

선박의 조종성능 추정에 있어서 시스템식별법을 이용한 PMM 시험 기법에 대한 연구

이태일* · 권순홍**

*현대중공업 선박해양연구소

**부산대학교 조선·해양공학과

A Study on Practical PMM Test Technique for Ship Maneuverability Using System Identification Method

TAE-IL LEE*, AND SUN-HONG KWON**

*Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Ship Maneuverability 선박조종성, PMM Test 평면운동시험, Hydrodynamic Coefficients 유체력미계수, System Identification 시스템식별법, Fourier Integration Method 푸리에 적분법, Least Square Method 최소자승법

ABSTRACT: A system identification method is introduced to increase the prediction accuracy of a ship's maneuverability in PMM test analysis. To improve the accuracy of linear hydrodynamic coefficients, the analysis techniques of pure sway and yaw tests are developed and confirmed. In the analysis of sway tests, accuracy to linear hydrodynamic coefficients depends on the frequency of sway motion. To obtain nonlinear hydrodynamic coefficients for large drift angles, a combined yaw test is introduced. Using this system identification method, runs of PMM test can be reduced while retaining sufficient accuracy, compared to the Fourier integration method. Through the comparisons with sea trial results and the Fourier integration method, the accuracy and efficiency of the newly proposed system identification method, based on least square method, has been validated.

1. 서 론

선박이 대형화됨에 따라 선박의 안전 운항과 해양오염에 대한 관심이 증대되면서 최근 IMO (국제해사기구) DE 45차 회의에서 선박의 조종성 잠정기준안 (IMO Res. A.751(18))에 대한 개정 작업이 완료되었다. 이에 따라 선박 설계 단계에서 조종성의 중요성이 증가되고 있다.

이러한 선박의 조종성능은 선체의 기본형상과 타의 특성에 의하여 대부분 결정되어진다. 따라서 선박의 건조 후에 조종성능의 개선 작업이 매우 어려우므로 초기설계 단계에서 정확한 조종성능의 추정이 필요하다. 정도 높은 조종성능 추정을 위해서 모형시험이 보편적으로 수행되고 있으며 특히 예인수조에서 수행할 수 있는 PMM (Planar Motion Mechanism) 시험이 널리 활용되고 있다. 이는 PMM 시험의 결과를 이용하여 조종운동방정식의 유체력미계수를 계산하고 이를 이용하여 선박의 조종시뮬레이션을 수행하여 조종 특성을 구하는 방법이다. 전통적으로 PMM 시험에서 위측된 동적시험의 신호를 해석하기 위해서 0차 및 1차 Fourier 변환 값을 사용하고 있는데 이러한 Fourier 적분법은 비선형계수를 구하기 위하여 많은 시험을 수행해야 하는 단점이 있다.

따라서 예인수조를 효율적으로 활용하기 위하여 시스템식별법을 위한 PMM 시험 해석 기법의 개발이 Kalman filter 등을 이용하여 이루어져 왔다. 그러나 지금까지 시스템식별법을 이용한 조종성능 해석법은 동시편류 현상과 모형시험 기법 등의 문제로 인하여 조종성능 추정 정도 면에서 실용적으로 활용하기에는 많은 어려움이 있었다.

본 연구에서는 시스템식별법으로 조종운동방정식의 유체력미계수를 추정함에 있어서 동시편류 현상의 문제를 해결하기 위하여 최소자승법과 2 가지의 시험을 동시에 이용하는 해석 기법법을 사용하였다. 좌우동요시험 (pure sway test) 을 이용한 시험의 해석에서는 선박의 선형에 따른 동적운동 특성의 차이를 고려한 모형시험 및 해석법을 개발하였다. 편류각에 따른 비선형유체력을 보다 효과적으로 구하기 위해서 combined yaw test 를 도입하였다. 또한 순수동요시험 (pure yaw test) 의 해석에 있어서도 선형유체력미계수와 비선형유체력미계수를 분리하여 구하였다. 이러한 시스템식별법을 이용한 조종성능 추정법의 결과를 실선의 시운전결과와 비교, 검증하였고 그 효용성을 확인할 수 있었다.

2. 조종운동방정식

해1저자 이태일 연락처: 울산광역시 동구 전하동 1

052-230-4714 tilee@hhi.co.kr

선박의 조종성능은 정수 중에서의 운동을 다루고 있으므로

수학모형은 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)가 연성된 운동방정식을 사용한다. 따라서 Fig. 1과 같이 배에 고정된 좌표계를 사용하였을 때 O-xyz에 대한 운동방정식은 (1) 식과 같이 나타낼 수 있다.

