

# 港灣內에서의 船舶 操縱運動 推定法에 관한 研究

박 충 환<sup>1)</sup>, 孫 景 浩<sup>2)</sup>

## A Study on the Prediction of Ship Maneuverability in Harbour Area

Choung-Hwan Park , Kyoung-Ho Sohn

### Abstract

Some practical methods have already been developed for predicting the characteristics of ship manoeuvring motions at relatively high advance speed. However, these methods can hardly be applied to motions of ships in starting, stopping, backing, slow steaming or tug operations, even though such extensive motions are of vital importance from a safety point of view particularly in harbour areas.

The method presented here aims at predicting the characteristics of ship manoeuvring at low advance speed, which covers starting, stoping, backing, slow steaming or tug operations. The mathematical models at large angles of incidence to the hull as well as in the wide range of propeller operations are formulated for hydrodynamic.

In order to verify the proposed method, basic maneuvering performance related with crash stopping, course changing, decelerating, and turning under tugboat assistance are checked by numerical simulations for three ships, i.e

1) 한국해양대학교 선박공학과 석사과정 선박유체 전공

2) 한국해양대학교 조선해양공학부 조선공학과 교수

one tanker(Esso Osaka) and one container(SR108) and one VLCC.

It is found that the proposed method may be useful for predicting the characteristics of ship manoeuvring motions at low advance speed, and for improving ship handling technique in harbour areas.

## 1. 서론

해상 수송에서의 경제적 효율을 높이기 위해 최근 건조되는 선박의 전용화, 대형화의 추세가 본격화된 1970년대부터 조종성과 관련된 문제점이 나타나기 시작하였으며, 조종성이 조선소, 선박 운항자 및 정부 관계자의 관심 기술분야로서 인식되었다. 그 결과 IMO(국제해사기구) 선박설계설비 소위원회에서는 조종성에 관한 본격적 검토가 시작되었으며, 1993년 11월 IMO총회에서 조종성 잠정 기준(Interim Standards for Ship Manoeuvrability) A.751을 채택하게 되었다.

특히 항행 안전성의 관점에서는 일반 조종 성능보다 오히려 항만내에서의 조종 문제가 더욱 중요한 의미를 갖는다. 실제로 선박 운항자측에서는, 이와같이 제한된 운항조건을 고려해야 하는 항만내에서의 조종 성능에 대한 정확한 정보를 절실히 요구하고 있다[1].

이러한 배경하에서 항만내에서의 조종성 문제에 있어 예선의 지원은 불가피하게 되었으며, 예선 사용시의 운동 특성을 사전에 알아 운항자에게 조종 성능의 유익한 자료를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 Fourier 급수 전개를 이용하여 선체에 작용하는 유체력을 모델화하였으며, 모델화 과정에서 Takashina의 구속모형 시험 결과를 이용하였으며, 프로펠러 회전에 의한  $Y_p$ ,  $N_p$  값을 계측하기 위해 회류수조에서 구속모형시험을 실시하였다.

그리고 본 연구에서 제안한 수학 모델을 이용하여 Esso Osaka(tanker선형) 및 SR108(container선형) 두 실선 선형에 대하여 변침, 피항, 예선에 의한 횡 이동 및 예선에 의한 선회 성능 등을 비교 검증 하였으며, VLCC을 이용하여 긴급 정지 성능을 시뮬레이션 계산하여, 계산결과를 실선 시험 결과[2]와 비교하였다.

## 제2장 선박 조종운동 수학모델

### 2.1 좌표계 및 조종운동 방정식

Fig. 2.1과 같이 선체중양(midship)에 좌표 원점을 둔 동좌표계를  $O-xyz$ 라 할 때, 평수중에서의 조종운동의 기본방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_{zz} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N \end{aligned} \tag{2.1}$$

식(2.1)의 유체력중 부가질량력을 좌변에 고려하고, 우변에는 부가질량력을 제외한 유체력으로서 MMG모델을 적용하면 조종운동 수학모델은 식(2.2)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr - (mx_G + m_y a)r^2 &= X_H + X_P + X_R + X_T \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur + (mx_G + m_y a)\dot{r} &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_T \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} + (mx_G + m_y a)v + mx_G ur &= N_H + N_P + N_R + N_T \end{aligned} \tag{2.2}$$

여기서 첨자  $H, P, R, T$ 는 각각 선체, 프로펠러, 타, 예선을 의미하며  $X_H, X_P, X_R, X_T$ 등은 이들 각각에 기인하는 유체력을 나타낸다.

