

비대선형의 조종 유체력 미계수 및 간섭 계수에 관한 실험적 연구

최 명 식* · 윤 점 동** · 이 경 우***

Experimental Study on Manoeuvring Hydrodynamic Derivatives and Interaction Coefficients of Full Form Ship

Myong-Sik Choi · Jeom-Dong Yoon** · Gyoung-Woo Lee****

〈 목 차 〉

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. 서론 | 3.4 프로펠러 증속율 |
| 2. 조종성 수학모델 | 3.5 타와 선체의 상호 간섭영향 |
| 3. 구속모형시험 | 3.6 정류계수 |
| 3.1 회류수조 및 공시선형 | 4. 결 론 |
| 3.2 선체에 작용하는 동유체력 | 참고문헌 |
| 3.3 타 위치에서의 유효 반류계수 | |

Abstract

In marine transportation of bulk cargoes such as crude oil, ore, coal etc., a lot of full form ship which have poor manoeuvrability were presented in many countries. Since ship manoeuvrability depends upon many parameters namely hydrodynamic derivatives, interference factors etc., as external forces, it is of great importance that we investigate these values of parameters on analysis of manoeuvrability.

In this paper, we investigated and analyzed interaction coefficients among hull-propeller-rudder for a full form ship by captive model test in circulating water channel, and then compared with experimental results by PMM test.

A tanker model ship which has 0.83 as block coefficient and MMG mathematical models were used in this experiment. Almost same tendencies were found in qualitative analysis, even though more serial experiments were demanded in quantitative analysis.

* 정희원, 목포해양대학교 항해학과

** 정희원, 한국해양대학교 선박운항학과

*** 정희원, 한국해양대학교 조선공학과

1. 서 론

최근 해상 수송에서의 효율적인 물류 관리라는 측면에서 선박은 전용선화, 대형화 되는 추세에 있다. 이러한 선박의 대형화는 조종성능의 불량을 가져오게 하고 선박의 해난사고로 인하여 막대한 환경 문제와 인적, 경제적 손실을 초래하였다. 이와 관련하여 국제해사기구(International Maritime Organization, 영문약칭 IMO)에서는 선박의 안전 운항에 필요한 최소한의 성능 확보를 위해서 조종성기준(manoeuvring standards)을 의결하였고, 이 기준은 이미 1994년 7월 1일부터 적용되었다[1]. 뿐만 아니라 국제해사기구에서는 조선소로 하여금 신조선의 조종성능에 관한 상세한 정보를 기재한 조종성 지침 소책자(manoeuvring book-lets)의 작성을 권고하고 있다[2]. 따라서 이러한 국제적 추세를 감안한다면, 초기 설계 단계에서부터 조종성능을 충분히 고려한 선형 설계가 필수적이며, 조종성능 추정법의 확립 또한 시급한 과제라 아니할 수 없다.

선박의 조종성능은 많은 파라메타에 의존하며 외력항을 구성하는 동유체력 미계수 및 간섭계수를 결정하는 것은 선박의 조종성능을 평가하는 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 선박의 조종성능 추정 및 향상 기법 개발의 일환으로 주선체, 타, 프로펠러에 의한 간섭 영향 계수를 회류수조에서 구속모형시험을 실시하여 조사, 분석하고, 이들 실험 자료와 예인수조에서의 결과와 비교 하였다. 시험에 사용했던 선박은 대표적인 비대선형으로서 실선실험 자료[3] 뿐만 아니라 모형시험 자료[4]가 널리 공표되어 있는 Esso Osaka호(실선의 수선간장 325 m, 278,000 DWT) 선형의 2 m 모형선이었다. 한편, 구속 모형시험의 해석을 위한 조종성 수학모델로는 최근 전세계적으로 호평을 받고 있는 모듈형 수학모델 즉, MMG 수학모델을 이용하였다[5].