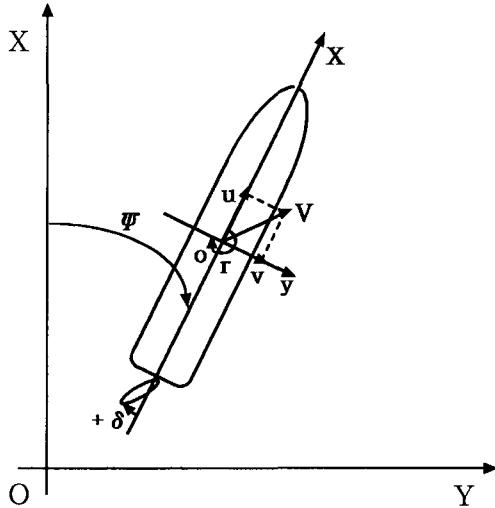


Fig. 1 Coordinate System

$$\begin{aligned} (m' - X'_{uu}) \dot{u}' &= f_1(\eta, v', r', \delta) \\ (m' - Y'_{vv}) \dot{v}' + (m' x'_G - Y'_{vr}) \dot{r}' &= f_2(\eta, v', r', \delta) \\ (m' x'_G - N'_{vv}) \dot{v}' + (Iz' - N'_{vr}) \dot{r}' &= f_3(\eta, v', r', \delta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} f_1(\eta, v', r', \delta) &= X'_{\eta}(1-\eta) + X'_{\eta\eta}(1-\eta)^2 + \\ &X'_{\eta\eta\eta}(1-\eta)^3 + X'_{vv}v'^2 + (X'_{rr} + m'x'_G)r'^2 + \\ &X'_{\delta\delta}\delta^2 + (X'_{vr} + m')v'r' \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_2(\eta, v', r', \delta) &= Y'_0 + Y'_v v' + Y'_{vv} v'^3 + Y'_{vrr} v' r'^2 \\ &+ (Y'_r - m')r' + Y'_{rrr} r'^3 + Y'_{rv} r' v'^2 + Y'_\delta \delta \\ &+ Y'_{\delta\delta\delta} \delta^3 + Y'_\eta(1-\eta) + Y'_{\eta\eta}(1-\eta)^2 + Y'_{\delta\eta} \delta(1-\eta) \\ &+ Y'_{\delta\eta\eta} \delta(1-\eta)^2 + Y'_{v\eta} v'(1-\eta) + Y'_{v\eta\eta} v'(1-\eta)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_3(\eta, v', r', \delta) &= N'_0 + N'_v v' + N'_{vv} v'^3 + N'_{vrr} v' r'^2 \\ &+ (N'_r - m'x'_G)r' + N'_{rrr} r'^3 + N'_{rv} r' v'^2 + N'_\delta \delta \\ &+ N'_{\delta\delta\delta} \delta^3 + N'_\eta(1-\eta) + N'_{\eta\eta}(1-\eta)^2 + N'_{\delta\eta} \delta(1-\eta) \\ &+ N'_{\delta\eta\eta} \delta(1-\eta)^2 + N'_{v\eta} v'(1-\eta) + N'_{v\eta\eta} v'(1-\eta)^2 \end{aligned}$$

동력학적 변위에 대한 힘과 모멘트의 편미분 계수(유체력미계수)는 다음과 같은 첨자로 표기하였다.

$$N'_v = \frac{\partial N}{\partial v'}, \quad X'_{\delta\delta} = \frac{\partial^2 X}{\partial \delta^2}, \quad N'_{vrr} = \frac{\partial^3 N}{\partial v' \partial r'^2} \text{ etc.}$$

그리고 첨자 '는 선박의 길이와 속도 등으로 무차원화 되었음을 나타내고 있으며 X, Y 그리고 N은 x, y 방향으로의 힘과 z축에 대한 모멘트를 의미하고 있다. 또한 u, v, r, δ 그리고 η는 x, y 방향으로의 속도, 선수동요 각속도, 타각 그리고 η = u₀/u (u₀=설계속도)를 나타낸다.

3. PMM 시험

일반적으로 (1)식의 조종운동방정식을 풀기 위한 모형시험은 PMM (Planar Motion Mechanism) 시험, 회전팔 (Rotating Arm) 시험 그리고 CMT (Circular Motion Test) 등이 있다. 본 연구에서는 예인수조에서 가장 널리 사용되고 있는 PMM 시험에 대해서 논하도록 하겠다. PMM 장비는 예인전차의 뒷부분에 설치되었으며 모형선과는 각각 짐벌(gimbal)과 로드셀(load cell)이 부착된 3개의 지지대로 연결되었다. PMM 시험의 종류는 Fig. 2와 같으며 크게 정적시험(static test)과 동적시험(dynamic test)으로 구분할 수 있다.

