

시스템 검증에 의한 조종수학 모형의 평가

이 호 영* · 신 현 경**

(99년 4월 12일 접수)

Estimation of Maneuvering Mathematical Model by System Identification Techniques.

Ho-Young Lee* · Hyun-Kyoung Shin*

Key Words : System Identification(시스템 검증), Hydrodynamic Coefficients(유체력 미계수), Mathematical Model(수학모형), Maneuvering Motion(조종운동), Parallel Processing(병렬처리)

Abstract

The mathematical model used in the simulation of ship's maneuvering contains the hydrodynamic coefficients, which are usually evaluated based on PMM model tests in the towing tank and used to predict ship's maneuvering performance when applied to the proto-type ship. The proper mathematical model has to be developed to predict ship's maneuvering motions with hydrodynamic coefficients very well. The mathematical model for PMM model tests is analyzed with identification program and the hydrodynamic coefficients and maneuvering motions by system identification are compared with those obtained directly from PMM model tests and sea trial. The mathematical model for PMM model tests was established and the magnitudes of ship's maneuvering coefficients were determined. When the identified values of coefficients were used to simulate the maneuvers, a very good agreement was obtained between the numerically simulated motion responses and those obtained from PMM model tests.

1. 서 론

선박은 조류, 바람, 파도, 천수 등의 환경에서도 임무 수행을 하기 위해 안전하게 운행되어야 한다. 선박의 조종성은 타 작동에 대해 빠른 시간

안에 짧은 거리에서 선회하고, 가능한 한 타를 작게 작동하여 직진할 수 있는 능력을 의미한다. 특히 LPG, VLCC와 같은 특수한 임무를 수행하는 선박에 대해 선박의 좌초나 충돌로부터 야기되는 생명, 재산 및 환경 등에 끼치는 광범위한 손해를

* 정회원, 울산대학교 공과대학 수송시스템공학부

** 중신회원, 울산대학교 공과대학 수송시스템공학부

고려하면, 악조건 속에서 조종성의 확보는 필수적이다. 이런 이유로 IMO는 안전을 위해 선박에 요구되는 최소의 조종성을 규제하고 있다.

설계자는 선박의 운항 중 조종성능을 초기 설계 단계에서 정확하게 추정하기를 원한다¹⁾. 추정을 위해, 먼저 조종운동 시 선박에 작용하는 힘과 운동을 계산하는 모사를 수행한다. 운동방정식의 검증과 유체력 미계수의 산정은 모사의 정확도를 결정하는데 매우 중요하다. 실선의 조종성능을 평가하기 위해 유체력 미계수를 구속모형시험에 의해 산정하고, 운동방정식을 사용하여 조종운동을 모사한다.

이 논문은 저자가 개발한 구속모형 시험²⁾에 의한 수학모형을 검증하기 위해, 구속 모형 시험에서 구한 유체력 미계수를 사용하여 조종 운동을 모사하고, 그 결과로부터 시스템 검증 기법을 사용하여 유체력 미계수를 다시 계산한 후, 조종운동 모사를 수행하였다.

시스템 검증을 통한 모사 결과를 구속모형 시험에서 얻어진 미계수를 사용한 모사 결과와 시운전 해석결과를 비교하여 수학 모형의 유효성을 검토하였다. 또한 대상선박은 구속모형시험과 시운전 결과가 있는 정유운반선을 선택하고, 유체력 미계수는 유사선인 원유운반선의 값을 초기치로 택하여 계산하였다. 이와 같은 작업의 목적은 구속모형 시험에 기초한 수학모형을 검증하고, 또 자유항주 모형 시험에 대한 수학모형을 확증하고 척도효과를 고려하기 위한 예비단계로 모사를 수행하는데 있다.

