

論 文

大韓造船學會誌
第21卷 第4號 1984年 12月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 21, No. 4, Dec. 1984

시스템 검증법에 의한 操縱性能 解析

姜 昌 求*·徐 祥 玄*·金 在 信**

Maneuverability Analysis of a Ship by System Identification Technique

by

Chang-Gu Kang*·Sang-Hyun Suh*·Jae-Shin Kim**

Abstract

When the hydrodynamic coefficients of the ship maneuvering equation are estimated by captive model test, it is difficult to take account of the scale effect between model and full scale ship. This scale effect problem can be overcome by processing the sea trial data with system identification. Extended Kalman filter is used as a system identification technique for the modification of the simulation equation as well as the estimation of hydrodynamic coefficients.

The phenomena of simultaneous drifting of linear coefficients occur. It is confirmed that two coefficients in each pair- $(Y_v', Y_r' - m'u')$, (N_v', N_r') -are simultaneously drifting and all 4 coefficients are simultaneously drifting together. Particularly simultaneous drifting of 2 coefficients in each pair is more significant. It is also shown that the simultaneous drifting of 4 coefficients can be reduced by choosing the input data which have the random v'/r' curve and 4 coefficients are estimated within 2~4% error, which may be noise level. So, it is recommended to operate the rudder randomly in sea trial or model test for the application of system identification technique.

기호 (Nomenclature)

| | |
|------------|---|
| A_R | Rudder area |
| A_P | Area of the portion of rudder that is in the slip stream |
| C_R | Resistance coefficient |
| c | Mean velocity over the rudder |
| c_c | Mean velocity over the rudder of equilibrium propeller loading at forward speed u |
| ϵ | Effective rudder angle |
| f | State function |

| | |
|----------|---|
| G | Center of gravity |
| H | Measurement Matrix |
| h | Measurement function |
| k | Ratio of u_A to $u_{A\sim}$ |
| L | Characteristic length, length between perpendicular in this study |
| m | Mass of ship |
| N | Hydrodynamic moment in z -direction or Gaussian distributed random variable |
| N_0 | Asymmetrical yaw moment due to a single propeller |
| n, n_p | Propeller rotating speed |

接受日字：1984年 5月 24日，再接受日字：1984年 9月 19日。

* 正會員，韓國機械研究所 大德船舶分所

** 正會員，現代重工業(株) 船舶海洋研究所

| | |
|--------------------------------|---|
| O | Origin of the coordinate system |
| P | Error covariance matrix |
| Q | Covariance matrix of process noise |
| R | Covariance of measurement noise |
| r | Yaw speed |
| S | Wetted surface area |
| t | Time or thrust deduction factor |
| U | Resultant ship speed |
| u_0 | Surge speed at equilibrium state |
| u | Surge speed |
| u | Exogenous input matrix |
| u_A | Propeller induced velocity |
| $u_{A\infty}$ | Propeller induced velocity far down stream |
| u_c | Current speed |
| v | Sway speed |
| ν | Measurement noise |
| w | Wake fraction |
| w | Process noise |
| X | Hydrodynamic force in x -direction |
| x | Cartesian coordinate fixed on ship |
| z | State variable |
| x_e | Cartesian coordinate fixed on earth |
| x_G | Position of the center of gravity |
| Y | Hydrodynamic force in y -direction |
| Y_0 | Asymmetrical sway force due to single propeller |
| y | Cartesian coordinate fixed on ship |
| y_e | Cartesian coordinate fixed on earth |
| z | Cartesian coordinate fixed on ship |
| z_e | Cartesian coordinate fixed on earth |
| z | Measurements |
| α | Current direction |
| α | Unknown parameter to be estimated |
| δ | Rudder angle |
| δ_z | Residuals |
| $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ | Coefficients in the empirical expression of effective thrust behind propeller |
| ρ | Water density |
| Σ | Covariance matrix |
| Φ | Transition matrix |
| Ψ | Error covariance of the initial guess $z(0)$ |
| ψ | Heading angle |
| Mathematical Symbol | |
| \pm | plus or minus |

| | |
|--------------------|--|
| ∂ | partial differential |
| \equiv | identical with or defined as |
| Superscript | |
| $'$ | indicates nondimensionalized quantities |
| \wedge | indicates optimal quantities |
| $^\circ$ | degree |
| \cdot | $\frac{\partial}{\partial t}$ |
| $-$ | mean value |
| \sim | indicates estimation error |
| Subscript | |
| r | indicates speed relative to water |
| $-$ | represents matrix |
| 0 | represents the equilibrium state, unless specified otherwise |

