

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第34卷第2號 1997年5月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 34, No. 2, May 1997

## PMM 모형시험에 의한 조종성능 추정 -수학모델에 따른 비교 연구-

이호영\*, 염덕준\*, 신상성\*, 이태일\*

## Prediction of Manoeuvrability using PMM Model Tests -Comparative Study of Mathematical Models-

by

H.Y. Lee\*, D.J. Yum\*, S.S. Shin\* and T.I. Lee\*

### 요 약

본 논문은 초기설계 단계에서 HPMM시험을 이용하여 조종성능을 추정하기 위해서 Abkowitz와 MMG 수학모델을 비교하였다. 본 논문에서 MMG 해석에 의한 알고리즘은 일본의 MMG 그룹의 해석 방법을 적용하여 연구되었다. 해석 결과는 정유운반선을 대상선박으로 선정하여 Abkowitz 수학모형 및 실선 시운전 결과와 비교 되었다.

### Abstract

This paper is characterized as comparison with Abkowitz and MMG mathematical model for the manoeuvring prediction using the Horizontal Planar Motion Mechanism tests at the initial design stage. The MMG analysis algorithm of this paper was studied according to the developed method by the MMG(Mathematical Modelling Group) organized in Japan. The simulation results were compared with those of Abkowitz mathematical model and sea trial, taking a product carrier as an example vessel.

### 1. 서 론

선박의 조종성능을 평가하고 기술하기 위해 몇

몇 종류의 수학모델이 PMM시험의 해석에 이용되었다. Abkowitz수학모델[1]은 특정한 조건에서 선박의 조종성능을 추정하는데는 유리하지만

---

발 표 : 1996년도 대한조선학회 추계연구발표회('96.11. 8)  
 접수일자 : 1996년 12월 9일, 재접수일자 : 1997년 2월 28일  
 \* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

최적의 타 면적을 선택하기 위해서는 각각의 타에 대해 PMM시험을 수행하여야 한다. 이러한 단점을 해결하기 위해 MMG수학모델[2]이 적용되어야 한다.

MMG수학모델의 장점은 선체-프로펠러-타를 각각 취급함으로써 타의 설계에 유리할 뿐 아니라, 초기설계단계에서 조종성능을 추정하는 모델로 사용될 수 있다. 본 논문에서는 PMM시험에 의한 유체력 계수 및 타 직압력과 선체와 관련된 실험 정수를 데이터베이스화하여 초기설계 단계에서 사용될 수 있는 조종성능 추정 프로그램을 개발하기 위하여 MMG 수학모델링에 의한 조종성능 해석기법이 적용되었다[3]. PMM시험으로부터 MMG 수학모형에 의한 방법과 Abkowitz 수학모형에 의한 방법을 사용하여 유체력 및 조종운동 계산 결과를 비교하고, 유효성의 검토를 위하여 이들과 실선 시운전 결과를 비교하였다.

## 2. 수학모형

3자유도 운동방정식은 원점이 선박의 중앙에 있고, 모형선과 같이 움직이는 우수좌표계를 사용하여 표시된다. 프로펠러의 추력과 저항을 제외하고 모든 계수들이 PMM시험으로부터 얻어진다. 프로펠러의 추력은 프로펠러 단독시험으로부터 얻어지며 저항은 저항시험의 결과로 얻어진다. 3자유도 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m'(\dot{u}' - v'r' - x_G r'^2) &= X'_G = X'_H + X'_P + X'_R \\
 m'(\dot{v}' + u'r' + x_G \dot{r}') &= Y'_G = Y'_H + Y'_P + Y'_R \\
 (I'_{zz} + m'x'_G) \dot{r}' + m'x'_G(\dot{v}' + u'r') &= N'_G \\
 &= N'_H + N'_P + N'_R + Y'_G x'_G
 \end{aligned} \tag{1}$$

(1)에서 아래 첨자 H, P 및 R은 선체, 프로펠러 및 타에 대한 힘과 모멘트를 나타낸다. 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 (2)식과 같다.