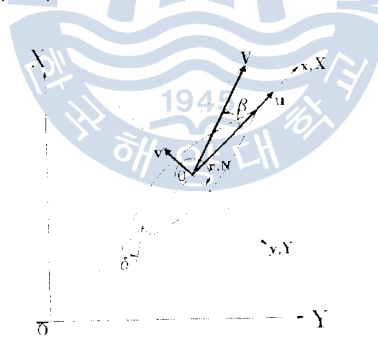


Fig. 2.1 Coordinate system

## 2.2 선체에 작용하는 유체력의 모델화

항만내에서의 선체에 작용하는 유체력  $X_H, Y_H, N_H$ 을 선속이 0이 아닌 경우 ( $V \neq 0$ )와 선속이 0인 경우( $V = 0$ )로 나누어 고려한다[3].

(1) 선속이 0이 아닌 경우( $V \neq 0$ )

횡류각(drift angle)  $\beta$ 를 다음과 같이 정의할 때

$$\beta = -\tan^{-1} v/u \tag{2.3}$$

선체에 작용하는 유체력은  $\beta$ 를 변수로 하여 다음과 같이 Fourier급수 전개식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
X_H' &= X'(u') + \sum_k (S_k^X \sin \beta k + C_k^X \cos \beta k) \\
Y_H' &= \sum_k (S_k^Y \sin \beta k + C_k^Y \cos \beta k) \\
N_H' &= \sum_k (S_k^N \sin \beta k + C_k^N \cos \beta k)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

여기서  $X'(u')$ 는 선체에 작용하는 저항계수,  $S_k^Y, C_k^Y$ 는 Fourier 계수를 나타낸다. 사항시험과 횡류각  $\beta$ 와 회두 각속도  $r$ 이 동시에 나타나는 yaw rotating test을 실시하여, 실험결과 유의(有義)한 의미를 갖는 Fourier 계수  $S_k^Y, C_k^Y$ 를 이용하면  $X_H, Y_H, N_H$ 는 다음과 같이 표시한다[3].

$$\begin{aligned}
X_H &= \frac{1}{2} \rho L d V^2 \{ X_{uu'} u' | u' | + X_{vr'} v' r' \} \\
Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d V^2 \{ Y_{v'} v' + Y_{ur'} u' r' + Y_{vv'} v' | v' | \\
&\quad + Y_{vr'} v' | r' | + Y_{urr'} u' r' | r' | \} \\
N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \{ N_{v'} v' + N_{uv'} u' v' + N_{r'} r' + N_{vv'} v'^2 r' \\
&\quad + N_{uvr'} u' v' r'^2 + N_{rr'} r' | r' | \}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

본 연구에서는 선체 주요목 자료만으로서 유체력 미계수의 개략적인 값을 구할 수 있는 Inoue 식을 이용하여 선형 유체력 미계수를 추정하였다.

(2) 선속이 0인 경우 ( $V = 0$ )

$$X_H = 0, \quad Y_H = 0, \quad N_H = \frac{1}{2} \rho L^4 d N_{rr'} r | r | \tag{2.6}$$

### 2.3 프로펠러 회전에 의한 유체력

프로펠러에 의한 유체력  $X_p$ 는 식(2.7), (2.8)과 같이 Fourier 급수 전개를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
X_p &= \frac{1}{2} \rho (1-t) C_T^* [u_p^2 + (0.7 \pi n D)^2] \frac{1}{4} \pi D^2 \\
&= \frac{1}{8} \rho \pi D^2 (1-t) C_T^* [u_p^2 + (0.7 \pi n D)^2]
\end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
C_T^* &= \sum_{k=0}^{20} [A(k) \cos \theta_p k + B(k) \sin \theta_p k] \\
&= A(0) + \sum_{k=1}^{20} [A(k) \cos \theta_p k + B(k) \sin \theta_p k]
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$A(k), B(k)$ 는 프로펠러 단독시험에 의한 실험정수이며, 본 연구에서는 van Lammeren의 실험자료를 이용한다.

