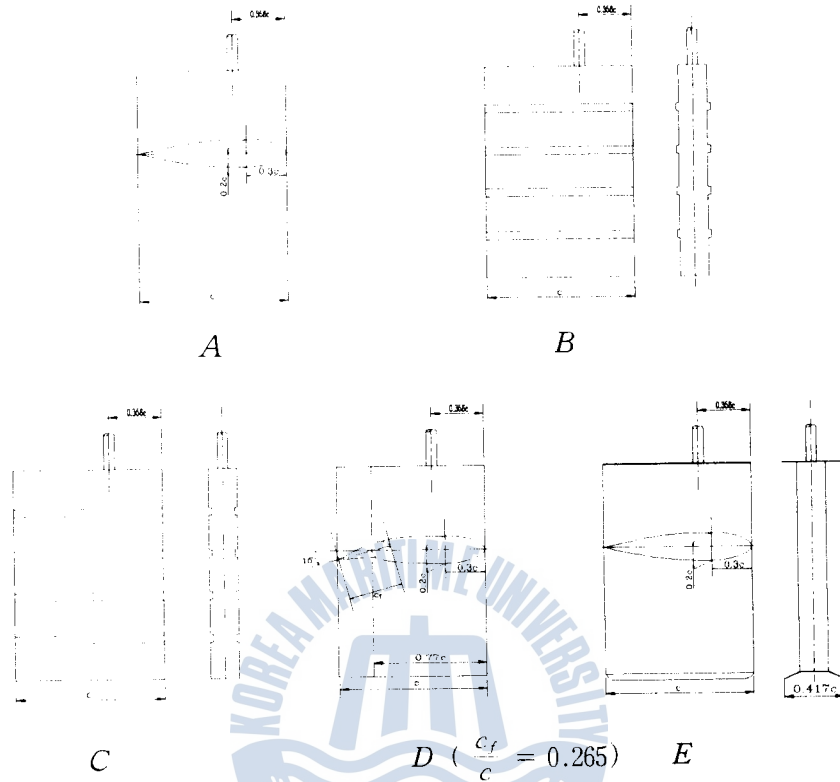


Fig. 5 Profiles of model rudders

3.2 타 단독시험

타의 형상 변화에 의한 양력 특성 개선 효과를 파악하기 위해서 앞에서 언급한 원형타(A타), 블록타(B타), 오목타(C타), 플랩타(D타), 엔드플레이트 타(E타)의 단독성능을 검토하였다. 단독시험에 이용한 모형타의 주요 치수 및 실험시의 유속과 Reynolds 수(R_n) 등은 Table 2와 같다.

타 단독시험시의 타직압력 F_N 과 무차원화한 타직압력 C_N 은 다음과 같이 표시한다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V^2 f_a \sin \delta \quad (10)$$

$$C_N = F_N / \frac{1}{2} \rho A_R V^2 = f_a \sin \delta$$

참고로, C_N 에 대한 Fujii식은 다음과 같다[10].

$$C_N = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \sin \delta \quad (11)$$

여기서 λ 는 타의 종횡비이다.

Table 2에 표시한 Exp. cond.(I), (II)에 대한 A, B, C, D, E타의 타직압력 측정 결과와 Fujii 식을 이용한 C_N 값을 동시에 Fig. 6에 나타낸다. 단, D타는 플랩각(θ)을 15° 로 일정하게 유지하였다. Fig. 6으로부터 다음 사항을 알 수 있다. 타직압력의 크기는 Exp. cond.(I)에서의 값이 Exp. cond.(II)에서의 값보다 전반적으로 크게 측정되었다. 이것은 R_n 의 차이에 의한 척도효과(scale effect)에 기인한다고 생각된다. Okada는 회류수조에서의 타 단독성능 실험결과를 비교, 분석하여 R_n 이 약 0.1×10^6 이상이면 척도 효과가 무시된다고 하였다[9]. 본 실험 결과에서도 Exp. cond.(II)에서 A타의 직압력계수의 경사는 Fujii식과 거의 일치함을 알 수 있다.