$$\begin{aligned}
 X'_H &= \frac{X_H}{1/2\rho L^2 U^2} = X'_{u'} \cdot \dot{u}' \\
 &\quad + X'_{vv'} \cdot v'^2 + (X'_{vr} - Y'_{v'}) \\
 &\quad \cdot v'r' + X'_{rr'} \cdot r'^2 + X'(u) \\
 Y'_H &= \frac{Y_H}{1/2\rho L^2 U^2} = Y'_{v'} \cdot \dot{v}' + Y'_{r'} \cdot \dot{r}' \\
 &\quad + Y'_{vv'} \cdot v'^3 + (Y'_{vr} + X'_{u'}) \\
 &\quad \cdot r' + Y'_{rr'} \cdot r'^3 + Y'_{vr'} \cdot v'r'^2 \\
 &\quad + Y'_{vr'} \cdot v'^2 r' \\
 N'_H &= \frac{N_H}{1/2\rho L^3 U^2} = N'_{v'} \cdot \dot{v}' \\
 &\quad + N'_{r'} \cdot \dot{r}' + N'_{vv'} \cdot v'^3 + N'_{rr'} \cdot r'^3 \\
 &\quad + N'_{vr'} \cdot v'r'^2 + N'_{vr'} \cdot v'^2 r'
 \end{aligned} \tag{2}$$

$X'(u)$ 는 저항시험으로부터 얻어진 선박의 저항을 나타내고 저항과 추력과의 관계식은 (3)과 같다.

$$X'(u) - X'_P = \frac{R - (1-t)\rho n^2 D_P^4 K_T (J_P)}{\frac{1}{2}\rho L^2 U^2} \tag{3}$$

조종운동중의  $w_p$ 는 선박의 편류각과 회두운동의 함수로서 식(4)과 같이 표현되며, 타에 기인한 유체동역학적 힘과 모멘트는 식(5)과 같다.

$$w_p = w_{p0} \exp(-C_p v_p'), \quad v_p' = v' + x_p r' \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 X'_R &= -(1-tr)F_N \sin \delta \\
 Y'_R &= (1 + a_H) F_N \cos \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_R' &= (x_R' + a_{HXH}') F_N' \cos \delta \\ F_N' &= (U_R/U)^2 (A_R/L^2) f_a \sin \alpha_R \\ U_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha_R = \delta - \delta_R = \delta - \delta_0 - \gamma_R (v' + l_R r')(U/U_R)$$

$$u_R = \epsilon u_p$$

$$\sqrt{\eta_H \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_P^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta_H)}$$

$$\left( \eta_H = \frac{D_P}{\text{Rudder Height}} \right)$$

$$\kappa = \frac{0.6}{\epsilon}, \quad v_R = -u_R \tan \delta_R$$

당 연구소에서 사용하고 있는 Abkowitz 수학적 모형은 선체력에 대해 3차 다항식모형을 사용하고 있으며, (6)식과 같다.

$$\begin{aligned} X_H' &= X_{\dot{u}}' \cdot \dot{u} + X_{v'}' \cdot v'^2 + X_{r'}' \cdot r'^2 + \\ &\quad (X_{v'r'}' - Y_{v'}') \cdot v'r' + X'(u) \quad (6) \\ Y_H' &= Y_0' + Y_v' \cdot v' + Y_{vv'}' \cdot v'^3 + (Y_r' + X_{\dot{u}}') \cdot r' \\ &\quad + Y_{r'}' \cdot r'^3 + Y_{rv'}' \cdot r'v'^2 + Y_{\eta'}'(1-\eta) \\ &\quad + Y_{\eta\eta'}'(1-\eta)^2 \\ N_H' &= N_0' + N_v' \cdot v' + N_{vv'}' \cdot v'^3 + N_r' \cdot r' + N_{r'}' \cdot r'^3 \\ &\quad + N_{rv'}' \cdot r'v'^2 + N_{\eta'}'(1-\eta) + N_{\eta\eta'}' \cdot (1-\eta)^2 \end{aligned}$$