정적시험에 있어서는 계측시간에 대한 평균값으로 간단하게 해석할 수 있으므로 본 연구에서는 좌우동요시험과 선수동요 시험과 같이 궤적과 선수각이 sine 운동을 하는 동적시험에 대해서 논의하고자 한다.

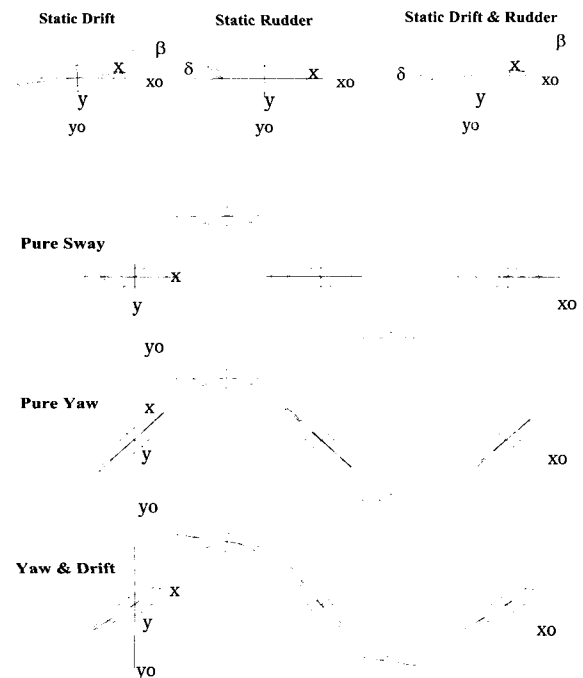


Fig. 2 PMM Test Mode

3.1 Fourier 적분법

동적시험의 경우에 실제 로드셀에서 계측된 신호에는 모형선에 작용하는 유체동력학적 관성력과 감쇠력이 포함되어 있어 이를 분리하여 수학모형에 맞는 유체력미계수를 구할 수 있다. 따라서 계측된 신호를 Fourier sine 또는 cosine 변환을 하고 1주기까지 적분하면 다음과 같다.

$Y_R = Y_{in}\sin \omega t + Y_{out}\cos \omega t$ 에서

$$\int_0^T Y_R \sin \omega t dt = \frac{T}{2} Y_{in} \quad (3)$$

$$\int_0^T Y_R \cos \omega t dt = \frac{T}{2} Y_{out}$$

여기서 Y_R 은 실험에서 측정된 신호이고 T 는 주기이다. Y_{in} 은 변위와 같은 위상을 갖는 관성력과 부가질량력을 포함한 힘이 Y_{out} 는 변위와 90° 의 위상차를 갖는 감쇠력이다.

그러나 이와 같은 방법을 사용하게되면 많은 시험을 수행해야 하는 단점이 있다. 선수동요시험의 경우 Y_r, N_r 과 같은 선형 유체력미계수 뿐 아니라 Y_{rr}, N_{rr} 과 같은 비선형 유체력미계수를 모두 구하기 위해서는 최소한 6회 이상의 시험을 수행해야하고 또한 선수동요와 편류각이 중첩된 경우의 비선형 유체력미계수를 구하기 위해서는 많은 추가시험이 필요하게 된다.

3.2 시스템식별법(System Identification Method)

Fourier 적분법의 단점인 많은 시험 횟수를 줄이고 보다 정도 높은 조종성 추정의 가능성을 검토하기 위하여 시스템식별법을 적용하였다. 시스템식별법이란 이미 알고 있는 정보를 이용하여 필요한 정보를 구하는 체계적인 방법을 통칭하는데 PMM 시험 해석의 경우 검증의 대상이 측정된 신호 사이의 관계를 나타내는 매개변수 추정법으로 정의할 수 있다. 여기에는 Kalman filter, 최소자승법, 부분적분법, Recursive Least Square, 유전자 알고리즘, 신경회로망 그리고 뉴로 퍼지 모델링 등이 활용될 수 있으나 동시편류 현상, 초기값의 유무, 계산시간, 추정 정도 등을 고려할 때 조종운동방정식의 유체력미계수를 추정하기 위한 방법으로는 최소자승법이 효과적임이 알려졌다.