1. 서 언

최근 선박의 안전운항이 절실히 요구됨에 따라 조종성능의 정확한 추정이 필요하게 되었다. 이러한 요구에 따라 선박조종성에 관한 많은 연구가 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 수행되고 있다.

최근들어 모형시험시에 고려하기 힘든 척도효과 (scale effect) 문제의 해결과 조종운동방정식의 수정보완을 위해서 시스템 검증법(system identification)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

시스템 검증법의 사용목적은 실선의 유체동력학적 계수를 구하고 이를 이용한 선박의 조종성능평가, 선원훈련용 시뮬레이터제작, 자동조종장치 및 항해장치의 설계, 모형선—실선의 척도효과 및 상관관계의 연구등 그 이용 가능성이 다양하다. 시스템검증법이란 선박조종시험에서 측정된 자료로부터 시뮬레이션 모형을 결정하는 해석기법을 말한다. 즉, 어떤 시스템에 주어진 입력에 대한 시스템의 출력으로부터 시뮬레이션 모형을 검증하는 것이다. 선박조종문제에 적용된 시스템 검증법에는 방정식 오차법(equation error method) [1] [2], 위상면 해석법(phase plane analysis) [3], 최대공산법(maximum likelihood method) [4], extended Kalman filter [5], 등이 있다. 이상과 같은 여러가지 연구에서 선박조종시스템이 입출력 관계의 전자에서 검증 가능하다는 것을 보여왔다.

그리나, 유체동력학적 계수를 추정할 때는 계수들간의 동시편류(simultaneous drift) 현상의 발생으로 만족스러운 결과를 얻지 못했다.

본 연구에서는 상태변수와 함께 미지의 유체동력학적 계수를 추정할 수 있는 extended Kalman filter를 사용하여 선박조종문제를 해석하고, 이때 발생하는 동시 편류현상을 제거하기 위한 방법의 가능성과 특성을 논한다.

본 보의 내용은 참고문헌[6]에 자세히 기술되어 있다.

2. 수학모형

어떤 시스템(system)에 시스템 검증법(system identification)을 적용하기 위해서는 그 시스템에 대한 动特性(dynamics)이 수학적으로 표시되어야 한다. 본 연구에서는 1980년에 Abkowitz가 발표한 모형[5]을 사용하며, 이 모형은 Abkowitz에 의해서 1969년에 발표된 수학모형[7]을 물리적인 현상 및 실선시험 결과를 처리하여 수정한 것이다.

선박조종론에서는 유체력계산이 편리한 선체고정좌표계를 사용한다. 일반적인 선박은 종방향 중심면에 대해서 기하학적으로 대칭이다. 이 성질을 이용하기 위하여 대칭면과 교환되지 않은 자유표면의 교차선을 x 축으로 선택하여 선수방향을 양(+)으로 취한다. 우현방향을 양(+)으로 취하여 자유표면상에서 x 축과 직각을 이루는 축을 y 축으로 택한다. 이에 따라 주로 기하학적인 형상에 따라 결정되는 유체력의 계산은 편리해지지만, 좌표계의 원점은 무게중심과 일치하지 않는 것이 보통이다.

일반적으로 배의 운동은 6자유도 운동이지만 본 연구에서는 주로 저속상선을 다루고자 하기 때문에 수평면내의 3자유도(surge, sway, yaw) 운동만을 취급하기로 한다. 이와같은 운동을 표시하기 위한 좌표계는 Fig. 1에 보여지고 있다.