다음으로 타직압력 특성을 비교하기 위해서 Fig. 6의 실험자료를 선형 근사하여 타직압력계수의 경사 f_δ 를 구하여 Fig. 7에 나타낸다. 단, D타의 경우에는, 플랩타의 양력 특성에 미치는 플랩각의 영향은 주타각 δ 에 관계없이 일정하다고 한 Kato의 연구 결과[11]로부터, $\theta = \delta$ 와 같이 주타각과 플랩각을 동시에 취하였을 때의 직압력 기울기를 다음과 같이 추정하였다. 예를 들면 Exp. cond.(II)에서 $\Delta C_L = 0.20$, A타의 기울기 2.339이므로 D타($\theta = \delta$ 일 때)의 기울기는 $(2.339 \times 15^\circ \times \pi/180 + 0.20)/(15^\circ \times \pi/180) \approx 3.103$ 과 같다. 마찬가지로 방법으로 Exp. cond.(I)에서는 3.246 정도가 된다. 여기서 ΔC_L 은 양력증가량의 무차원치($1/2\rho A_R V^2$ 으로 무차원화)이다.

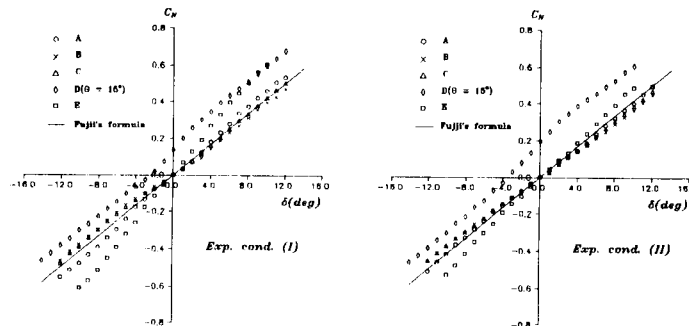


Fig. 6 Normal force coefficients of rudders in open water

Table 2 Experimental conditions of open rudder test

Kind of rudder	Chord length	Height	Water velocity	Reynolds No.	Exp. cond.
A, B, C, D, E	8.64 cm	12.4 cm	0.661 m/sec	0.058×10^6	(I)
A, B, C, D, E	8.64 cm	12.4 cm	1.253 m/sec	0.110×10^6	(II)

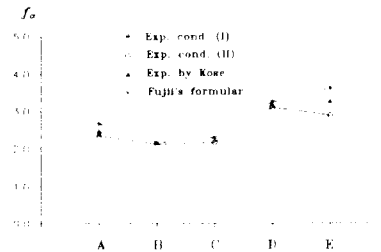


Fig. 7 Gradient of rudder normal force in open water

3.3 유체력 제 계수의 측정

선형 유체력미계수를 구하기 위해서 식(9) 우변항으로 표시되는 유체력 제 계수를 구속모형시험에 의해 측정하였다.

구속모형시험 결과는 다음과 같다. Fig. 8은 $Y'_{\beta III}$ 와 $N'_{\beta III}$ 를 구하기 위한 실험 결과인데, 아울러 프로펠러 하중이 선체 유체력에 미치는 영향까지를 함께 조사하였다. 여기서 n 은 매초당 프로펠러 회전수, n_0 는 ship point에 해당하는 프로펠러 회전수이다. Figs. 9~10은 $(\frac{V_R}{V})^2 f_\alpha$ 즉, $[\frac{dF'_N}{d\delta}]_{\delta=0}$ 를 구하기 위한 실험 결과이다. Figs. 11~12는 직진시 조타시험 결과로부터 식(5)에 의한 a_H , x'_H 를 구한 결과로서 프로펠러 하중도 변화를 함께 조사하였다. Fig. 13은 식(9)에 의한 δ_R 을 구하기 위한 실험 결과로서 대표적으로 A타를 설치하였을 때 $\beta > 0$ 의 결과만을 나타낸다. Fig. 14는 정류계수 γ 를 구하기 위한 δ_R 의 실험 결과이다.