2. 조종성 수학모델

Fig. 1과 같이 선체에 고정된 동좌표계를

$G-xyz$, 수면에 고정된 공간좌표계를 $\bar{O}-XYZ$ 라 할 때, 동좌표계의 각 축을 관성주축이라 가정하면 부가 질량력을 고려한 조종운동의 기본식은 다음과 같이 정식화 된다.

$$\begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr &= X \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur &= Y \\ (I_z + J_z)\dot{r} &= N - x_G Y \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 m, m_x, m_y 는 각각 선체의 질량, x 축 방향 부가질량, y 축 방향 부가 질량이다. I_z, J_z 는 각각 z 축 주위의 질량 관성모멘트, z 축 주위의 부가 관성모멘트이다. u, v, r 은 각각 무게중심 G 에서의 x 축 방향의 속도 성분, y 축 방향의 속도 성분, z 축 주위의 각속도 성분이다.

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 는 각각 u, v, r 의 1차도함수이다. X, Y, N 은 각각 무게중심 G 가 아닌, 선체중양(midship)에서의 x 축 방향 동유체력, y 축 방향 동유체력, 선체중양을 지나고 z 축에 평행한 축에 관한 동유체력 모멘트이다. x_G 는 선체중양을 좌표원점으로 취했을 때 무게중심 G 의 x 좌표이다. 한편 동유체력 X, Y, N 을 무게중심 G 가 아닌, 선체중양에 관해서 정의한 이유는 동유체력의 이론 계산과의 비교 또는 구속 모형시험상의 편의를 도모하기 위한 것이다.

선체중양에서의 동유체력 X, Y, N 은 MMG 수학모델[5]에서 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} X &= X(u) + (1-t)T + 0.5 \rho L d V^2 \{ X'_{vv} v'^2 \\ &\quad + X'_{vr} v' r' + X'_{rr} r'^2 \} - c_{RX} F_N \sin \delta \\ Y &= 0.5 \rho L d V^2 \{ Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv} v'^3 \\ &\quad + Y'_{vr} v'^2 r' + Y'_{vr} v' r'^2 + Y'_{rr} r'^3 \} \\ &\quad - (1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N &= 0.5 \rho L^2 d V^2 \{ N'_v v' + N'_r r' + N'_{vv} v'^3 \\ &\quad + N'_{vr} v'^2 r' + N'_{vr} v' r'^2 + N'_{rr} r'^3 \} \\ &\quad - (x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 c_{RX}, a_H, x_H 는 선체와 타의 상호간섭 영향을 나타내는 실험정수이다. 그리고 선체운동 변수 u, v, r 과 동유체력 X, Y, N 은 다음과 같이 무차원화 하였다.

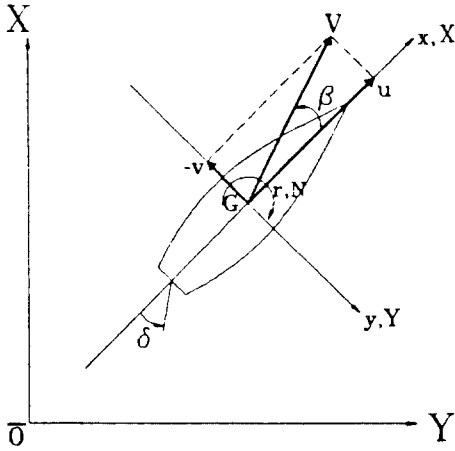


Fig. 1 Coordinate system

$$\begin{aligned} u', v' &= u, v / V \\ r' &= r(L / V) \\ X', Y' &= X, Y / 0.5 \rho L d V^2 \\ N &= N / 0.5 \rho L^2 d V^2 \end{aligned} \quad (3)$$

단, L : 선체 길이(수선간장), d : 평균 홀수,
 V : 합속도, ρ : 유체의 밀도

그리고 타 직압력 F_N 은 다음과 같이 표시된다.