그리고  $\theta_p$ 는 유체동역학적 피치각(hydrodynamic pitch angle)으로서 식(2.9)과

같이 정의된다.

$$\theta_p = \tan^{-1}\{u_p/0.7\pi nD\} \quad (2.9)$$

광범위한 프로펠러 하중도를 다루게 되므로, 본 연구에서는 가장 중요하게 높은 정도(精度)가 요구되는 제 1 상한( $u \geq 0, n \geq 0$ ) 영역에서의 추력 계산치의 정도가 떨어지는 경향이 있기 때문에 식(2.10)를 이용한다.

$$X_p = (1-l)K_T \rho n^2 D^4, \quad K_T = a_1 + a_2 J_p + a_3 J_p^2 \quad (2.10)$$

다음으로 프로펠러 회전에 의한 횡방향 유체력  $Y_p$ 와 회두 모멘트  $N_p$ 는 식(2.11)와 같이 표시한다.

$$Y_p = (\rho/2)Ld(nD)^2 Y_p', \quad N_p = (\rho/2)L^2 d(nD)^2 N_p' \quad (2.11)$$

#### 2.4 조타에 의한 유체력

일반적으로 조타에 기인하는 유체력은 식(2.12)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-l_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (2.12)$$

식(2.12)의 타직압력  $F_N$ 은 다음과 같이 나타낸다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 f_a \sin \alpha_R \quad (2.13)$$

$f_a$ 는 타직압력계수의 경사이다.  $f_a$ 에 관해서는 Fujii식을 이용한다.

#### 2.5 주기관의 회전수 및 조타기의 응답 모델

엔진 텔레그래프의 명령 회전수에 대해 주기관 회전수는 다음과 같이 응답하는 것으로 가정한다.

$$T_n \dot{n} + n = \begin{cases} n^*, & (n^* < 0, n_i < n^*) \\ n_i, & (0 \leq n^* \leq n_i) \end{cases} \quad (2.14)$$

단,  $n^*$  : 명령 회전수(engin telegraph)

$n_i$  : 유전(遊轉) 회전수,  $T_n$  : 시정수

한편, 조타기의 응답 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_E \dot{\delta} + \delta &= \delta^* & : (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \\
 \dot{\delta} &= \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| & : (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}|)
 \end{aligned}
 \quad (2.15)$$

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

### 제3장 실험

#### 3.1 모형선

프로펠러 회전에 의한  $Y_p$ ,  $N_p$  값을 계측하기 위해 본 연구에서 채택한 선형은 Esso Osaka(tanker선형) 및 SR108(container선형) 선형이다.

#### 3.2 프로펠러 역회전에 기인하는 유체력의 측정

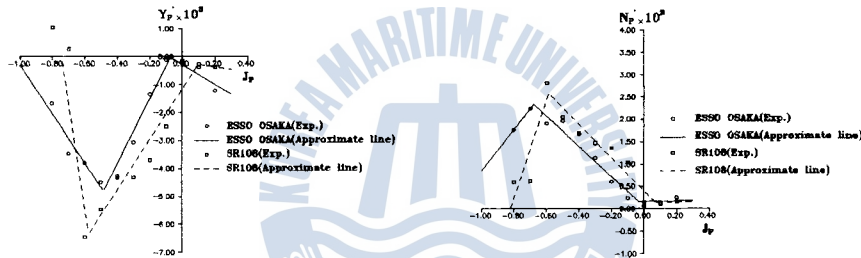


Fig. 3.1 Lateral forces and moments about C.G. due to propeller revolution of both Esso Osaka and SR108

한편, 회류수조에서 계측한 프로펠러 역회전에 의한 횡방향 유체력  $Y_p$ 와 회두 모멘트  $N_p$  값이 Kobayashi, Fujino, Hasegawa의 실험결과 보다 47% 정도 크게 측정되었는데, 이는 양 실험 결과의 차이가 척도효과에 기인하는 것으로 판단된다. 왜냐하면 소형 모형선의 경우에는 프로펠러 로드(propeller load)가 커지고, 흐름 자체가 달라지기 때문이다. 어쨌든 본 연구에서의 프로펠러 역회전에 의한 횡방향 유체력  $Y_p$ 와 회두 모멘트  $N_p$  값의 측정 결과가 정량적으로 곤란하다 할 수 있으나, 정성적으로는 같기 때문에, 별도의 수정없이 측정 결과를 그대로 항만내 조종 시뮬레이션 계산에 이용하기로 한다.