이상과 같이 침로안정성 검토를 위한 구속모형시험 결과를 Table 3에 나타낸다. 단, γ 의 값은 Fig. 14에서 원점 부근에서의 기울기를 구하기 위해 δ_R 의 비선형 영향은 고려하지 아니하고 $\beta = -2^\circ \sim 8^\circ$ 의 측정치를 선형 근사하여 구하였다. 그리고 D타의 γ 값은 A타의 측정 결과를 그대로 이용한다.

Fig. 15은, 식(9)의 유용성을 검증하기 위해서 Y_{HP}' , N_{HP}' 및 타직압력과 관련된 실험정수를 이용하여 추정한 Y_{HPR}' , N_{HPR}' 와, HPR 상태에서 사항시험에 의해 직접 구한 실험치를 비교한 것이다. 대표적으로 E타를 설치한 경우를 나타내고 있다.

본 연구에서 제시한 식(9)의 유용성이 확인되었으므로 타의 형상 변화에 따른 유체력미계수를 Table 3을 이용하여 구하고, 이 결과로부터 침로안정성 레버 l_d' 를 식(3)를 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 Fig. 16에 나타낸다.

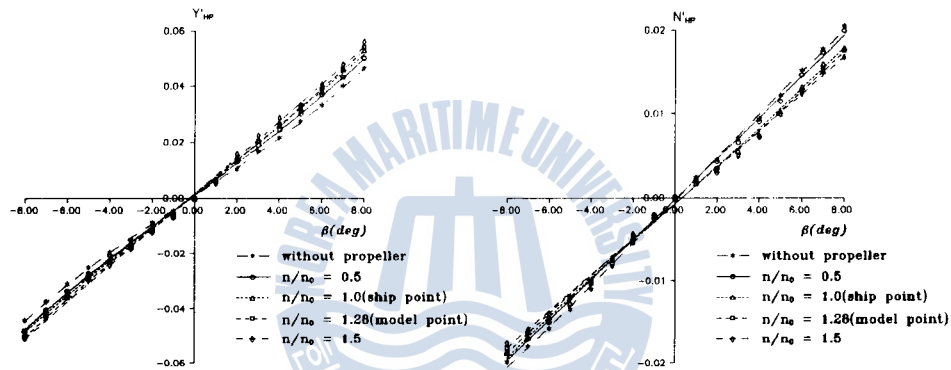


Fig. 8 Effect of propeller load on lateral force & yaw moment

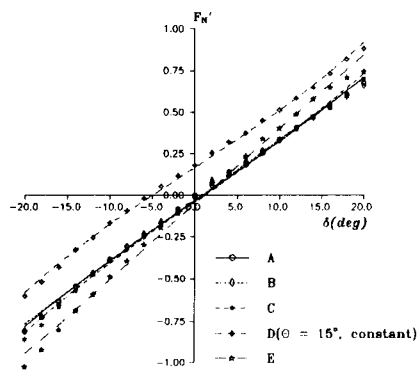


Fig. 9 Rudder normal force induced by steered rudder on the straight course ($n/n_0 = 1.0$)

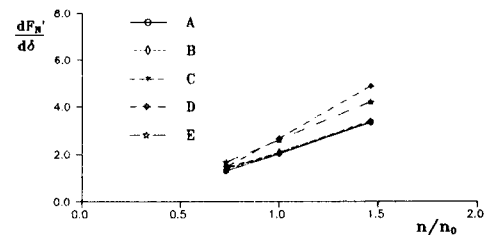


Fig. 10 Effect of propeller load on the slope of rudder normal force on the straight course