2. 운동방정식

조종운동 좌표계는 Abkowitz³⁾, Rhee⁴⁾와 동일하게 하였고, 운동방정식은 증운동, 횡운동과 선운동에 대한 3자유도 운동에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{2} \rho L^3\right](m' - X'_{\dot{u}})\dot{u} &= f_1 \\ f_4 \dot{v} &= \left[\frac{\rho}{2} L^5\right](I'_z - N'_v)f_2 - \left[\frac{\rho}{2} L^4\right](m'x'_G - Y'_v)f_3(1) \\ f_4 \dot{r} &= \left[\frac{\rho}{2} L^3\right](m' - Y'_v)f_3 - \left[\frac{\rho}{2} L^4\right](m'x'_G - N'_v)f_2 \end{aligned}$$

(1)식에서 f_1, f_2, f_3, f_4 은 유체력 미계수와 외력을 포함하는 항이고, [2]에 사용한 수학모형에 따르면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_1 &= \eta_1 \left[\frac{\rho}{2} L^2\right]u^2 + \eta_2 \left[\frac{\rho}{2} L^3\right]nu + \eta_3 \left[\frac{\rho}{2} L^4\right]n^2 - \\ &C_{Rl} \left[\frac{\rho}{2} S u^2\right] + X'_{vv} \left[\frac{\rho}{2} L^2\right]v^2 + X'_{\delta\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U^2\right]\delta^2 \\ &+ (X'_{rr} + m'x'_G) \left[\frac{\rho}{2} L^4\right]r^2 + (X'_{vr} + m') \left[\frac{\rho}{2} L^3\right]vr \\ f_2 &= Y'_{\dot{u}} \left[\frac{1}{2} L^2 U^2\right] + Y'_{\dot{v}} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U\right]v + Y'_{\dot{\delta}} \left[\frac{1}{2} L^2 U^2\right]\delta \\ &+ (Y'_{rr} - m'r') \left[\frac{\rho}{2} L^3 U\right]r + Y'_{rv} \left[\frac{\rho}{2} L^4 U^{-1}\right]r^2 v + \\ &Y'_{\delta\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U^2\right]\delta^3 + Y'_{v\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U^{-1}\right]v^3 + \\ &Y'_{r\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^5 U^{-1}\right]r^3 + Y'_{v\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U^{-1}\right]v^2 r + \\ &Y'_{r\eta} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U^2\right](1 - \eta) + Y'_{\delta\eta} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U^2\right](1 - \eta)\delta \\ f_3 &= N'_{\dot{u}} \left[\frac{1}{2} L^3 U^2\right] + N'_{\dot{v}} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U\right]v + N'_{\dot{\delta}} \left[\frac{1}{2} L^3 U^2\right]\delta \\ &+ (N'_{rr} - m'x'_G) \left[\frac{\rho}{2} L^4 U\right]r + N'_{rv} \left[\frac{\rho}{2} L^5 U^{-1}\right]r^2 v \\ &+ N'_{\delta\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U^2\right]\delta^3 + N'_{v\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U^{-1}\right]v^3 + \\ &N'_{r\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^6 U^{-1}\right]r^3 + N'_{vr\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^4 U^{-1}\right]v^2 r \\ &+ N'_{r\eta} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U^2\right](1 - \eta) + N'_{\delta\eta} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U^2\right](1 - \eta)\delta \\ f_4 &= (m' - Y'_{\dot{v}}) \left[\frac{\rho}{2} L^3\right](I'_z - N'_v) \left[\frac{\rho}{2} L^5\right] - \\ &(m'x'_G - N'_v) \left[\frac{\rho}{2} L^4\right](m'x'_G - Y'_{\dot{v}}) \left[\frac{\rho}{2} L^4\right] \quad (2) \\ U &= \sqrt{u^2 + v^2} \\ \eta &= \frac{U}{u} \end{aligned}$$

3. Extended Kalman Filtering 기법

시스템 검증 기법을 사용할 때는 상태변수(u,v,r)의 추정된 값을 측정된 값과 비교하고, 그 값의 차이를 오차로 정의한다. 검증될 유체력 미계수의 오차함수를 최소화시키고, 오차함수를 줄이는 일련의 과정에 의해 유체력 미계수와 상태변수를 시간 진행시킨다. 유체력 미계수가 어느 정도 시간이 진행되면 시간에 대해 상수이어야 하나, 추정된 미계수는 표류하거나 상쇄되는 성질을 가지고 있다[3,4]. 시스템 검증 기법에 대하여 간단히 소개하면 다음과 같다.