### 제4장 선박 조종성능의 검증

#### 4.1 실선의 주요목

긴급 정지 성능, 변침, 피항, 예선에 의한 횡 이동, 예선에 의한 선회 성능 등의 비교 검증에 이용된 실선 선형의 주요목을 Table 4.1에 나타내었다.

Table 4.1 Principal particulars of ships

Items		Esso Osaka	SR108	VLCC
<b>HULL</b>				
Length B.P.	L ( m )	325.0	175.0	318.0
Breadth(moulded)	B ( m )	53.0	25.40	56.0
Draft(moulded)	d ( m )	22.05	8.50	20.58
Block coefficient	C <sub>B</sub>	0.83	0.559	0.827
<b>RUDDER</b>				
Height	H ( m )	13.85	7.70	12.85
Area ratio	A <sub>R</sub> /L <sub>d</sub>	1/58.0	1/48.8	1/58.6
<b>PROPELLER</b>				
Diameter	D ( m )	9.1	6.50	8.0
Pitch ratio	P/D	0.715	1.055	0.71

#### 4.2 긴급 정지 성능

Fig. 4.1는 VLCC의 시뮬레이션 계산 및 실선 시험 결과이다. 초기 정상 직진 상태에서 16.5 knot에서의 프로펠러 회전수의 70%에 해당하는 역전 프로펠러 회전수를 명령한 이후의 선회 궤적의 변화를 나타내고 있다.

#### 4.3 변침 성능

초기 선속이 4.33 knot(Dead slow ahead)인 Esso Osaka(tanker)를 초기 타각( $\delta$ )을 30°로 명령한 후에 일정 시간후 -25° 명령하였고, 초기 선속이 4.433 knot(Dead slow ahead)인 SR108(container)은 초기 타각( $\delta$ )을 15° 명령한 후에, 일정 시간후 -10° 명령하여 우현 30°의 목표 침로 방향으로 변침을 실시하였다(Fig. 4.2).

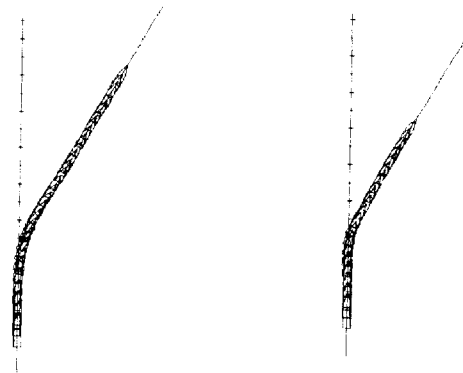
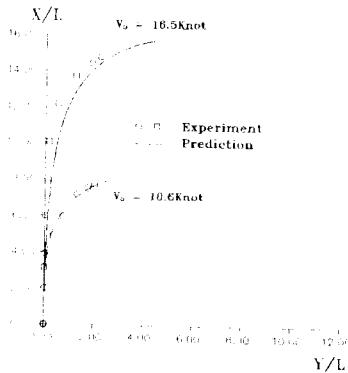


Fig. 4.1 Crash stopping distance of MCC Fig. 4.2 Simulation on course changing of both Esso Osaka and SR108