PMM 시험의 좌우동요시험에 적용하는 경우, 선박을 자항속으로 예인하면서 좌우동요를 발생시키는 시험에서 예인속도와 좌우동요의 진폭 및 주파수 정보를 이용해서 운동과 관련된 모든 정보와 측정된 힘과 모멘트를 얻을 수 있다. 이러한 정보를 이용하면 좌우동요 속도 v 및 가속도 \dot{v} 에 관계되는 유체력미계수를 식(4)와 같이 구할 수 있다. v 와 관계되는 계수만을 구하는 것은 정적편류각시험에서도 구할 수 있는데 정밀하게 정된 시험의 경우 두 결과는 거의 동일하다고 알려져 있다.

$$X_{measure} = X_0 + X_{vv}v^2$$

$$Y_{measure} = Y_0 - (m - Y_v)\dot{v} + Y_v v + Y_{vv}v^3 \quad (4)$$

$$N_{measure} = N_0 - (m x_G - N_v)\dot{v} + N_v v + N_{vv}v^3$$

마찬가지 방법으로 좌우동요시험과 yaw & drift test에서도 r 와 \dot{r} 그리고 r 과 v 의 연성된 계수를 구할 수 있다. 즉 시스템식별법을 사용하면 좌우동요시험 2회, 선수동요시험 2회 그리고 yaw & drift test 2회를 수행하여 $\dot{v}, \dot{r}, v, vv, r, rrr, vr, vrr$ 과 관련된 미계수를 이론적으로 모두 구할 수 있다.

3.2.1 좌우동요시험

좌우동요시험은 일반적으로 좌우동요 가속도인 \dot{v} 에 의한 유체력미계수를 구하기 위하여 수행되어 왔다. 좌우동요 속도인 v 에 대한 유체력미계수는 정적편류각시험으로부터 구하여 왔는데 시스템식별법으로는 식(4)에서와 같이 속도 v 및 가속도 \dot{v} 에 관계되는 유체력미계수를 모두 구할 수 있다. 그러나 시스템식별법으로 구한 유체력미계수와 조종성능 추정 결과는 정적편류각시험과 Fourier 적분법으로 구한 결과와 차이를 보이고 있었다. 여기에는 여러 요인이 있을 수 있으나 특히 시험조건 차이도 중요한 원인이다. 특히 정적편류각시험과 좌우동요 시험에서 v, vv 와 관련된 계수를 추정하여 비교할 때 Fig. 3에서 보는 바와 같이 정적편류각시험에서는 v 값의 범위가 0.5 ~ -0.5 이지만 좌우동요시험에서는 가장 높은 좌우동요 주파수에서 시험하더라도 약 0.2 ~ -0.2로서 상당한 차이가 있다.

따라서 좌우동요시험에서는 그림에서와 같이 정도 높은 비선형계수를 함께 구하는 것은 어려우므로 선형계수만을 구하는 것이 보다 효과적이다. Table 1에 좌우동요시험에서 선형계수만을 구한 경우와 비선형계수를 함께 구한 경우를 정적편류각시험에서 구한 선형계수와 비교하여 나타내었다.

표에서는 좌우동요시험에서 선형계수만을 구하는 것이 보다 나은 추정 정도를 보여주고 있다. 그러나 선형계수만 구하더라도 좌우동요의 주파수에 따라서 차이를 보이고 있고 이 중에서 정적편류각시험에서의 Y_v, N_v 와 같은 값을 구하기는 매우 어렵다.

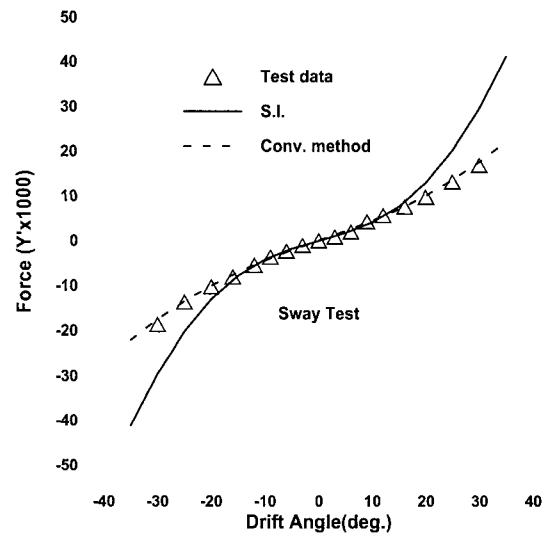


Fig. 3 Test Ranges in Static Drift Test and Pure Sway Test

Table 1 Analysis of Sway Test for 160k Tanker

| | $Y_v \times 10^5$ | $N_v \times 10^5$ |
|---------------------------|-------------------|-------------------|
| Sway - Linear only | -1890 | -660 |
| Sway - Linear + Nonlinear | -1534 | -652 |
| Static Drift Test | -1795 | -634 |

Table 2 Results of Sway Test Analysis for $-\dot{v}$ for 160k Tanker

| $-\dot{v}$ | $Yv \times 10^5$ | $Nv \times 10^5$ | Nv/Yv |
|--------------|------------------|------------------|---------|
| 0.05 | -1599 | -680 | 0.425 |
| 0.10 | -1621 | -693 | 0.427 |
| 0.15 | -1680 | -662 | 0.394 |
| 0.20 | -1690 | -657 | 0.388 |
| 0.25 | -1829 | -659 | 0.360 |
| 0.30 | -1890 | -660 | 0.349 |
| Static Drift | -1795 | -634 | 0.353 |