1 단계

$$\dot{x} = f(x, t) + w$$

$$z = Hx + v$$

H ; 단위행렬

w ; process noise

v ; measurement noise

2 단계

$$\dot{x} = f(x, t)$$

$$z_m = Hx$$

3 단계

$$\dot{E} = FE + EF^T + Q$$

$$F = \frac{\partial f(x, t)}{\partial x}$$

Q ; process noise covariance

4 단계

E^-, x^- : 2, 3단계에서 \dot{x}, \dot{E} 의 시간 적분

5 단계

$$K = E^- H^T (H E^- H^T + R)^{-1}$$

R ; measurement noise covariance

K ; Kalman filter gain matrix

6 단계

$$x' = x^- + K(z_n - z_m)$$

7 단계

$$E' = E^- - K H E^- = (I - K H) E^-$$

8 단계

$$x(t_n) = x'(t_n)$$

$$E(t_n) = E'(t_n)$$

여기에서, 단계 1은 구속 모형시험에서 구한 유체력 미계수를 사용하여 모사 프로그램에서 데이터와 잡음을 생성한다. 단계 2에서 8은 검증 순서를 소개하고 있고, 정해진 시간까지 2단계에서 8단계까지 검증순서를 반복시킨다.

4. 해석 및 검토

이 논문은 자유항주 모형시험에 대한 수학모형을 정립하기 위해, 구속 모형시험의 유체력 미계수 결과를 토대로 시험에서 포함되는 백색잡음을 포함

하여, 선박 조종운동을 모사하여 도출된 상태변수에 대해 시스템 검증을 수행하였다.

계산에 사용된 선박은 Table 1에 제시되어 있고, 정유운반선은 시스템 검증될 선박으로 채택하고 원유운반선은 유사선 개념⁵⁾으로 유체력 미계수의 초기치를 주기 위해 선택하였다.

Table 1 Principal characteristics of ship

Hull	Product Carrier	Tanker
L/B	5.19	5.5
B/T	3.09	3.13
L/T	16.03	17.2

식(1)에서 검증되는 유체력 미계수의 수가 35개이므로, 3개의 상태변수(u,v,r)에 의해 35개의 미지수가 결정된다. 이 같은 상황에서 유체력 미계수는 입력변수의 부족에 의해 해가 정답에서 벗어나는 표류현상과 최적의 해를 주기 위해 서로서로 상쇄되는 상쇄효과를 경험하게 된다³⁾. 이런 표류효과와 상쇄효과를 완전히 제거하는 것은 어려운 것으로 알려져 있고³⁾, 일부분 없애기 위해 병렬처리 기법을 사용하여 시스템 검증을 실시하였다. 병렬처리 기법은 35개의 유체력 미계수를 속도 u, v, r에 의해 결정해야 되는데, 하나의 조종시운전에 의해 미계수를 결정하자면 미지수가 너무 많기 때문에 해가 부정의 형태를 취하게 된다. 이를 보완하기 위해 두 개의 조종시운전의 결과(u₁, v₁, r₁, u₂, v₂, r₂)를 입력하게 되면 시간에 따른 해의 수렴성을 향상시킬 수 있다. 이 논문에서 병렬처리 기법은 35° 선회시험과 10°/10° 지그재그 시험을 선택하였다.

Fig.1은 병렬처리 기법을 사용하여 선형 유체력 미계수에 대해 시스템 검증을 실시한 결과를 보여 주고 있다. Y'_v, Y'_r은 표류효과는 보이지 않고, 검증오차는 2%, 7%로 검증되며, N'_v, N'_r는 시간이 지남에 따라 약간 표류하는 것을 볼 수 있으나, 오차는 10% 이내에서 검증된다.

Fig.2는 35° 선회시험에서 u, v, r 및 선회궤적을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Kalman filtering에 의해 u, v, r의 잡음이 제거되고, 구속모형 시험에 기초한 모사 결과와 시스템 검증의 결과가 거의 일치하고 있다.