위에서 언급한 것등에 의해서 다음과 같은 가정을

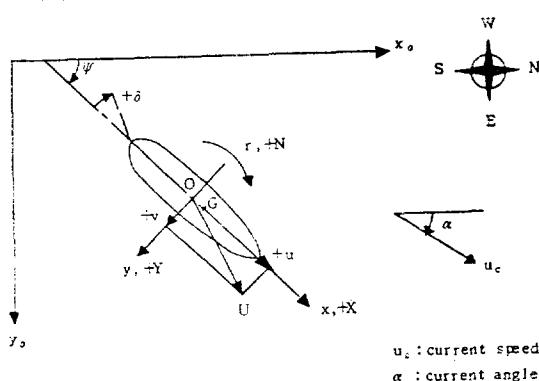


Fig. 1 Coordinate system and sign conventions

Table 1 Mathematical Model for Ship Maneuvering Simulation (ref. Abkowitz [5])

$$\dot{u} = u_r - u_c \cdot r \cdot \sin(\psi - \alpha)$$

$$\dot{u}_r = \frac{f_1}{m - X_{u_r}}$$

$$\dot{v} = v_r - u_c \cdot r \cdot \cos(\psi - \alpha)$$

$$\dot{v}_r = \frac{1}{f_4} [(I_z - N_r) f_2 - (m x_G - Y_r) f_3]$$

$$\dot{r} = \frac{1}{f_4} [(m - Y_{r_r}) f_3 - (m x_G - N_r) f_2]$$

where

$$f_1 = \eta_1' \left[\frac{\rho}{2} L^2 \right] u_r^2 + \eta_2' \left[\frac{\rho}{2} L^3 \right] n u_r + \eta_3' \left[\frac{\rho}{2} L^4 \right] n^2$$

$$- C_R' \left[\frac{\rho}{2} S u_r^2 \right] + X'_{u_r} \left[\frac{\rho}{2} L^2 \right] v_r^2 + X'_{v_r} \left[\frac{\rho}{2} L^2 c^2 \right] e^2$$

$$+ (X'_{v_r} + m' x'_G) \left[\frac{\rho}{2} L^4 \right] r^2 + (X_{e_r} + m') \left[\frac{\rho}{2} L^3 \right] v_r r$$

$$+ X'_{v_r} \left[\frac{\rho}{2} L^4 U^{-2} \right] v_r^2 r^2$$

$$e = \text{effective rudder angle} = \delta \frac{v}{c} + \frac{rL}{2c}$$

c = weighted average flow speed over rudder

$$= \sqrt{\frac{A_p}{A_R} [(1-w) u_r + k u_{A_m}]^2 + \frac{A_R - A_p}{A_R} (1-w)^2 u_r^2}$$

$$U_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2}$$

$$f_2 = Y'_0 \left[\frac{\rho}{2} L^2 \left(\frac{u_{A_m}}{2} \right)^2 \right] + \left\{ Y'_{v_r} \left[\frac{\rho}{2} L^2 U_r \right] v_r \right.$$

$$+ Y'_{\delta} (c - c_0) \frac{\rho}{2} L^2 v_r \right\}$$

$$+ \left\{ (Y'_r - m' x'_G) \left[\frac{\rho}{2} L^3 U_r \right] r - \frac{Y'_{\delta}}{2} (c - c_0) \frac{\rho}{2} L^3 r \right\}$$

$$+ Y'_{\delta} \left[\frac{\rho}{2} L^2 c^2 \right] \delta + \overline{Y'_{r_v}} \left[\frac{\rho}{2} L^4 U_r^{-1} \right] r^2 v_r$$

$$+ Y'_{e^2} \left[\frac{\rho}{2} L^2 c^2 \right] e^2$$

$$f_3 = N'_0 \left[\frac{\rho}{2} L^3 \left(\frac{u_{A_m}}{2} \right)^2 \right] + \left\{ N'_{v_r} \left[\frac{\rho}{2} L^3 U_r \right] v_r \right.$$

$$- N'_\delta (c - c_0) \frac{\rho}{2} L^3 v_r \right\} + (N'_r - m' x'_G u'_r) \left[\frac{\rho}{2} L^4 U_r \right] r$$

$$+ \frac{1}{2} N'_\delta (c - c_0) \frac{\rho}{2} L^4 r \right\} + N'_\delta \left[\frac{\rho}{2} L^3 c^2 \right] \delta$$