$$F_N = 0.5 \rho A_R f_a V_R^2 \sin \alpha_R \quad (4)$$

여기서

$$f_a = 6.13 \Lambda / (2.25 + \Lambda)$$

단, Λ : 타의 종횡비

그리고 타에의 유효 유입속도 V_R 은

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad (5)$$

$$u_R = \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta k) s + \{1 - \eta k(2 - k)\} s^2} \quad (6)$$

$$v_R = \gamma u_R (\beta - l' r') \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (1 - w_R) / (1 - w_P) \\ w_P &= w_{PO} \exp \{-4.0(\beta - x'_P r')^2\} \\ w_R &= w_P w_{RO} / w_{PO} \\ k &= k_x / \varepsilon \\ \eta &= D / H \\ s &= 1 - u_P / (nP) \\ u_p &= u(1 - w_P) \end{aligned}$$

단, w_{PO} , w_{RO} : 직진시 프로펠러 및 타
 위치에서의 유효 반류계수

k_x : 프로펠러에 의한 유체흐름의 증속율

D : 프로펠러 직경, H : 타의 높이

P : 프로펠러 팻치, γ : 정류계수

그리고, 타에의 유효유입각 α_R 은

$$\begin{aligned} \alpha_R &= \delta - \tan^{-1}(v_R / u_R) \approx \delta - v_R / u_R \\ &= \delta - \gamma(\beta - l' r') \end{aligned} \quad (8)$$

으로 표시된다.

3. 구속 모형시험

3.1 회류수조 및 공시선형

(1) 회류수조

본 연구에서 구속 모형시험에 이용한 회류수조는 길이 12.5 m, 폭 2.2 m, 최대 높이 5.2 m인 2 입펠러 방식의 수직 순환형으로서, 관측부인 개구부는 길이 5 m, 폭 1.8 m, 수심 0.9 m이다. 본 회류수조의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 구속 모형시험을 실시하기 직전의 관측부에서의 유속분포를 Fig. 3, Fig. 4에 나타낸다. 유속 측정에는 프로펠러식 유속계를 이용하였으며, 제파판(wave suppressing plate)으로부터 1.0 m 후방위치(2 m 모형선을 설치하였을 때 모형선의 F.P.위치)의 횡단면에서 수직 방향과 수평 방향으로 유속을 측정하였다. 전체적인 유속의 균일도는 양호한 편이었다는 볼 수 없지만 모형선 부근에서 유속의 편차는 대략 3%미만이였다.

한편, 실선의 경우에는 타에 슈피스(shoe piece)가 설치되어 있으나 본 모형선의 경우에는 행킹타(hanging rudder)의 형태를 취하고 있다. 그리고 모형 프로펠러와 모형타는 Table 1에 나타나 있다.

3.2 선체에 작용하는 동유체력

조종운동시 즉, v 에 기인하는 선체에 작용하는 동유체력을 측정하기 위해서는 사항시험(oblique tow test)과 구속 선회시험(circular motion test) 또는 강제동요시험(planar motion mechanism test) 등을 실시하여야 한다. 이 중에서 소형 회류수조에서 실제 가능한 구속 모형시험은 사항시험 뿐이다. 구속모형시험시 모형선에는 타를 설치하지 않았으며, 프로펠러 회전수는 실선의 자항점(ship self propulsion point)에 맞추었다. 한편, 본 연구에서는 회두 각속도 γ 을 변수로 하는, 또는 회두 각속도 γ 과 횡방향 이동속도 v 를 동시에 변수로 하는 선체 동유체력의 측정이 불가능하였으므로 v 에 기인하는 동유체력만을 측정하고, 무차원화 하여 Fig. 6, Fig. 7에 나타내고 있다.