식(6)에서  $\eta$ 은 초기속도와 조종운동 중의 x방향의 속도와의 비이며, 타력과 타 모멘트와 관련된 항은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_R' &= X'_{\delta\delta} \cdot \delta^2 \quad (7) \\ Y_R' &= Y'_{\delta} \cdot \delta + Y'_{\delta\delta\delta} \cdot \delta^3 + Y'_{\delta\eta} \cdot \delta(1-\eta) \\ &\quad + Y'_{\delta\eta\eta} \cdot \delta(1-\eta)^2 \\ N_R' &= N'_{\delta} \cdot \delta + N'_{\delta\delta\delta} \cdot \delta^3 + N'_{\delta\eta} \cdot \delta(1-\eta) \\ &\quad + N'_{\delta\eta\eta} \cdot \delta(1-\eta)^2 \end{aligned}$$

모델에 대한 데이터로부터 실선에 대한 조종성 해석의 정도를 높이기 위하여, 모형선-실선에 대한 척도 효과를 고려해야 한다. 척도효과에 대한

수정은 타에 유입되는 속도에 대한 수정으로 프로펠러 슬립비와 반류에 대한 수정을 고려하고 나머지 선체에 관련된 항은 무시하였다[3]. 수정인자( $F_1$ )는 식(8)과 같이 정의되고, 타각 및 타각-속도시험에서의 힘과 모멘트를 수정하는데 사용된다.

$$\begin{aligned} F_1 &= \left[ \frac{(U_R/U)_s}{(U_R/U)_m} \right]^2 = \left( \frac{1 - \omega_s}{1 - \omega_m} \right)^2 \quad (8) \\ &\quad \left\{ \frac{1 + \kappa \frac{8}{\pi} (k_T/J^2)_m \left( \frac{1 - \omega_m}{1 - \omega_s} \right)^2}{1 + \kappa \frac{8}{\pi} (k_T/J^2)_m} \right\} \end{aligned}$$

### 3. 조종성 모형시험

#### 3.1 PMM 시험

모형시험은 당 연구소가 보유하고 있는 심수용 예인수조(210m×14m×6m)에서 수행되었으며, 선체, 타 및 프로펠러가 장착된 모형선을 이용하여 시행되었다. 10개의 채널을 통하여 선체력, 타력, 추력 및 변위 등이 계측되었다. 모형선, 모형프로펠러 및 타는  $\lambda=1/32.759$ 로 제작되었으며, 기하학적 특성은 Table 1과 같다. 정적시험은 모든 방향을 불구속하였고, 동적 시험은 횡동요를 구속시킨 상태로 시험이 수행되었다. 전진속도는 Froude의 상사법칙을 이용하였고, 모형프로펠러의 회전수는 저항추진시험으로부터 산정된 실선 자항점에서의 프로펠러 회전수와 일치시켰다. 시험홀수는 Scantling draft condition 상태에서 수행하였으며, 시험조건은 Table 2와 3에 상세히 정리되어있다. PMM시험으로부터 구해진 무차원화된 힘과 모멘트는 최소자승법에 의해  $v'$ 에 대한  $Y'$  또는  $r'$ 에 대한  $N'$  등의 관계로 피팅(fitting)하여 원하는 유체동역학적 미계수를 얻었다. MMG 유체력 계수와의 관계식을 이용하여 계산하였다.

#### 1) 정적 편류각 시험

$$Y - (1+a_H)F_N = Y_0 + Y_v \cdot v + Y_{vv} \cdot v^3 \quad (9)$$

$$N-(x_R+a_H x_H)F_N = N_0 + N_v \cdot v + N_{vv} \cdot v^3$$

2) 선수요 시험

$$r = r_0 \sin \omega t \tag{10}$$

$$Y_{out} = \frac{2}{T} \int_0^T [Y - (1 + a_H)F_N] \cos \omega t dt$$

$$= [Y_r + (X_u - m)u]r_0 + \frac{3}{4} Y_{rr} \cdot r_0^3$$

$$N_{out} = \frac{2}{T} \int_0^T [N - (x_R + a_H x_H)] \cos \omega t dt$$

$$= (N_r - m x_{G_u}) \cdot r_0 + \frac{3}{4} N_{rr} \cdot r_0^3$$

3) 선수요 편류각 시험

$$Y_{out} = \frac{2}{T} \int_0^T [Y - (1 + a_H)F_N] \sin \omega t dt$$

$$N_{out} = \frac{2}{T} \int_0^T [N - (x_R + a_H \cdot x_H)F_N] \sin \omega t dt$$