4.4 피항 성능

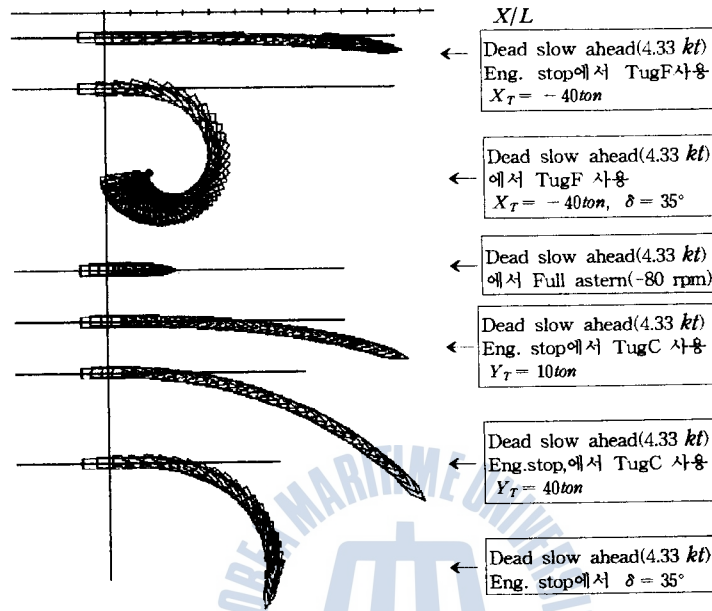


Fig. 4.3 Estimated abilities in collision-avoidance maneuvers of Esso Osaka

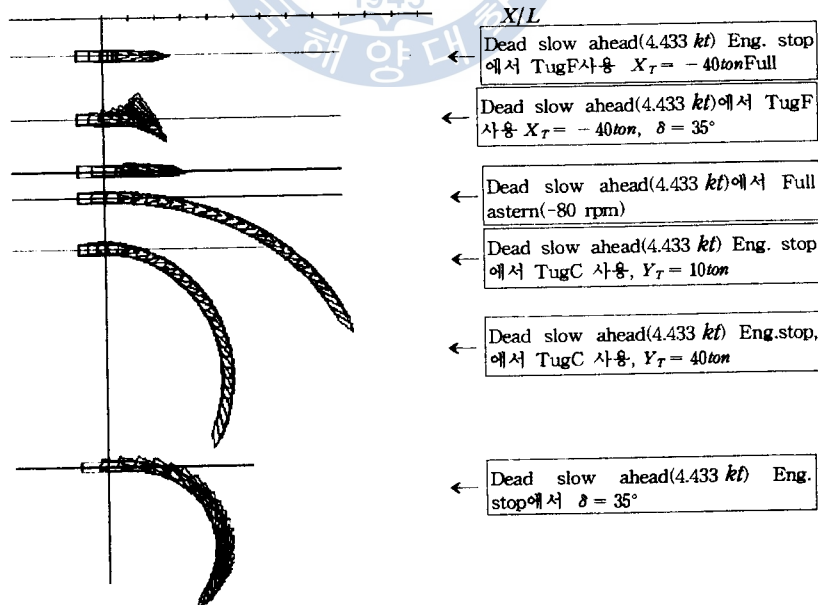


Fig. 4.4 Estimated abilities in collision-avoidance maneuvers of SR108



## 4.5 예선에 의한 횡이동 및 선회 성능

### 4.5.1 예선에 의한 횡이동 성능

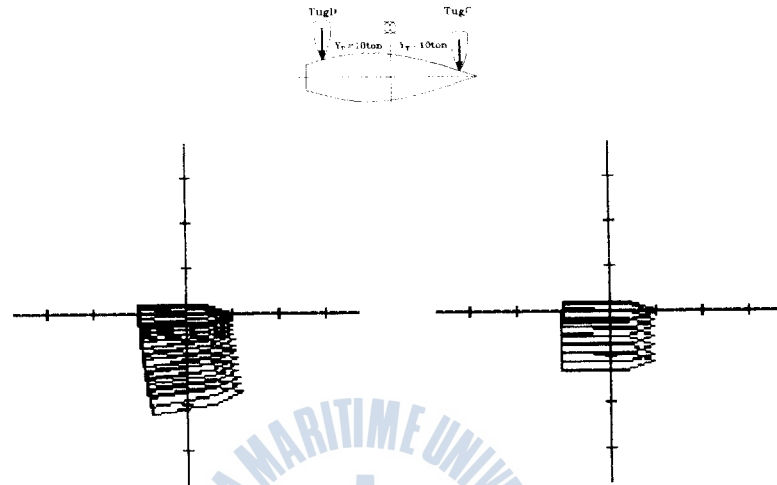


Fig. 4.5 Simulation on lateral shifting operation of both Esso Osaka and SR108 by both bow and stern tugs.