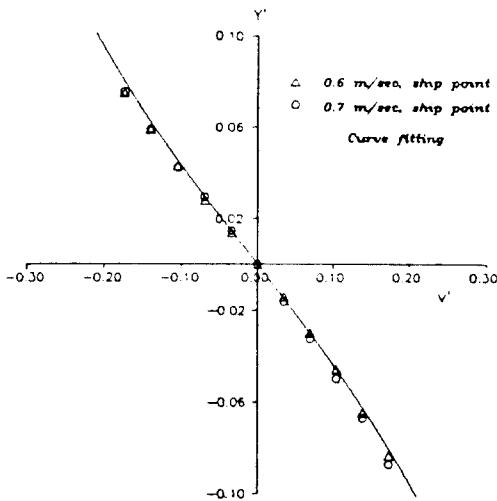


Fig. 6 Nondimensional lateral force on hull

측정 결과, Y'_v , N'_v 는 각각 -0.419 , -0.161 로서 문헌(4)의 $2.5 m$ 예인수조 결과인 -0.384 , -0.146 과 비교하여 Y'_v 는 절대치가 0.03 정도 높게 평가 되었고, N'_v 는 절대치가 0.01 정도 낮게 평가 되었다.

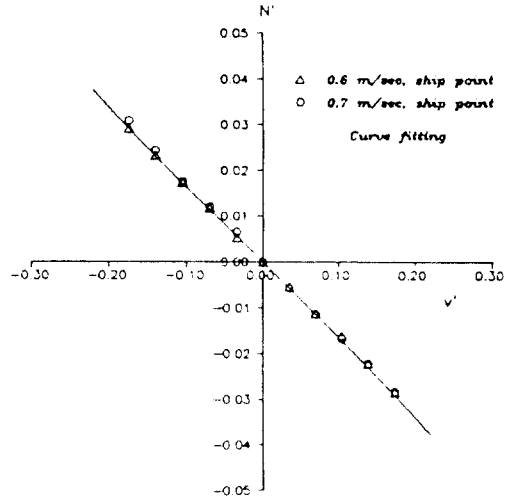


Fig. 7 Nondimensional yaw moment on hull

3.3 타 위치에서의 유효 반류계수

조종성 수학모델의 식(6)으로 표시되는, 타에의 유효 유입속도 u_R 의 계산을 위해서는 직진시의 유효 반류계수 w_{PO} 와 w_{RO} 의 값을 결정하여야 한다. w_{PO} 는 프로펠러 위치에서의 유효 반류계수, w_{RO} 는 타 위치에서의 유효 반류계수이다. 한편, Fig. 8과 같이 프로펠러에 의해 가속되지 아니한 유속 즉, 프로펠러 슬립비(s)가 0 일 때 타 위치에서의 유속을 u_{RO} 라 하면 u_{RO} 는 다음과 같이 정의된다.

$$u_{RO} = V(1 - w_{RO}) \quad (9)$$

따라서, 프로펠러를 설치하지 아니한 상태에서 일정 타각을 주었을 때의 타 직압력 F_N 을 측정하여, 타 직압력 일치법에 의해 식(9)의 u_{RO} 를

결정해 줌으로써 $(1 - w_{RO})$ 를 구할 수 있다. 본 연구에서 채택한 선형에 대해서 $(1 - w_{RO})$ 의 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 측정 결과에 의하면 $w_{RO} = 0.54$ 로서, 예인수조에서의 결과(3) 0.55와 거의 일치한다.