$$Y_{out} = [Y_r + (X_u - m)u]r_0 - \frac{3}{4} Y_{rr} \cdot r_0^3$$

$$= Y_{rv} \cdot r_0 v^2 \tag{11}$$

$$N_{out} = (N_r - m x_{G_u}) \cdot r_0 - \frac{3}{4} N_{rr} \cdot r_0^3$$

$$= N_{rv} \cdot r_0 v^2$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T [Y - (1 + a_H)F_N] dt = Y_v \cdot v$$

$$-Y_{vv} \cdot v^3 = \frac{1}{2} Y_{vrr} \cdot v r_0^2$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T [N - (x_R + a_H x_H)F_N] dt = N_v \cdot v$$

$$-N_{vv} \cdot v^3 = \frac{1}{2} N_{vrr} \cdot v r_0^2$$

### 3.2 MMG 시험 계수 산출

타단독 시험에서 Horn은 고정이 되고, 타 가동 부로부터는 3축 로드셀을 이용하여 타접선력, 타 직압력 및 타 모멘트가 계측되었다. 속도를 1.348 m/sec로 한 이 시험은 MMG방법으로 HPMM의 시험결과를 분석하기 위하여 필요하다[5]. Fig.2는 타직압력의 타각도에 따른 변화를, Fig.3은 타단독 시험과 정적속도 및 타각시험에서 수행된 결과를 이용하여  $a_H$ 와  $x_H'$ 를 걸보기 전진비의 함수로 보여준다. Fig.4는 타직압력 일치법에 의한 타 유효 유입속도와 프로펠러 슬립에 의한 관계식으로부터의  $\epsilon$  및 추력 일치법에 의한 모델 반류를 보여준다. Fig.5는 편류각 및 타각 시험에서 타 유효 유입각을 편류각의 함수로 도시하였는데 특이한 것은 음의 편류각도에서 타유효 유입각이 일정하게 되는 구간이 발생되지 않았다. 이는 프로펠러의 존재에 의해 발생된 현상인데, 작은 모델을 사용하면 프로펠러의 슬립비의 차이가 커지므로 척도 효과 때문에 이러한 현상이 발생된다고 생각된다. Fig.6은 편류각 시험에서 모델의 반류를 편류각의 함수로 표현하였는데, 핏팅된 결과와 비교되고 있다. MMG수학모델에서 유체력계수는 타력을 분리하기 때문에 타의 영향을 제거해야 한다. 타의 영향을 제거하는 방법이 3.1절에 제시되어 있다. Fig. 7~8은 편류각 시험에서 타력을 포함한 선체에 작용하는 힘과 모멘트 및 타력의 영향을 제거한 힘과 모멘트를 비교하고 있다. Table 4, 5는 MMG와 Abkowitz에서 사용된 유체력 계수를 나타내고 있다. 선박의 조종성은 실험된 데이터의 선형해석으로부터 구해진 dynamic stability lever를 조사함으로써 양적으로 어느 정도 평가할 수 있다. Dynamic stability lever는 다음과 같이 정의된다.

$$l_d = l_r - l_v = \frac{N_r' - m' x'_{G_u}}{Y_r' + X_u' - m'} - \frac{N_v'}{Y_v'} \tag{12}$$

식 (12)에서 사용된 유체력계수는 실험치의 선형해석으로부터 해석된다는 점과 그 값들에 또한

타의 영향이 포함되어 있다는 점이 운동방정식에 사용된 유체력계수의 값과 다르다. Table 6에서 Abkowitz계수는 Hull, Propeller 및 Rudder가 포함된 실험으로부터 얻어진 값을 의미하고 MMG계수는 Hull과 Propeller의 영향만 포함된 것을 의미한다[6][7].

#### 4. 조종성능 추정

본 연구에 사용된 모델은 정유운반선이다. 위에서 언급된 두개의 수학모델 각각에 대하여 조종성능을 추정하였으며, 이들은 모두 실선 시운전 결과와 비교되었다.

##### 4.1 선회 시험

Fig. 9, 10은 타각 35°에서 수학모델의 차이에 따른 좌우선회의 특성을 보여준다. MMG모델의 전진거리와 선회직경이 모두 크게 계산되었고, 전진거리는 0.3L, 선회직경은 0.5L가량 Abkowitz모델의 결과와 차이가 났다. MMG모델에 의한 해석결과는 외력을 수정한 시운전결과와 일치하고 있고, Abkowitz모델에 의한 해석결과는 외력을 수정하지 않은 시운전 결과와 일치하고 있다.