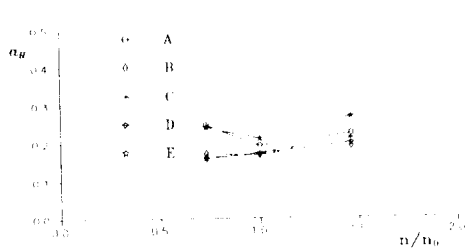


Fig. 11 Effect of propeller load on hull-rudder interaction factor a_H

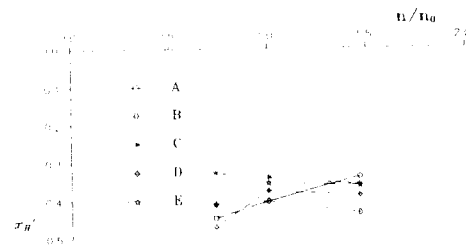


Fig. 12 Effect of propeller load on hull-rudder interaction factor x_H'



Fig. 13 Rudder normal force induced by steered rudder in obliquely running motion(Rudder A, $n/n_0 = 1.0$)

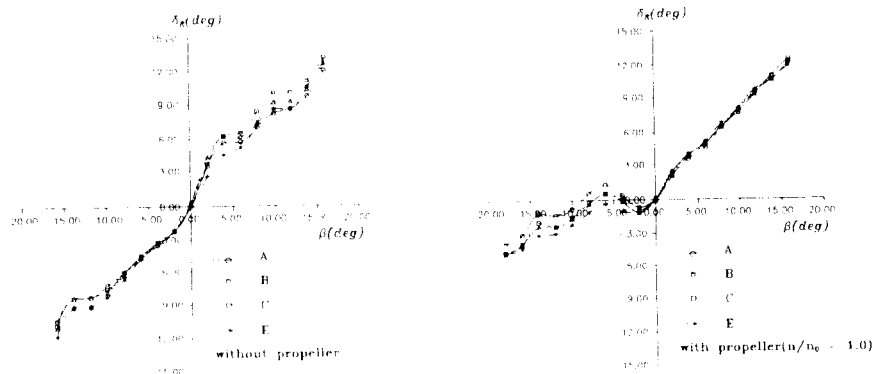


Fig. 14 Rudder angle at which the normal force acting on rudder is nulled out in obliquely running motion

Table 3 Hydrodynamic derivatives and coefficients

$Y'_{\beta HP}$	0.34265	$N'_{\beta HP}$	0.12626
$Y'_{r HP}$	0.05572	$N'_{r HP}$	-0.059796
m'	0.29803	m'_x	0.0205
x'_R	-0.5	l'_R	-0.9
x'_G	0.031		

Kind of rudder	a_H	x_H'	$(\frac{V_R}{V})^2 f_\alpha$	γ
A	0.193	-0.403	2.019	0.751
B	0.167	-0.402	2.080	0.773
C	0.172	-0.339	2.055	0.766
D	0.170	-0.375	2.643	0.751
E	0.212	-0.354	2.600	0.807

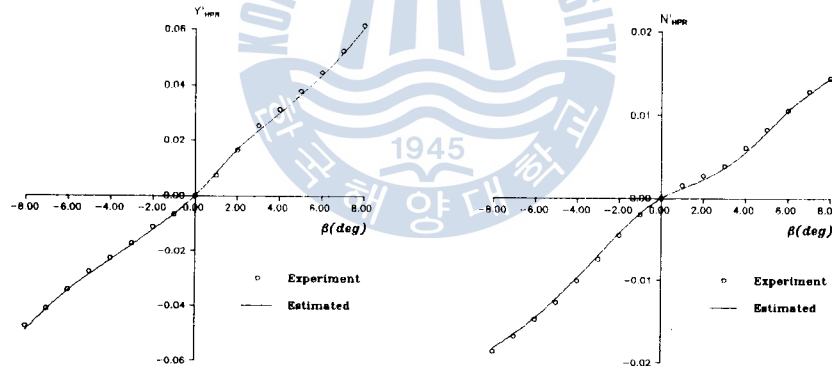


Fig. 15 Lateral force induced by oblique running(Rudder E, $n/n_0 = 1.0$)