$$+ \overline{N'_{r_v}} \left[\frac{\rho}{2} L^5 U_r^{-1} \right] r^2 v_r + N'_{e^2} \left[\frac{\rho}{2} L^3 c^2 \right] e^2$$

$$f_4 = (m' - Y'_{r_r}) \left[\frac{\rho}{2} L^3 (I_z - N'_r) \right] \left[\frac{\rho}{2} L^5 \right]$$

$$- (m' x'_G - N'_{r_r}) \left[\frac{\rho}{2} L^4 \right] (m' x'_G - Y'_{r_r}) \left[\frac{\rho}{2} L^4 \right]$$

$$u_r = u - u_c \cos(\psi - \alpha)$$

$$v_r = v + u_c \sin(\psi - \alpha)$$

한다.

1. 선박은 낮은 Froude 수에서 운항한다.
 2. 안벽의 영향이 있는 유한수심(open finite depth)은 고려하지만 안벽이 있는 제한수로는 취급하지 않는다.
 3. 해류(current)의 변화가 거의 없다.
 4. 이력효과(memory effect)는 무시된다.
 5. 횡동요(roll), 상하동요(heave), 종동요(pitch)가 적고, 침하(squat)도 크지 않아서 이들의 영향이 무시된다.
 6. 가속도($\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{r}$)는 유체력에 선형적으로만 관계된다.
- 이상의 가정에 따른 Abkowitz의 수학모형은 Table 1에 보여지고 있다.

3. 선박조종문제의 시스템검증

하나의 시스템은 총괄적으로 작용하여 입력과 출력을 관계지어주는 성분들로 구성된다. 시스템 이론은 복잡한 시스템의 최적설계 문제를 해결하는데 사용되는 기법의 일종이다. 시스템 이론의 기본문제는 모형화(modeling), 해석(analysis), 추정(estimation), 제어(control) 등으로 분류된다. 시스템 검증은 추정이론의 일부분으로 관측치(observation)를 이용하여 시스템 상태를 추정하는데에 사용될 뿐만 아니라 모형의 불확실한 부분을 완성하는 데에도 사용된다. 시스템이 가지는 구조와 미지의 변수들로 모형화되기 때문에 Schweppe [8]는 시스템 검증이 4 단계를 포함해야 한다고 제시한 바 있다. (Fig. 2)

3-1. 비선형추정(nonlinear estimation)

문제를 단순화하기 위해서 동적시스템(dynamic system)은 시간과 무관(time-invariant)하다고 가정되는데, 이것은 대부분의 공학 시스템에 대한 실용적인 근사라고 할 수 있다.

시스템에 대한 측정들이 직접적으로 상태변수들 u, v, r, ϕ 에 대응한다면 시스템동력학과 추정모형은 다음과 같은 상태공간(state space) 기호로 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{x}(n+1) &= \begin{bmatrix} u(n+1) \\ v(n+1) \\ r(n+1) \\ \Psi(n+1) \end{bmatrix} = f(\underline{x}(n), n_p(n), \delta(n)) \\ &\quad + w(n) \\ z(n) &= H\underline{x}(n) + v(n) \end{aligned} \quad (1)$$