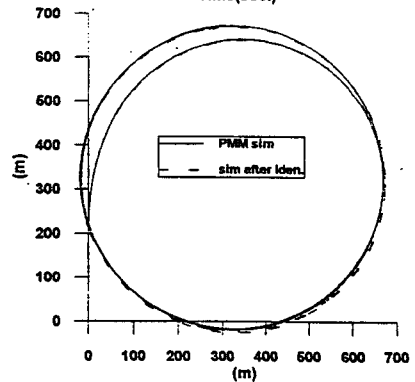
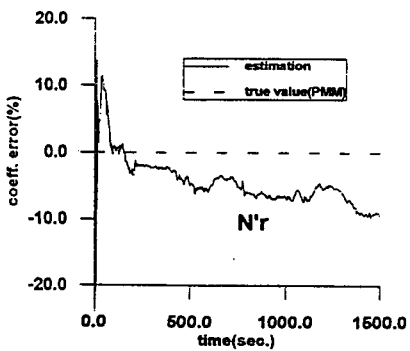
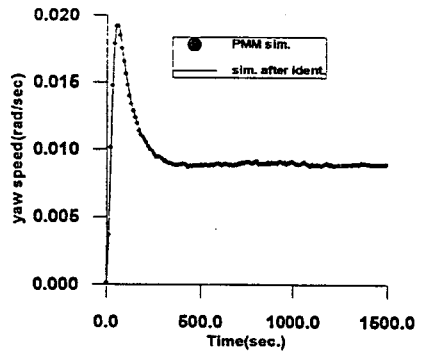
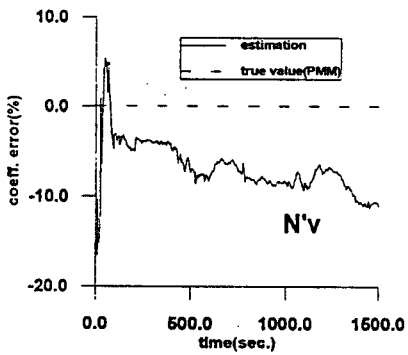
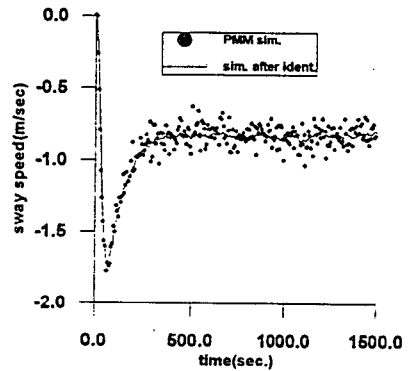
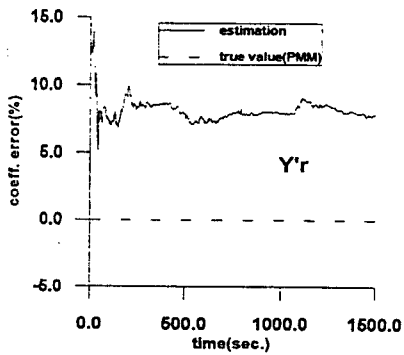
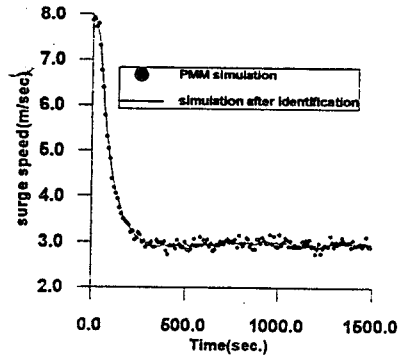
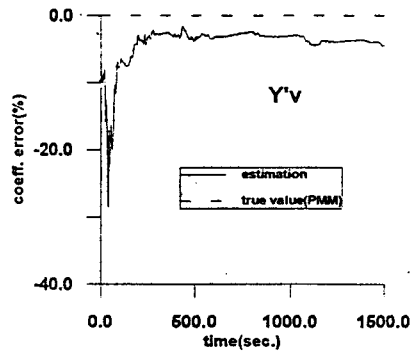