##### 4.2 Zig-Zag 시험

지그재그 시험은 타의 효력을 알아보기 위해 수행 하였으며, 10°/10° 및 20°/20° 시험을 하였다. 각각의 시험결과는 Fig. 11, 12에 나타내었다. 10°/10°시험과 20°/20°시험은 Abkowitz모델, MMG 모델 및 시운전결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

##### 4.3 초기선회 시험

초기선회 시험은 10°타각에서 수행되며 Fig 13에서 궤적의 자취를 보여준다. 해석 결과는 수학모델의 차이에 따라 잘 일치한다.

#### 4.4 나선형 시험

직진성능은 나선형 시험에 의해 검증될 수 있고, 해석결과는 Fig. 14에 나타내었다.

### 5. 결 론

정유운반선에 대한 PMM시험을 수행하였고, 시험결과로부터 두 가지 수학모델에 대한 각종 유체력계수들을 계산하였다. 얻어진 계수들을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) MMG수학모델에 의한 조종성능 해석결과와 Abkowitz 수학모델에 의한 해석결과와 비교하여 그 유효성을 확인하였다.

2) 본 연구소에서는 MMG 수학모델에 의한 시험기법을 적용하여 시험데이터의 데이터 베이스 구축이 가능하게 되었으며, 초기 설계 단계에서의 조종성능추정의 정확도를 향상시킬 수 있게 되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] J.Strom-Tejsen and M.S. Chislett, "A Model Testing Techinque and Method of Analysis for the Prediction of Steering and Maneuvering Qualities of Surface Vessels", Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium Report Hy-7, September 1966.
- [2] MMG Report I~IV, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, 1977
- [3] 이호영, 염덕준, "선박조종 성능의 이론적 및 실험적 연구" HMRI-96-06-S106, 1996.
- [4] A. Ogawa and H. Kasai, "On the Mathematical Model of Manoeuvring Motion of Ship", I.S.P., 1978.
- [5] 이승건, et al., "사항상태에서 프로펠러와 타의 특성에 관한 실험적 연구", 대한조선학회논문집, 제31권 4호, 1994.
- [6] I. Y. Gong, et al., "The Influence of Rudder Area on the Maneuverability of a Ship with Large Beam-to-Draft Ratio", PRADS, 1995

[7] 손경호, et al., "타의 스펙길이에 따른 면적변화가 침로안정성에 미치는 영향에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제33권 4호, 1996.

Table 1 Principal characteristics of medium product carrier(Unit: Meter)

| Hull           | Ship  | Propeller           | Ship | Rudder        | Ship |
|----------------|-------|---------------------|------|---------------|------|
| L              | 218   | Number              | 1    | Number        | 1    |
| B              | 42    | Dia.                | 7.5  | Movable Area  | 62.0 |
| T              | 13.6  | Blades No.          | 4    | Rudder Height | 10.3 |
| ▽              | 99804 | Pitch Ratio at 0.7R | 0.75 | AR/LT(%)      | 2.09 |
| C <sub>B</sub> | 0.801 |                     |      |               |      |
| LCB            | +7.54 |                     |      |               |      |

Table 2 Static test conditions of PMM test

| Type of test      | Drift angle (deg.)                     | Rudder ang (deg.)           | Model speed (m/sec)                  |
|-------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|
| Static Drift      | 0, ±3, ±6, ±9, ±12, ±16, ±20, ±25, ±30 | 0                           | 1.348                                |
| Static Rudder     | 0                                      | 0, ±3, ±6, ±10, ±15, 20, 25 | 1.348                                |
| Speed and Rudder  | 0                                      | 0, ±3, ±6, ±10, ±15, 20, 25 | 0.4493<br>0.6740<br>0.8987<br>1.3480 |
| Rudder Open Water | 0                                      | 0, ±5, ±10, ±15             | 1.348                                |