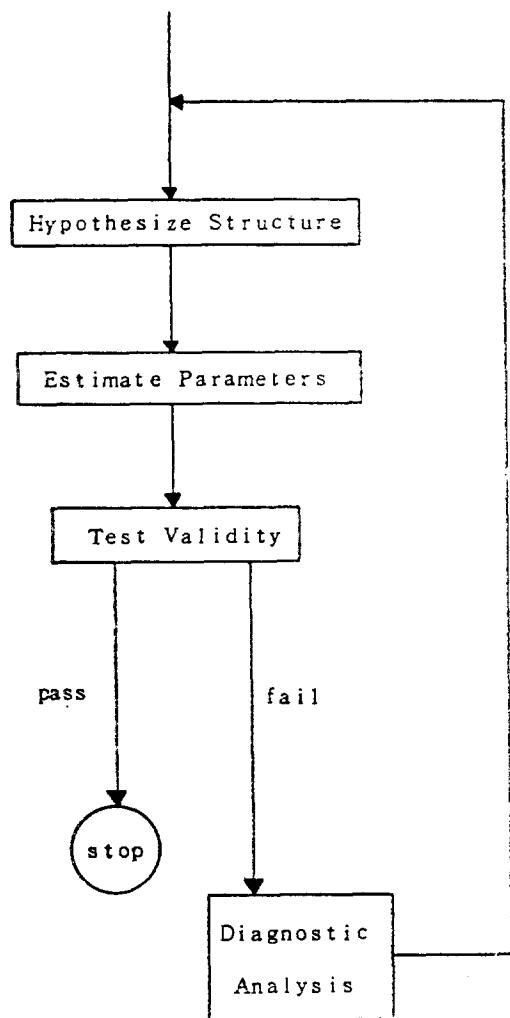


Fig. 2 Procedure of system identification

여기서, H 는 단위행렬이고 n_p 는 프로펠러 회전속도이다. 윗 식은 4차 시스템이다. 그렇지만 미지변수들이 실제 상태벡터에 증가될 때 시스템의 차수는 추정될 미지수의 개수에 따라 달라질 것이다.

$$\begin{aligned} \underline{x}'(n+1) &= \begin{bmatrix} \underline{x}(n+1) \\ \alpha(n+1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f(\underline{x}(n), n_p(n), \delta(n), \alpha(n)) \\ \alpha(n) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} w(n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{z}'(n) = H'\underline{x}'(n) + v(n) \quad (2) \end{aligned}$$

여기서, $H' = [I : 0]$ 이다. H' 가 단위행렬 I 와 영행렬 0 으로 이루어지기 때문에 수치 계산시간이 많이 줄

Table 2 Summary of Continuous (System)-Discrete (Measurement) Extended Kalman Filter

| | | |
|--|---|---|
| System Model | $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) + w(t)$ | $n=1, 2, \dots$ |
| Measurement Model | $z(n) = h(x(t_n), n) + v(n)$ | |
| Initial Conditions | $x(0) \sim N(x(0), P(0))$ | |
| Assumptions | $w(t) \sim N(0, Q(t))$ $v(n) \sim N(0, R(t))$ $E[w(t)v(n)^T] = 0$ $E[w(t)x(t)^T] = 0$ $E[v(n)x^T(t)] = 0$ | white white for all t and all n |
| State Estimate Propagation | $\hat{x}(t) = f(\hat{x}(t), u(t), t)$ | |
| Error Covariance Propagation | $\hat{P}(t) = F(\hat{x}(t), u(t), t)P(t)F(\hat{x}(t), u(t), t) + Q(t)$ | |
| Predicted State | $\hat{x}(n n-1) = \hat{x}(n-1 n-1) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} \dot{\hat{x}}(t) dt$ | |
| Predicted Measurement Residuals | $\hat{z}(n n-1) = h(\hat{x}(n n-1))$ $\hat{\delta}_x(n n-1) = z(n) - \hat{z}(n n-1)$ | |
| Predicted State Covariance | $\hat{P}(n n-1) = P(n-1 n-1) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} \hat{P}(t) dt$ | |
| Predicted measurement Covariance | $\hat{R}(n n-1) = H(n)\hat{P}(n n-1)H^T(n) + R(n)$ | |
| Normalized Predicted Measurement Residuals | $\tilde{\delta}_x(n n-1) = \sqrt{\hat{R}_x(n n-1)}\hat{\delta}_x(n n-1)$ | |
| Updated State Estimate | $\hat{x}(n n) = \hat{x}(n n-1) + K(n)\hat{\delta}_x(n n-1)$ | |
| Updated State Covariance | $P(n n) = [I - K(n)H(n)]\hat{P}(n n-1)[I - K(n)H(n)]^T + K(n)R(n)K^T(n)$ | |
| Gain Matrix | $K(n) = P(n n-1)H^T(n)[H(n)P(n n-1)H^T(n) + R(n)]^{-1}$ | |
| Definitions | $F(\hat{x}(t), t) = \frac{\partial f(x(t), u(t), t)}{\partial x(t)} \Big _{x(t) = \hat{x}(t)}$ $H(\hat{x}(n n-1)) = \frac{\partial h(x(t_n), n)}{\partial x(t_n)} \Big _{x(t_n) = \hat{x}(n n-1)}$ | |
| | $N(m, \sigma^2)$ represents a random vector of normal distribution, with mean m and covariance σ^2 | |

어들 수 있다.