이는 정적시험과 동적시험의 운동 특성의 차이 때문에 정밀하게 시험을 수행한다 하더라도 실제적인 좌우동요 주파수 범위에서는 이러한 차이를 없애기는 어려운 일로 보인다. 따라서 선박의 조종특성을 결정짓는 것은 식 (5)의 침로안정성 지수이므로 정적편류각시험에서의 Nv/Yv 와 가장 근사한 값을 구하는 것이 보다 효과적으로 판단된다.

$$l_d = \frac{N_r}{Y_r} - \frac{N_v}{Y_v} \quad (5)$$

Table 2에 $-\dot{v}$ 에 따라 구한 선형계수와 Nv/Yv 의 비를 정적 편류각시험의 결과와 비교하여 나타내었다.

Yv 와 Nv 를 모두 잘 맞게 하는 $-\dot{v}$ 를 구하기는 어렵지만 적절한 Nv/Yv 값은 $-\dot{v}$ 이 0.25와 0.3 사이에 있음을 알 수 있다. 정적편류각시험에서의 Nv/Yv 와 가장 잘 일치하는 좌우동요시험의 $-\dot{v}$ 는 선형에 따라 차이가 있었으며 Fig. 4와 같다.

여기서 $\nabla' = displacement/L^3 = C_b(\frac{B}{L})(\frac{t}{L})$ 이며 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$-\dot{v} = 16.65 \nabla' + 0.034 \quad (6)$$

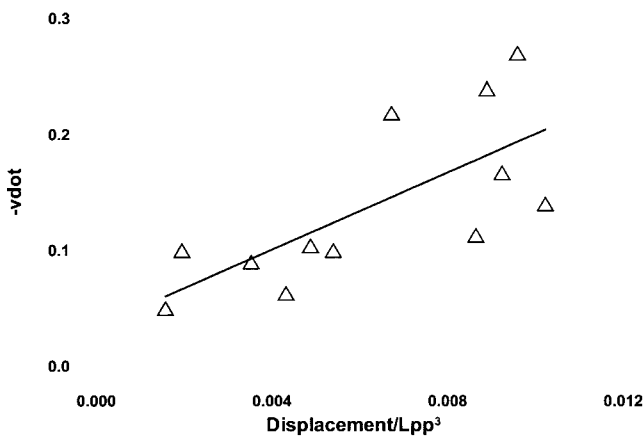


Fig. 4 Optimum $-\dot{v}$ for Analysis of Sway Test

즉 날씬한 선형일수록 낮은 $-\dot{v}$ 그리고 비대한 선형일수록 높은 $-\dot{v}$ 에서 좌우동요시험을 수행하는 것이 보다 정도 높은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 비선형성이 날씬한 선형일수록 크며 또한 낮은 편류각에서 나타나기 때문으로 추정된다.

3.2.2. Combined Yaw Test

좌우동요시험에서 $Yvvv$ 와 $Nvvv$ 같은 비선형계수를 함께 구하기 위해서는 고주파수와 대진폭 운동을 발생시켜야 하는데 이 경우에는 sway 운동의 정밀도가 떨어지고 장비 자체의 한계 등의 문제로 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 새로운 형태의 combined yaw 시험을 Fig. 5와 같이 적용하였다.

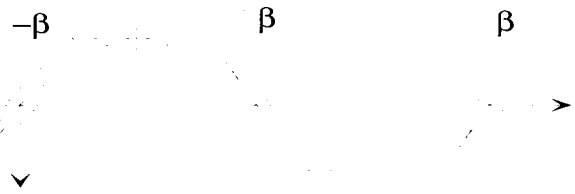


Fig. 5 Combined Yaw Test

이는 선수동요시험에서 선수각을 순수동요를 위한 선수각이 아닌 적당히 다른 선수각으로 설정하는 것인데 이렇게 시험을 수행하게 되면 저주파수에서 큰 편류각에 대한 시험이 가능하게 된다. 어떤 $\omega (= 2\pi f)$ 에서 순수동요 운동을 위한 최대 선수각을 ϕ_0 라 하면 선수각은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \psi &= \phi_0 \sin(\omega t) + \beta_0 & : \text{Yaw and Drift Test} \\ \psi &= (\phi_0 + \beta_0) \sin(\omega t) & : \text{Combined Yaw Test} \end{aligned} \quad (7)$$

ψ : yaw angle
 β_0 : setted drift angle

따라서 yaw & drift test에서는 편류각을 따로 설정하여 시간에 대하여 일정한 값을 가지는데 비하여 combined yaw 시험에서는 설정된 선수각에 편류각이 포함되어 있으며 1 번의 시험에서 편류각이 선수각과 같은 위상을 가지며 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 까지 변화시킬 수 있다. 즉 시간에 따른 편류각은 식(8)과 같다.