Table 3 Dynamic test conditions of PMM test

| Type of test  | Drift angle (deg.) | Rudder angle (deg.) | Independent variable (Nondimensionalized)     | Model speed (m/sec) |
|---------------|--------------------|---------------------|---|---------------------|
| Pure Sway     | 0                  | 0                   | $-\dot{v}$<br>0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 | 1.348               |
| Pure Yaw      | 0                  | 0                   | $r'$<br>0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7          | 1.348               |
| Yaw and Drift | 0, 4, 8, 12, 16    | 0                   | $r'$<br>0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7          | 1.348               |

Table 4 Hydrodynamic coefficient obtained from the PMM test(Abkowitz)

| X-equation                                   |         | Y-equation                                   |          | N-equation                                   |         |
|--|---------|--|----------|--|---------|
| Nondimensional Coefficient × 10 <sup>5</sup> |         | Nondimensional Coefficient × 10 <sup>5</sup> |          | Nondimensional Coefficient × 10 <sup>5</sup> |         |
| $m'-X'_{\dot{u}}$                            | 2162.19 | $m'-Y'_{\dot{v}}$                            | 3266.18  | $m'x'_G-N'_{\dot{v}}$                        | 0.94    |
| $X'_{v\dot{v}}$                              | 197.74  | $m'x'_G-Y'_{\dot{r}}$                        | 26.77    | $l'_r-N'_{\dot{r}}$                          | 198.12  |
| $X'_{\dot{v}}-m'x'_G$                        | -66.77  | $Y'_{\dot{v}}$                               | -2051.68 | $N'_{\dot{v}}$                               | -712.99 |
| $X'_{\dot{r}}$                               | -168.9  | $Y'_{v\dot{v}}$                              | -4354.44 | $N'_{v\dot{v}}$                              | 74.36   |
| $X'_{\dot{v}}+(m'-Y'_{\dot{v}})$             | 3225.88 | $Y'_{rr}$                                    | -2151.41 | $N'_{rr}$                                    | 132.35  |
|  |         | $Y'_{r\dot{v}}-m'+X'_{\dot{v}}$              | -1472.06 | $Nr'-m'x'_G$                                 | -385.53 |
|  |         | $Y'_{rr}$                                    | 190.13   | $N'_{rr}$                                    | 28.55   |
|  |         | $Y'_{vv}$                                    | 5417.54  | $N'_{vv}$                                    | -1948.9 |
|  |         | $Y_{\delta}$                                 | 391.87   | $N_{\delta}$                                 | -203.07 |
|  |         | $Y_{\delta\delta}$                           | 120.92   | $N_{\delta\delta}$                           | -88.59  |
|  |         | $Y_{\delta r}$                               | 9.566    | $N_{\delta r}$                               | 3.484   |
|  |         | $Y_{\delta v}$                               | 0.942    | $N_{\delta v}$                               | -3.122  |
|  |         | $Y_{\delta\delta r}$                         | -371.84  | $N_{\delta\delta r}$                         | 242.89  |
|  |         | $Y_{\delta\delta v}$                         | 169.65   | $N_{\delta\delta v}$                         | -37.37  |
|  |         | $Y_0$  | -0.375   | $N_0$  | -2.03   |

Table 5 Hydrodynamic and MMG experimental coefficients obtained from the PMM test (MMG)

| MMG Coefficient            | Y-equation                                   |                                  | N-equation                                   |                 |          |
|----------------------------|--|----------------------------------|--|-----------------|----------|
|                            | Nondimensional Coefficient × 10 <sup>5</sup> |                                  | Nondimensional Coefficient × 10 <sup>5</sup> |                 |          |
| $f_{\sigma}$               | 1.611  | $Y'_{\dot{v}}$                   | -1863.91                                     | $N'_{\dot{v}}$  | -811.64  |
| $tr$                       | 0.4  | $Y'_{v\dot{v}}$                  | -4254.79                                     | $N'_{v\dot{v}}$ | 22.02    |
| $\epsilon$                 | 1.3661                                       | $Y'_{rr}$                        | -1994.63                                     | $N'_{rr}$       | 49.99    |
| $\delta_0$ (deg)           | -0.714                                       | $(Y'_{\dot{v}}-m'+X'_{\dot{v}})$ | -1694.43                                     | $Nr'-m'x'_G$    | -268.98  |
| $a_H$                      | 0.334  | $Y'_{rr}$                        | 288.40                                       | $N'_{rr}$       | -106.84  |
| $x_{H1}$                   | -0.5224                                      | $Y'_{v\dot{v}}$                  | 5208.79                                      | $N'_{v\dot{v}}$ | -1628.84 |
| $\gamma_1$ ( $\beta > 0$ ) | 0.548  |                                  |  |                 |          |
| $\gamma_2$ ( $\beta < 0$ ) | 0.428  |                                  |  |                 |          |
| $C_D$                      | 2.149  |                                  |  |                 |          |