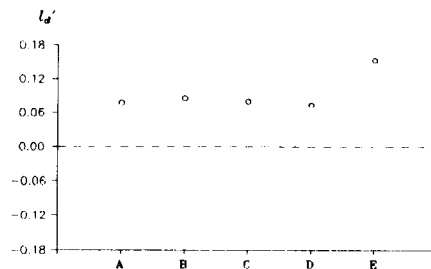


Fig. 16 Comparison of stability lever($n/n_0 = 1.0$)

4. 결 론

본 연구에서는 타의 형상 변화에 기인하는 침로안정성의 개선 가능성을 조사하기 위해서, 타 단독시험과 구속모형시험을 실시하였으며 그 결과를 이용하여 침로안정성을 분석적으로 비교, 검토하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) *IMR* 상태에서의 선형 유체력미계수는 분리형 수확모델의 각 유체력미계수 및 타직압력과 관련된 실험정수로부터 추정 가능함을 밝혔고, 이를 실험 결과로부터도 검증하였다.
- (2) 타의 형상 변화에 기인하는 침로안정성의 비교, 검토에는 상기 방법이 유력한 수단임을 알 수 있었으나, 타의 형상만의 변화는 정류계수에는 거의 영향을 미치지 아니한다.
- (3) 특수타의 단독시험 결과, 볼록타와 오목타는 양력 특성이 개선되지 아니하며, 플랩타와 엔드플레이트 타는 양력 특성이 크게 개선된다는 것을 확인하였다. 특히 엔드플레이트 타는 어느 정도 2차원 익(翼)의 특성을 가지므로 양력 개선 효과가 탁월하다.
- (4) 특수타의 설치가 침로안정성에 미치는 영향은, 볼록타와 오목타 및 플랩타는 침로안정화에 기여하지 못하고, 엔드플레이트 타는 침로안정성을 향상시킨다. 한편, 엔드플레이트 타의 상하면에 설치된 엔드플레이트의 최적 형상에 관해서는 앞으로 검토해야 할 과제라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] IMO, "Recommendation on Information to be Included in the Manoeuvring Booklets", Resolution A.209(VII), 1971.

- [2] IMO, "Interim Standards for Ship Manoeuvrability", Resolution A.751(18), 1993.
- [3] 강 창구, "IMO 선박 조종성 기준", 대한조선학회지, 제30권 제2호, 1993.
- [4] Kose, K., "船舶の運航安全と操縦性基準について", 船舶の操縦性基準に関する研究成果報告會, 日本造船研究協會, 1994.
- [5] Tatano, H., et al., "Effects of Stern Profile on Course Stability of Full-Bodied Ships, Technology Reports of the Osaka University, Vol. 27, No. 1388, 1977.
- [6] Kose, K., et al., "船尾形狀が操縦性能に及ぼす影響に関する研究", 日本西部造船會會報, 第78號, 1989.
- [7] Ogawa, A., et al., "MMG報告(I) - 操縦運動の數學Modelについて -", 日本造船學會誌, 第575號, 1977.
- [8] Bingham, V. P., et al., "High Performance Rudders - with Particular Reference to the Schilling Rudder", Marine Technology, Vol. 24, No. 4, 1987.
- [9] Okada, S., "單獨に置かれた舵の性能に関する實驗結果について - 舵の流體力學的研究 その 2 -", 日本造船協會論文集, 第103號, 1958.
- [10] 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號, 1960.
- [11] Kato, H., et al., "Flapつき舵の研究 - 第1報 : 單獨試驗の結果 -", 日本造船學會論文集, 第124號, 1968.
- [12] Kose, K., et al., "特殊舵の性能推定に関する研究", 日本西部造船會會報, 第84號, 1992.