### 4.5.2 선수를 중심으로 한 선회 성능

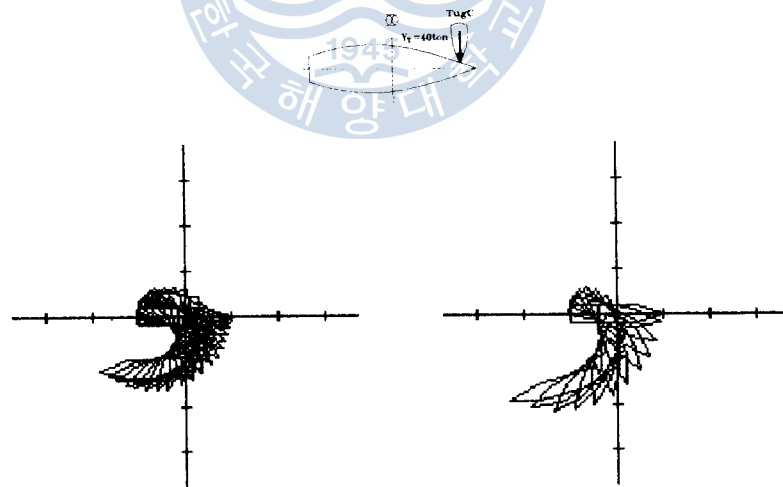


Fig. 4.6 Simulation on turning operation of both Esso Osaka and SR108 by bow tug.

### 4.5.3 선체중앙을 중심으로 한 선회 성능



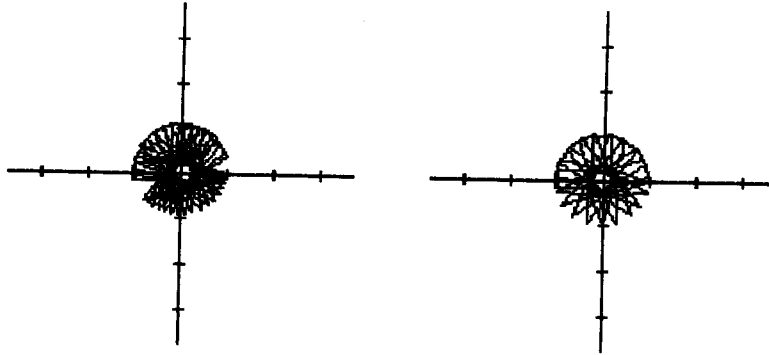


Fig. 4.7 Simulation on turning operation of both Esso Osaka and SR108 by both bow and stern tugs in midship.

## 제5장 결론

- (1) 저속시의 조종 성능 해석을 위해 조종 운동 수학 모델을 확립.
- (2) 프로펠러 역전시 발생하는 불평형 유체력은 전진율( $J_P$ )의 변수로 하여 표현 할 수 있으며, 선체 형상의 영향을 받는다. 특히 회류수조 실험 결과 소형 모형선인 경우에는 척도효과(scale effect)의 영향이 나타남을 확인.
- (3) 본 논문에서 제안한 수학 모델이 일반 조종 운동을 포함하여 저속시의 조종 성능 즉, 프로펠러, 타 및 예선을 병행한 긴급 정지, 변침, 피항, 예선에 의한 횡 이동 및 선회 성능 등을 묘사하는데 광범위하게 이용될 수 있음을 확인.
- (4) 제한된 운항 조건을 고려하고자 하는 선형 설계시에, 또 항만내에서의 선박 운항자의 접·이안 조종 훈련 및 교육, 출·입항 등 운항 자동화 시스템 개발에, 또는 입항 예정 선박의 조종 성능을 고려한 항만 시설 설계시에 활용.

## 참고문헌

- [1] Coates, G. A., "A Ship-handler's View", Proc. Intern. Conf. on Ship Maneuverability, Vol. 1, 1987.
- [2] Hirano, M. et al. "A Practical Prediction Method of Ship Maneuvering Motion and Its Application", Proc. Inter. Conf. on Ship Maneuverability, Vol. II, 1987.
- [3] 손 경호, "Hydrodynamic Force and Maneuvering Characteristics of Ship at Low Advance Speed", 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, 1992.