Table 6 Linear hydrodynamic coefficients and dynamic lever

|                                    | Abkowitz(×10 <sup>5</sup> ) | MMG(×10 <sup>5</sup> ) |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| $Y'_{\dot{v}}$                     | -1787.653                   | -1448.289              |
| $N'_{\dot{v}}$                     | -755.367                    | -766.387               |
| $-m + Y'_{\dot{r}} + X'_{\dot{u}}$ | -1421.242                   | -1577.393              |
| $-m'x'_G + N'_{\dot{r}}$           | -382.157                    | -300.128               |
| $lv$                               | -0.423                      | -0.529                 |
| $lr$                               | -0.269                      | -0.190                 |
| $l$                                | -0.154                      | -0.339                 |

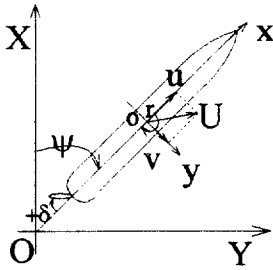


Fig. 1 Coordinates System

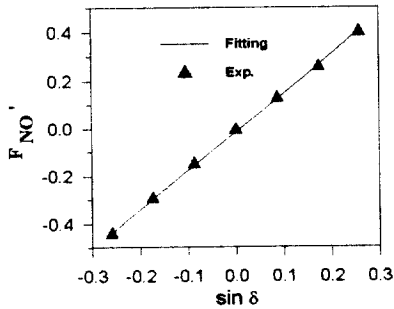


Fig. 2 Rudder Open Water Test Results

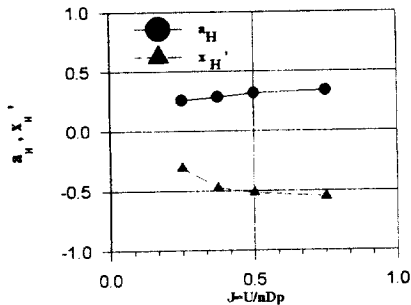


Fig. 3 Variation of Rudder Interference Parameter

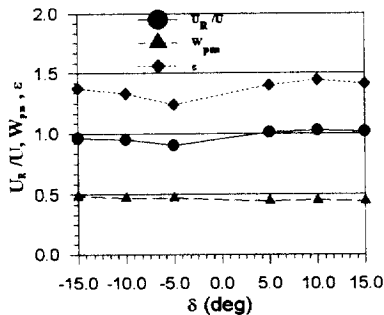


Fig. 4 Variation Propeller and Rudder Inflow Parameter(U=1.348m/s)