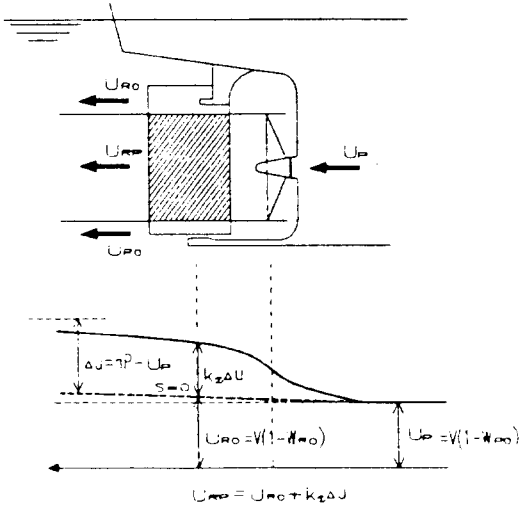


Fig. 8 Schematic diagram to explain effective rudder in-flow velocity

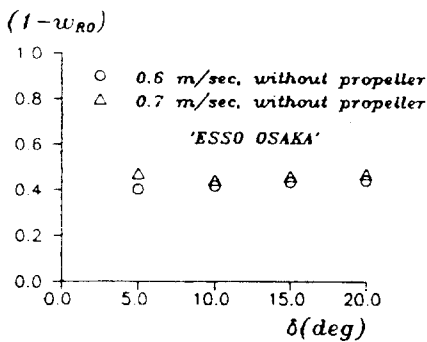


Fig. 9 Effective rudder wake fraction in steady straight motion

3.4 프로펠러 증속율

다음으로 타에 유입하는 유체 흐름의 프로펠러

에 의한 증속율 k_x (Fig. 8 참조)에 대해서 고찰해 본다. 프로펠러 증속율 k_x 를 고려한 유속 즉, 프로펠러에 의해서 가속된 유속을 u_{RP} 라 하면 u_{RP} 는 다음과 같다.

$$u_{RP} = u_{RO} + k_x \Delta u \quad (10)$$

여기서 Δu 는 무한원방에서 증가된 유속으로서, $\Delta u = nP - u_p$ 이다. 식(9), (10)로 표기되는 두 종류 유속의, 유입 면적을 고려한 단순 가중 평균치가 식(6)의 u_R 이다. k_x 를 구하는 실험은 다음과 같다. 식(6)에서 프로펠러 슬립비 $s = 1$ 일 때 즉, $u_p = 0$ 일 때를 생각하면

$$[u_R / (nP)]_{s=1} = k_x \sqrt{\eta} \quad (11)$$

따라서, 모형선을 정지 상태에서 프로펠러만 작동시키고 일정 타각을 주었을 때의 타 직압력 F_N 을 측정하여, 타 직압력 일치법에 의해 u_R 를 결정해 주면 식(11)로부터 k_x 를 구할 수 있다. 본 연구에서 채택한 선형에 대해서 k_x 의 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 측정 결과에 의하면 $k_x = 0.50$ 정도의 값으로 예인수조에서의 시험 결과(3)인 0.54와 비교하여 좋은 결과라고 생각된다.

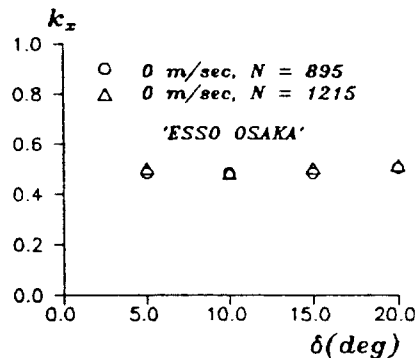


Fig. 10 Propeller race amplification factor

3.5 타와 선체의 상호 간섭 계수

직진시 일정한 타각을 주었을 때의 타 직압력

F_N 과, 동시에 선체에 작용하는 동유체력(횡방향 힘 및 회두 모멘트)의 측정 결과에 대해서 고찰한다. 타에 의해서 선체에 유기되는 동유체력 즉, 타와 선체의 상호 간섭유체력에 관한 실험정수