Fig. 1 Results of identification

Fig. 2 35° turning maneuver

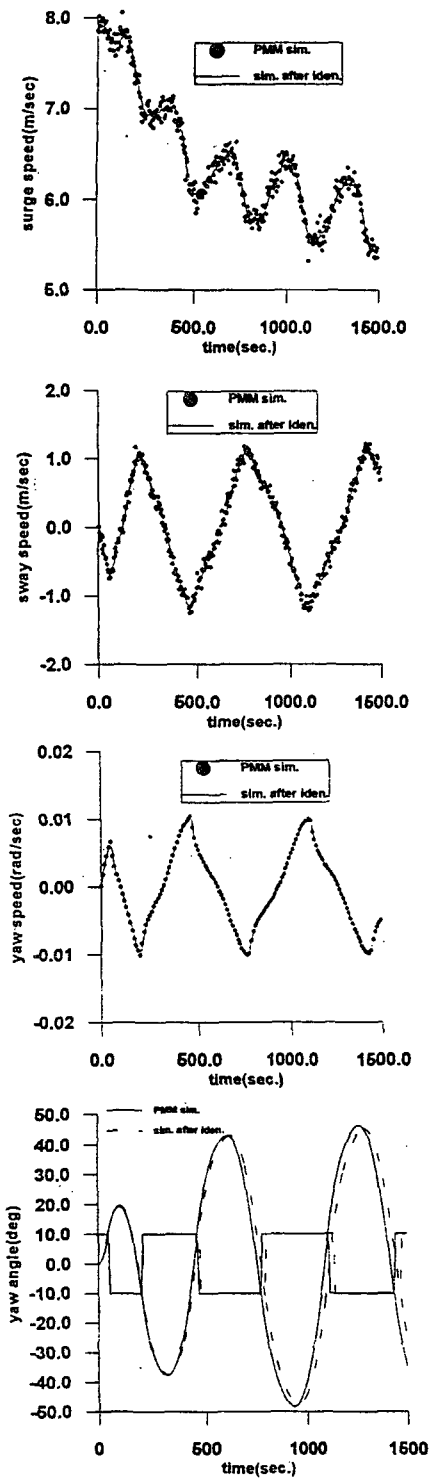


Fig. 3 10°/10° zig/zag maneuver

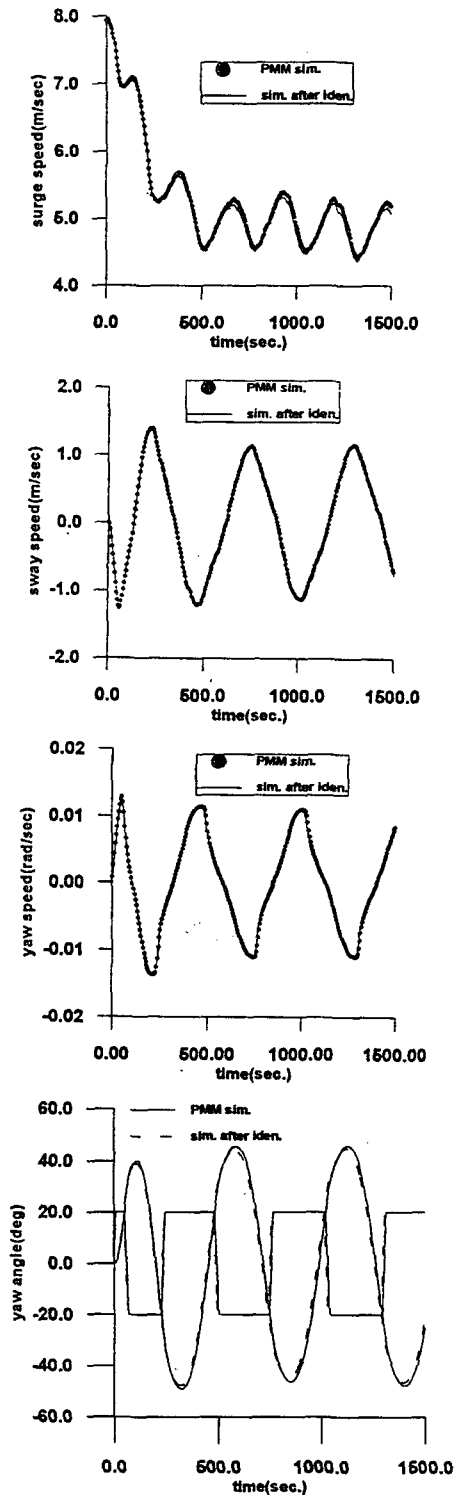


Fig. 4 20°/20° zig/zag maneuver

Fig.3 ~ Fig.4는 10°/10° 지그재그 시험과 20°/20° 지그재그 시험에서 얻은 u, v, r 및 오우버슈트각을 보여주고 있다. 그림으로부터 u, v, r과 오우버슈트각은 구속모형 시험에 의한 결과와 시스템 검증에 의한 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 위에서 알 수 있듯이 비선형 유체력 미계수의 상쇄효과와 표류현상이 어느 정도 있다고 하더라도 모사 결과에 별로 영향을 주지 않는다.

Table 2는 구속모형 시험에 대한 모사 결과, 시스템 검증에서 얻은 결과 및 시운전 결과를 비교하고 있다. 구속모형 시험결과와 시스템 검증 결과는 거의 일치하고 있고, 선회시험에서 시스템 검증 및 구속모형 시험 결과가 시운전 결과와 약간의 차이를 보이고 있다. 그 이유는 실선시운전에서 자이로(gyro)를 사용하여 선박의 표류각(drift angle)을 포함한 선수각을 측정하기 때문에 선속 벡타가 실제보다 선회중심의 안쪽 방향으로 향하기 때문에 실제 선회 궤적보다 작게 측정된다.

Table 2 Comparison of simulation results

Test		PMM	System Ident.	Sea Trial
Turing Test	Advance (m)	626.	626.	552.3
	Tactical Dia.(m)	653.	653.	593.3
10/10 zig zag	1st O.A (deg)	9.15	9.49	7.0
	2nd O.A (deg)	27.6	27.4	25.0
20/20 zig zag	1st O.A (deg)	20.2	19.5	16.0

5. 결 론

이 논문은 구속 모형시험으로부터 도출된 유체력 미계수를 사용하고 백색 잡음을 포함하여 상태변수를 모사하고, 그 결과로부터 시스템 검증 기법을 이용하여 유체력 미계수와 상태변수를 다시 구