Yaw and Drift Test

$$\beta(t) = \beta_0$$

Combined Yaw Test

$$\begin{aligned} \beta(t) &= (\phi_0 + \beta_0) \sin(\omega t) - \phi_0 \sin(\omega t) \\ &= \beta_0 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (8)$$

편의상 새로이 적용된 시험을 yaw & drift test와 구별하기 위하여 combined yaw test라 하였다. Table 3에 combined yaw test에서 구한 $Yvvv$ 와 $Nvvv$ 를 정적편류각시험과 좌우동요시험에서의 경우와 비교하여 나타내었다.

Table 3 Comparison of Yvvv and Nvvv for 160k Tanker

| Method | Static Drift | Pure Sway | Combined Yaw |
|-----------------------|--------------|-----------|--------------|
| $Y_{vvv} \times 10^5$ | -4336 | -13434 | -4362 |
| $N_{vvv} \times 10^5$ | 534 | -303 | 604 |

3.2.3 선수동요시험

선수동요시험은 실선의 선회 각속도를 고려하여 무차원화된 선회각속도인 r' 이 0.1 ~ 0.7 사이에 대하여 6, 7회 수행되었다. 그러나 r' 이 0.7 이하의 구간에서 Y_{rrr} 과 N_{rrr} 의 비선형성은 거의 나타나지 않는다. Fig. 5에 4척의 선박에 대한 N_r/Y_r 의 비를 각각의 r' 에 대하여 해석하여 나타내었다.

P905에서 N_r/Y_r 의 값이 상당히 불안정한 모습을 보이고 있지만 전체적으로 r' 의 값이 0.1~0.5까지는 N_r/Y_r 값이 비슷한 영향을 보이고 있다. 그러나 r' 이 0.7 일 때 N_r/Y_r 의 값이 약간 큰 편이다. 따라서 시스템식별법에서는 r' 값이 0.3, 0.4 인 경우에 있어서는 선형유체력미계수만을 구하는 것이 비선형유체력미계수를 함께 구할 때 발생할 수 있는 간섭을 적절히 배제할 수 있을 것으로 보이며 이 결과를 이용하여 비선형유체력미계수인 Y_{rrr} 및 N_{rrr} 은 r' 값이 0.7에서 구하였다. Table 4에 각각의 방법으로 해석한 선수동요시험의 결과를 나타내었다. 여기서 old SI 방법은 가장 고주파수의 두 가지 시험 결과인 선형과 비선형계수를 동시 구한 방법이다.

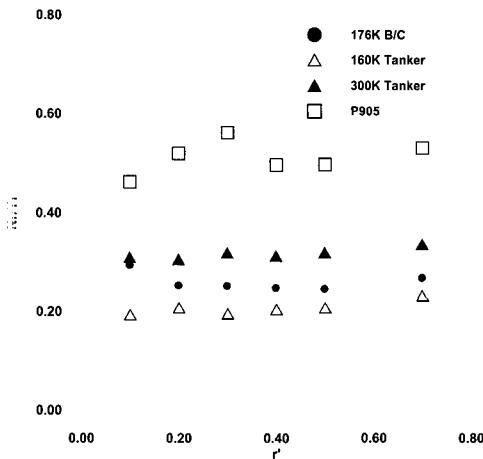


Fig. 6 N_r/Y_r from Yaw Tests using SI Method

Table 4 Comparison of Pure Yaw Test Results for 160k Tanker

| Method | Fourier 적분법 | Old SI | New SI |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| $Y_r' \times 10^5$ | -1554 | -1438 | -1495 |
| $N_r' \times 10^5$ | -303 | -276 | -294 |
| $Y_{rrr}' \times 10^5$ | 294 | -10 | 169 |
| $N_{rrr}' \times 10^5$ | -81 | -156 | -104 |
| N_r/Y_r | 0.195 | 0.192 | 0.197 |

4. 시스템식별법의 적용

3장에서 시스템식별법을 이용한 PMM 시험법을 효과적으로 적용하기 위한 방법을 검토하였다. 전체적인 PMM시험중에서 정적타각시험과 속도 및 타각시험의 경우 시스템식별법을 적용하기 어렵고 또한 모형시험 시간도 많이 소요되지 않기 때문에 기존의 방법을 그대로 사용하였다. 따라서 이 외의 시험에 대하여 시스템식별법을 적용할 경우 새로운 방법과 기존의 시스템식별법의 차이는 Table 5와 같으며 약 60회의 모형시험 횟수를 8회 정도로 줄일 수 있으며 전체적인 모형시험 시간은 약 1/3로 줄일 수가 있다. Table 5에 각각의 PMM시험에 대한 모형시험 횟수와 시험범위 그리고 구할 수 있는 유체력미계수를 나타내었다.