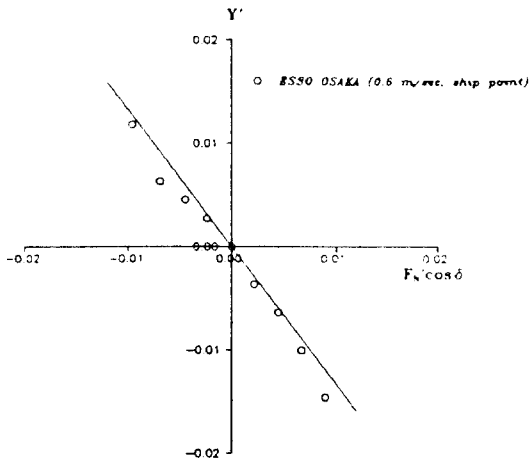


Fig. 11 Lateral force induced by rudder deflection

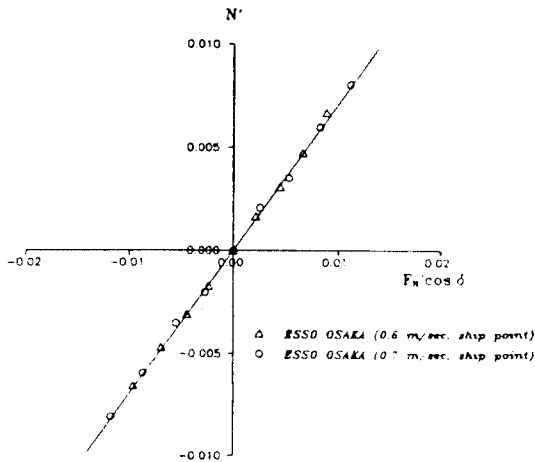


Fig. 12 Yaw moment induced by rudder deflection

a_H, x_H 를 구하기 위해서 측정된 타 직압력 F_N 과 선체 동유체력을 Fig. 11, Fig. 12와 같이 정리하여 a_H, x_H 를 구한 결과, $a_H = 0.327, x_H' = -0.61$ (단, $x_H' = x_H/L$)으로 측정되었다. 한편, Esso Osaka 6 m 모형선에 대한 예인수조에서의 동일한 실험 결과(6)에 의하면 $a_H = 0.398, x_H' = -0.442$ 로서, 본 연구에서의 측정 결과보다 x_H' 의 값이 상당히 작다. 이러한 원인이 척도 효과에 기인하는지, 또는 회류수조에서의 검력 시스템의 정도(精度) 즉, 타 직압력의 측정 정도(精度)에 비해 선체 동유체력의 측정 정도(精度)가 떨어지기 때문인지는 알 수 없다. 어쨌든 본 연구에서의 측정 결과가 약간 비합리적인 것으로 판단된다.

3.6 정류계수 측정 실험

조종성 수학모델의 식(7), (8)에서 필요한 정류계수(straightening coefficient) γ 에 대해서 고찰해 본다. 식(8)로부터 조종운동중 타 직압력이 0이 되는 타각을 δ_R 이라 하면 δ_R 은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\delta_R = \gamma(\beta - l_R' r) \quad (12)$$

여기서 β 는 사향각(drift angle), l_R' 는 실험정수로서 보통 $l_R' \approx 2x_R'$ 의 값을 취한다. 타각 δ 를 파라미터로 한 사향시험을 실시하여, 이 때의 타 직압력 F_N 을 측정함으로써 사향상태에서 타 직압력이 0이 되는 타각 δ_R 을 구할 수 있다. 사향각 β 에 따른 δ_R 을 측정된 결과를 Fig. 13에 나타낸다. Fig. 13에 의하면 $\beta < 0$ 영역에서 예인수조에서의 비대선형의 결과와 동일한 비선형 특성 영역이 존재한다.

정류계수에 관한 실험은 보다 광범위한 β 영역과 선회운동시의 특성을 면밀히 고찰해 볼 필요가 있으나 본 연구에서는 실험시설의 제약 때문에 더 이상의 고찰은 불가능하였다.