선체운동의 동력학이 비선형일지라도 잡음(noise)은 시스템 동력학 및 측정치와 선형관계라는 가정을 보이는 것이 중요하다. 잡음의 선형성(linearity)은 문제를 단순화하는데 도움이 되지만, 이 가정은 타당성 시험(validity tests)에 의해서 증명되어야 한다.

실제로 측정은 보통 불연속적으로 취해진다. 그래서식(1)의 $z(n)$ 은 이러한 측정에 적절한 표현이다. 그렇지만 시스템동력학의 불연속 시간에 대한 표현은 단지 실제 시스템의 근사표현일 뿐이다. 시스템은 연속이고, 측정이 불연속인 extended Kalman 필터를 Table 2에 요약했다.

3.2. 선형계수의 동시편류 현상

유체동력학적 계수를 추정하기 위해서 앞에서 언급된 확률 모형을 사용할 때 까다롭지만 흥미 있는 현상이 발생한다. Y' , Y'' , N' , N'' 의 값이 어떤 규칙에 따라서 동시에 증가하거나 감소할 수 있으며, 또 타작변화에 대하여 똑같은 선체운동 응답을 준다는 것을 의미한다. 다른 말로 표현하면, 비유일성 혹은 겹증 가능성에 대한 문제가 존재한다. W.Y. Hwang [9]은 이러한 현상의 주원인이 선박조종시의 상쇄효과(cancellation effect)라고 설명하고 있으며, 세장체이론(slender body theory)을 사용하여 선박조종시의 상쇄효과를 설명하였다.

본 보에서는 동시편류현상의 원인을 약간 다른 관점에서 고찰해 보자. Table 1에 있는 선박조종 시뮬레이션에서 보여지고 있는데 여기서 “동시 편류(simultaneous drift)” 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 Y' , Y'' , N' , N'' 의 값이 어떤 규칙에 따라서 동시에 증가하거나 감소할 수 있으며, 또 타작변화에 대하여 똑같은 선체운동 응답을 준다는 것을 의미한다. 다른 말로 표현하면, 비유일성 혹은 겹증 가능성에 대한 문제가 존재한다. W.Y. Hwang [9]은 이러한 현상의 주원인이 선박조종시의 상쇄효과(cancellation effect)라고 설명하고 있으며, 세장체이론(slender body theory)을 사용하여 선박조종시의 상쇄효과를 설명하였다.