이와 같은 시스템식별법을 이용하였을 경우와 Fourier 적분법(FI)의 경우에 대하여 지그재그 해석을 수행한 결과를 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 새로이 개발된 해석법은 기존의 시스템식별법에 비하여 추정 정도가 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

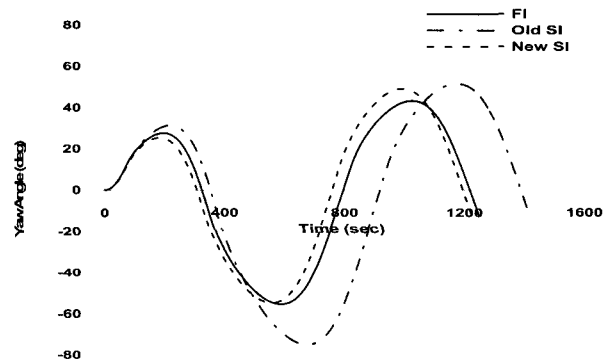


Fig. 7 Comparison of 10°/10° Zig-Zag Simulations for 160k Tanker

Table 5 PMM Tests and Related Coefficients in SI Method

| Type of test | Obtained coefficients | | |
|-------------------|--|--|--|
| | New SI | Test Scope | Old SI |
| Pure Sway (2) | $Y_{v'}$, Y_v $N_{v'}$, N_v | (6)식의 $v \pm 0.025$ | X_{vv} $Y_{v'}$, Y_v , Y_{vv} $N_{v'}$, N_v , N_{vv} |
| Pure Yaw (3) | X_{rr} $Y_{r'}$, Y_r $N_{r'}$, N_r | $r' = 0.3, 0.4$ | X_{rr} $Y_{r'}$, Y_r , Y_{rr} $N_{r'}$, N_r , N_{rr} |
| | | $r' = 0.7$ | |
| Combined Yaw (1) | X_{vv} Y_{vvv} N_{vvv} | $r' = 0.1$ & $\beta = 30^\circ$ | |
| Yaw and Drift (2) | X_{vr} Y_{rvv} , Y_{vrr} N_{rvv} , N_{vrr} | $r' = 0.5, \beta = 12^\circ$ $r' = 0.7, \beta = 16^\circ$ | X_{vr} Y_{rvv} , Y_{vrr} N_{rvv} , N_{vrr} |

* sway amplitude : 0.5m

Table 6 Comparison with Sea Trial Results for 310k Tanker

| Test | | Fourier Integ. | New SI | Sea Trial |
|--------------|---------------------|----------------|--------|-----------|
| Turning Test | Advance (Lpp) | 3.17 | 3.05 | 2.80 |
| | Tactical Dia.(Lpp) | 3.26 | 3.33 | 2.90 |
| 10°/10° | 1st Overshoot(deg.) | 7.1 | 7.2 | 7.6 |
| Zig-Zag Test | 2nd Overshoot(deg.) | 16.4 | 18.6 | 21.0 |
| 20°/20° | 1st Overshoot(deg.) | 14.1 | 14.0 | 13.7 |

Table 7 Comparison with Sea Trial Results for 165k Tanker

| Test | | Fourier Integ. | New SI | Sea Trial |
|--------------|---------------------|----------------|--------|-----------|
| Turning Test | Advance (Lpp) | 2.75 | 2.80 | 2.85 |
| | Tactical Dia.(Lpp) | 2.66 | 2.75 | 2.75 |
| 10°/10° | 1st Overshoot(deg.) | 9.2 | 9.9 | 10.8 |
| Zig-Zag Test | 2nd Overshoot(deg.) | 22.8 | 26.2 | 26.4 |
| 20°/20° | 1st Overshoot(deg.) | 17.3 | 17.9 | 14.2 |

Table 8 Comparison of Linear Hydrodynamic Coefficients for 310k and 165k Tankers

| Method | | Fourier 적분법 | New SI |
|-------------|-------------------|-------------|--------|
| 310k Tanker | $Yv' \times 10^5$ | -2351 | -2353 |
| | $Nv' \times 10^5$ | -865 | -827 |
| | $Yr' \times 10^5$ | -1290 | -1284 |
| | $Nr' \times 10^5$ | -392 | -406 |
| 165k Tanker | $Yv' \times 10^5$ | -1913 | -1869 |
| | $Nv' \times 10^5$ | -686 | -699 |
| | $Yr' \times 10^5$ | -1326 | -1315 |
| | $Nr' \times 10^5$ | -347 | -360 |

일반적으로 PMM시험은 IMO의 조종성기준에 대비하기 위하여 scantling draft condition에서 수행되나 실선시운전은 시간과 비용의 문제로 속력시운전의 조건인 design draft condition에서 수행되기에 직접 비교할 기회는 많지 않다. 그러나 최근에 PMM시험과 같은 흘수 조건에서 실선시운전이 이루어진 경우가 있어 그 비교 결과를 Table 6, 7에 나타내었다.