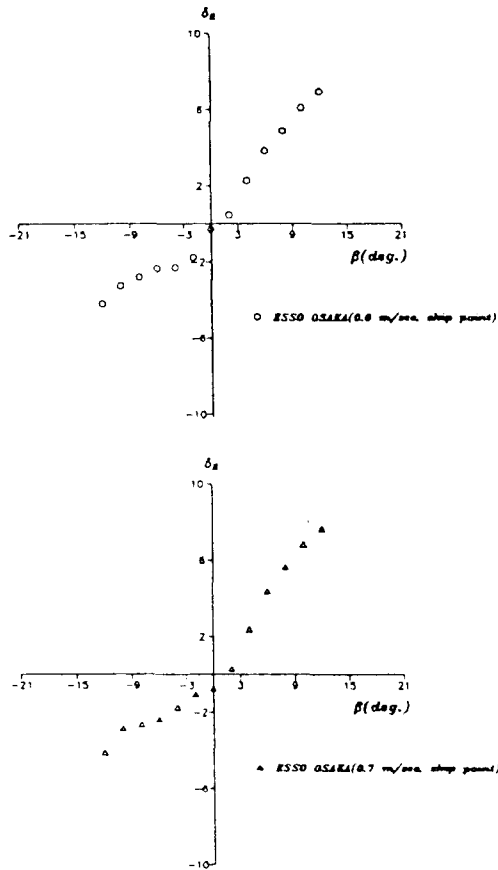


Fig. 13 Rudder angle of vanishing rudder normal force in manoeuvring motion

4. 결 론

278,000 DWT 탱커 Esso Osaka의 2m 모형선으로, 회류수조에서 구속 모형시험을 실시하고 이들 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 횡이동 속도 v 에 기인하는 선형 동유체력

미계수 Y'_v 와 N'_v , 타 위치에서의 유효 반류계수 w_{RO} , 프로펠러 증속율 k_x 는 예인수조에서의 구속 모형결과와 비교하여 유의해야 할 정도의 차이가 없었으므로 선박의 조종성능 평가를 위한 조종성 미계수로 직접 사용하여도 무방하다고 생각된다.

- (2) 선미부의 측면형상(profile) 및 선체와 프로펠러 사이의 간격과 관련이 있는 정류계수(straightening coefficient)를 구한 결과 비대선형이 가지는 비선형 특성을 확인할 수 있었으나, 회류수조 폭의 제한때문에 넓은 범위의 횡류각 β 에 대한 값을 측정하지 못하였으므로 예인수조에서의 계측결과와 비교하기는 어려울 것으로 생각된다.
- (3) 선체와 타의 상호 간섭 효과를 나타내는 실험정수 a_H, x_H 를 측정된 결과, x_H 는 예인수조의 결과와 비교하여 많은 차이를 보였고, 그 원인을 규명하기는 어려웠다.

이상으로 회류수조에서 조종성 관련 구속 모형 시험을 실시하여 비대선형의 조종성능을 지배하는 파라메타 중에서 횡이동 속도에 기인 하는 유체력 미계수, 타위치에서의 유효반류계수, 프로펠러 증속율, 선체와 타의 상호 간섭효과를 나타내는 실험정수, 정류계수를 구하고, 시험결과의 타당성을 알아 보기 위하여 예인수조에서의 실험 결과와 비교, 검토하였다. 이러한 회류수조의 결과를 직접 선박의 조종성능 평가에 적용하기 위하여 본 연구에서 얻은 결론을 토대로 광범위한 계열 시험을 통한 확인, 예인수조에서의 실험 결과와의 비교, 간섭계수의 정확한 추정 등이 앞으로의 과제라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) IMO, "Interim Standards for Ship Manoeuvrability", Resolution A.751(18), adopted on 4 November 1993.

- [2] IMO, "Provision and Display of Manoeuvring Information on Board Ships", Resolution A.601(15), adopted on 19 November 1987, 1988.
- [3] Crane, C. L., "Manoeuvring Trials of 278,000 DWT Tanker in Shallow and Deep Waters", Transactions SNAME, USA, Vol. 87, PP.251-283, 1979.
- [4] Kijima, K., et al., "深水域における操縦性能の推定", 日本造船學會誌 第668號 (船の操縦性能の推定特集號), PP.27-45, 1985.
- [5] Ogawa, A., et al., "MMG報告 V, 操縦運動數學Modelの實驗的檢證と改良", 日本造船學會誌 第616號, PP. 27 ~ 38, 1980.
- [6] Matsumoto, N., "操縦流體力の數學 Model と操縦性能の推定", 大阪大學 博士學位論文, PP.87, 1983.