본 보에서는 동시편류현상의 원인을 약간 다른 관점에서 고찰해 보자. Table 1에 있는 선박조종 시뮬레이-

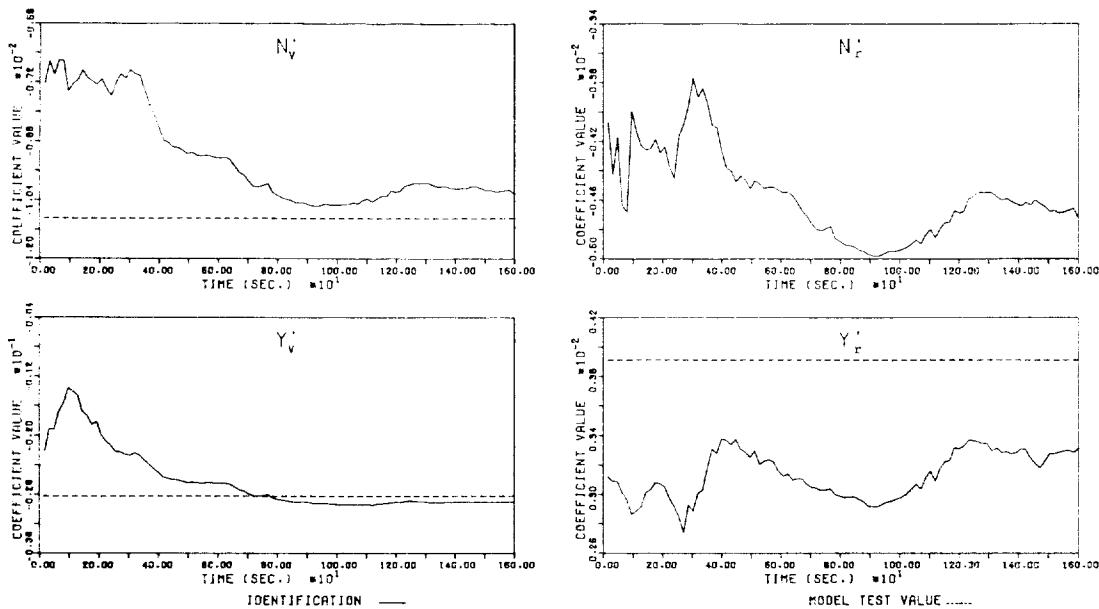


Fig. 3 Results of identification to illustrate the phenomenon of "simultaneous drifting" the estimation of coefficients

선을 위한 수학 모형중에서 가장 중요한 부분에 대해서 고려해 보자. 선박조종시 타각 δ 를 변화시킨후 약간의 시간이 지나면 v, r 등이 거의 사라지게 되어 평형 상태에 도달하게 된다. 즉, 수학모형중에서 관성력등이 사라지고 다음과 같이 무차원화된 선형방정식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} Y'_v v' + (Y'_r - m'u')r' + Y'_\delta \delta' &= 0 \\ N'_v v' + (N'_r - m'x_0'u')r' + N'_\delta \delta' &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)중에서 Y'_δ 와 N'_δ 의 관계는 일반적인 선형에 대해서 다음과 같은 근사식으로 표시될 수 있다.

$$N'_\delta \approx -0.5 Y'_\delta \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 v'/r' 에 대한 간단한 식을 얻을 수 있다.

$$v'/r' = \frac{(Y'_r - m'u') + 2(N'_r - m'x_0'u')}{Y'_v + 2N'_v} \equiv \left(\frac{v'}{r'}\right)^* \quad (5)$$

식(5)를 살펴보면 평형상태에서는 타각 δ 에 관계없이 4개의 선형계수들에 의해서 좌우동요속도와 선수요속도의 비가 결정된다. 그런데, 역으로 $(\frac{v'}{r'})^*$ 를 알게될 때 $Y'_v, N'_v, (Y'_r - m'u'), (N'_r - m'x_0'u')$ 를 구한다면 수많은 조합의 해가 존재할 수 있다는 것을 금방 알수 있다. 즉, 평형상태에서의 v' 와 r' 를 측정한 결과를 이용하여 $Y'_v, N'_v, (Y'_r - m'u'), (N'_r - m'x_0'u')$ 를 추정하면 $(\frac{v'}{r'})^*$ 는 실제 값과 같아지지만 4개의 계

수들은 실제 값과는 상당한 차이를 갖는 값으로 추정될 가능성이 훨씬 많다.

실제로 참고문헌 [6]에서 볼 수 있는 것과 같이 $10^\circ/10^\circ$ Zig-Zag 시험과 $20^\circ/20^\circ$ Zig-Zag 시험과 같은 시험자료들을 대부분의 영역에서 v'/r' 가 거의 일정한 경향을 갖기 때문에 계수들의 동시편류 현상이 두드러질 것으로 예상된다.

3.3. 동시편류현상 제거방법

앞에서 논의되었던 "동시편류"현상을 제거하기 위해서 "병행처리", "과대-과소 초기치 추정", "변수변환" 등이 연구되어 왔다.

두개의 다른 조종에서 같은 계수의 기여가 다른 형태를 브이므로 상쇄효과가 일어나지 않는 짧은 시간 구간을 포함하는 두개의 다른 조종결과 자료를 동시에 처리하는 "병행처리"기법은 동시편류의 발생을 자연시킬 수 있지만 상쇄효과에 의한 근본적인 동시편류현상을 완족할 만큼 방지하지는 못하고 있다.

이론적 근거없이 경험에서부터 출발한 "과대-과소 초기치추정" 기법은 시뮬레이션된 자료와 같이 이미 알려진 시스템의 자료가 처리될 때는 좋은 추정치를 주고 있다.