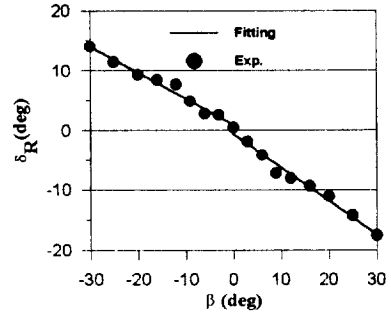


Fig. 5 Variation of Rudder Effective Angle with Drift Angle

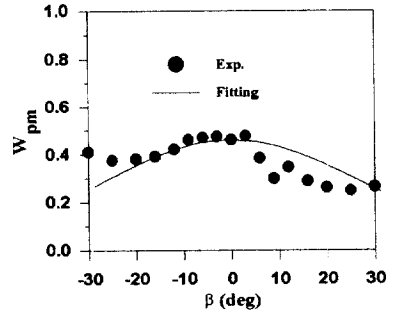


Fig. 6 Variation of Propeller Wake Fraction Coefficient with Drift Angle

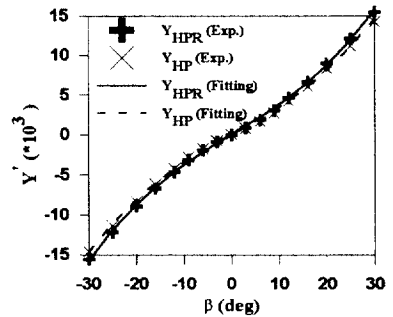


Fig. 7 Variation of Side Force with Drift Angle

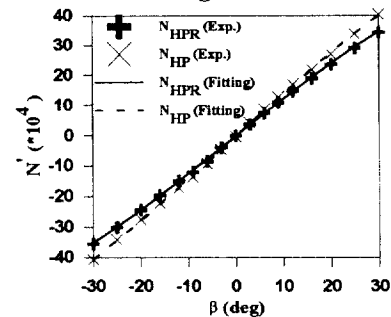


Fig. 8 Variation of Yawing Moment with Drift Angle

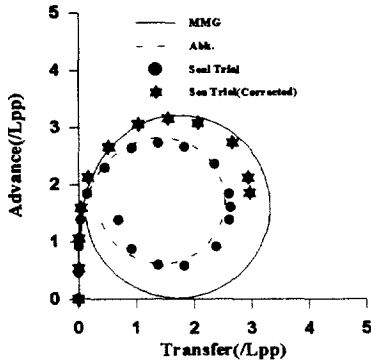


Fig. 9 Turning Trajectory for 35° Rudder(Starboard)

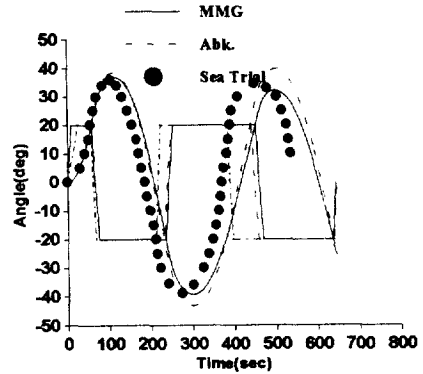


Fig. 12 20°/20° Zig-Zag Maneuver(Starboard)

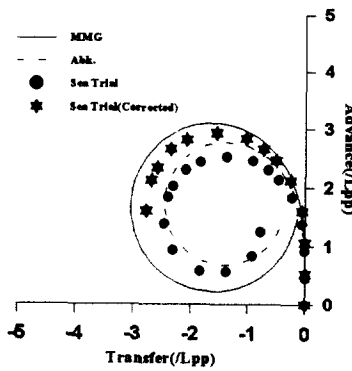


Fig. 10 Turning Trajectory for 35° Rudder(Port)

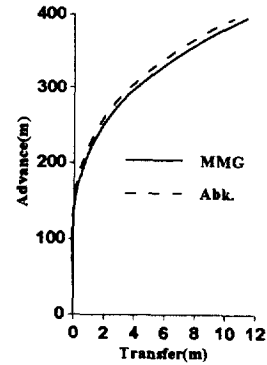


Fig. 13 Initial Turning Trajectory for 10° Rudder (Starboard)

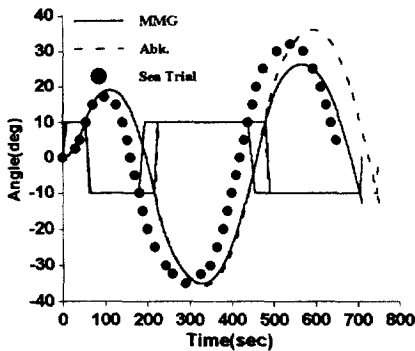


Fig. 11 10°/10° Zig-Zag Maneuver(Starboard)

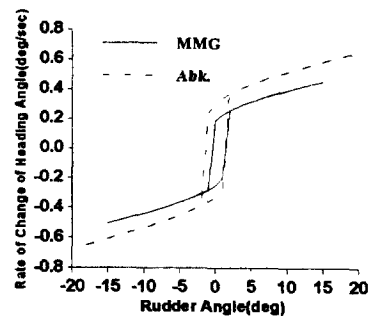


Fig. 14  $r-\delta$  Curve of Spiral Maneuver