하였다. 그리고 그 결과를 사용하여 수학모형에 대한 검토를 하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구속모형 시험에 의한 수학모형(Abkowitz type)에 대하여 성공적으로 시스템 검증을 실시하였다.
- 2) 유체력 미계수에 대한 초기치를 유사선의 값으로 선택하여, 초기치를 보다 효과적으로 선택하였다.
- 3) 표류효과와 상쇄효과를 줄이기 위하여 병렬처리 기법을 사용하였으나, 비선형 유체력 미계수에 대한 상쇄나 표류 효과를 완전히 제거할 수 없었다.
- 4) 앞으로 척도 효과를 고려한 자유항주 시험에 대한 수학모형을 정립하는 과제가 남아 있다.

참고문헌

- 1) Lee, Ho-Young and Sang-Sung Shin, "The Prediction of Ship's Manoeuvring Performance in Initial Design Stage", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.1, No.1, 1998
- 2) 이호영 외, "PMM 모형시험에 의한 조종성능 추정 -수학모델에 따른 비교연구", 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 2호 1997
- 3) Abkowitz, Martin A., "Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials by System Identification", SNAME Transaction, Vol.88, 1980
- 4) Lee, Kurn Chul, Jin Ki Kim and Key-Pyo Rhee, "Estimation of Hydrodynamic Derivatives by Parallell Processing of Second Order Filter", Journal of Hydrospace Technology, Vol.1, No.1, 1995
- 5) 이호영, 신상성, "선박조종 성능의 근사적 추정에 대한 연구", 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 4호, 1998