Table 8에는 Fourier 적분법과 본 연구의 시스템식별법에 의한 선형유체력미계수를 비교하여 나타내었다.

본 연구에서의 시스템식별법에 의한 조종성능 추정은 Fourier 적분법과 비교적 잘 일치하고 있을 뿐 아니라 시운전결과와의 비교에선 오히려 더 정도 높은 결과를 보여주고 있다. 지그재그성능의 추정은 그 정도가 많이 향상되어 시운전결과와 잘 일치하고 편이지만 선회성능의 추정에 있어서는 모형시험의 결과가 전체적으로 정도가 떨어지는 경우도 있다. 선회성능은 선회시 큰 편류각이 발생하고 선속 저하도 극심하게 나타나므로 비선형계수와 X 방향의 힘의 추정에 많은 영향을 받기 때문에 추정된다.

5. 결 론

선박의 조종성능 추정을 위한 PMM시험의 수행과 해석에 있어서 예인수조의 효율적 활용과 조종성능 추정 정도 향상의 가능성을 검토하기 위하여 실제 적용 가능한 시스템식별법을 개발하였고 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 시스템식별법의 활용으로 예인수조에서의 모형시험 시간을 대폭 줄일 수 있었다.
- (2) 시운전결과와의 비교 결과, 시스템식별법을 이용한 조종성능 추정기법의 활용 가능성을 확인하였다.
- (3) 선박의 기본형상에 따라 좌우동요시험의 시험 범위를 적절히 함으로써 유체력미계수의 추정정도를 향상시킬 수 있었다.
- (4) 새로이 적용된 combined yaw test는 비선형 유체력미계수의 추정 정도 향상에 매우 효과적이었다.
- (5) 선속동요시험의 해석에 있어서 선형, 비선형 유체력미계수를 분리하여 구하는 방법은 유체력미계수의 추정 정도를 향상시켰다.

참 고 문 헌

김봉익, 권중현 (2002). “유전자 알고리즘을 이용한 뼈대 구조물의 이산 최적화”, 한국해양공학회지, 제16권, 제4호, pp 25-31

김수영 등 (1998). “뉴러 퍼지 모델링을 이용한 초기 주요 요목 결정 및 선형 생성”, 한국해양공학회지, 제12권, 제3호, pp 103-111

류민철 (1992). 선박 조종성 미계수 추정에 관한 실험적 해석, 공학석사학위논문, 서울대학교.

이기표, 성영재 (1999). System Identification 방법을 이용한 조종계수 추정 및 PMM시험법 정립, HMRI Report, H810A-9903-1.

이석원 (1997). 시스템식별법을 이용한 조종성 계수의 추정 및 PMM시험법 정립, 공학석사학위 논문, 서울대학교.

이태일, 염덕준, 권순홍 (2000). “선박의 조종성능 추정을 위한 PMM 시험법 개선”, 제1회 한국유체공학학술대회 논문집, pp 835-838.

주원식, 조석수 (1996). “역전과 신경회로망을 이용한 피로 균열 성장 모델링에 대한 연구”, 한국해양공학회지, 제10권, 제1호, pp 65-74.

황윤식 (1996). 시스템식별법을 이용한 선박 조종 운동 방정식의 추정, 공학석사학위논문, 서울대학교.

Abkowitz, M.A. (1964). Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Maneuverability, Report No. Hy-5, Hydrodynamic Department, Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium, Denmark.

Hasegawa et al. (1980). Report on MMC, V. Experimental Examination of Mathematical Models of Manoeuvring Motions and their Improvement, Bulletin of SNA, No 616.

- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.
- Malaba, R. and Spingarn, K. (1982). *Control, Identification and Input Optimization*, Plenum Press Report of the Maneuverability Committee, Proceedings of 10th ITTC.
- Lee, K.P. et al. (1993). "Evaluation of Hydrodynamic Derivatives from PMM Test by System Identification", MARSIM '93, Vol II, pp 489-497.
- Soderstrom, T. et al. (1983). *Theory and Practice of Recursive Identification*, MIT Press.
- Sung, Y.J. et al. (2000). "An Analysis of the PMM Tests Using a System Identification Method", IMDC, pp 715-725.
-
- 2002년 8월 8일 원고 접수
2002년 10월 22일 최종 수정본 채택