"동시편류" 현상이 일어났을 때 N'_r 의 분산백분율은 거의 비슷하다. 이러한 선형종속관계를 깨기위해 새로운 매개변수를 도입하여 추정계수를 변환한 "변수

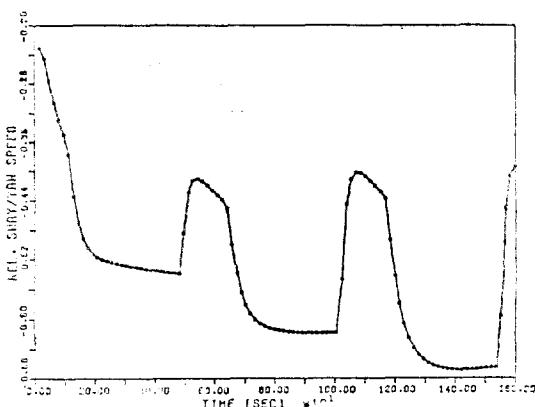


Fig. 4 Postion of the instantaneous pivot point during the biased Zig-Zag maneuver($15^\circ \pm 10^\circ$)

변환” 기법은 동시 편류현상을 제거하는 좀 더 정통적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 이 기법에 대해서도 의문이 제기된 바 있다.

3.2 절에서 언급한 바와 같이 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선이 거의 상수라면 선형계수들 Y'_v , $Y'_r - m'u'$, N'_v , N'_r 에 대한 해가 두수히 많을 것이며, $(\frac{v'}{r'})$ 곡선이 일정한 형태로 반복된다면 계수들의 해는 그 곡선에 맞는 어떤 일정한 방향으로 동시편류하게 될 것이다. 그렇지만 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선이 거의 확률적(random)으로 변한다면 계수들의 해는 유일하게 결정될 수 있을 것이다.

Abkowitz [5]의 토론부(discussion)에서 Byström 이 제시한 PRBS(pseudo-random-binary-sequence) 경우 타의 조작이 너무 잦게 되기 때문에 권장할 것이 못된다. 이것은 타의 조작에 대한 선박의 반응이 느리기 때문에 타의 조작은 확률적(random)일지라도 선박의 반응인 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선이 확률적(random)으로 되질 않기 때문이다. 그래서 타의 조작보다는 선박의 반응인 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선의 변화가 확률적(random)인 것과 가까울수록 검증 가능성이 높아진다. 예를 들어 Fig. 4와 같은 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선을 갖는 면심 Zig-Zag 결과를 입력자료로 사용하면 검증 가능성이 높아질 것이다.

4. 계산결과 및 고찰

Extended Kalman 필터에 의한 상태변수 및 미지의 유체동력학적 계수의 추정성능을 확인하기 위하여 이미 알고 있는 유체동력학적 계수들을 사용하여 잡음이 포함된 시뮬레이션을 수행함으로써 입력자료를 만든다. 이렇게 얻어진 입력자료에 extended Kalman필터를

적용하여 추정된 계수들을 참값과 비교한다.

4.1. 검증이 쉬운 계수들

검증되어야 할 유체동력학적 계수 중에서 선형계수들 Y'_v , Y'_r , N'_v , N'_r 및 비선형계수들과 같이 상쇄효과나 보완효과 등에 의해서 검증이 까다로운 계수들은 다음 절에서 검토하기로 하고, N'_δ , $m' + X'_{vr}$, u_c , a 등에 대해서 먼저 고찰해 보자.

Table 1의 운동방정식 중에서 $(m' + X'_{vr})v'r'$ 항은 원심력으로서 전진방향의 속도손실에 큰 영향을 미치는 항이다.

Extended Kalman 필터에 의해서 $m' + X'_{vr}'$ 를 추정할 때 Fig. 5c에서 보는바와 같이 대체로 2% 정도의 오차내에서 추정이 가능하다.

Table 1의 운동방정식을 단순화하기 위하여 Y'_δ 는 N'_δ 에, Y'_{eee} 는 N'_{eee} 에, Y'_0 는 N'_0 에 각각 종속되는 것으로 한다. Ogawa [10]은 N'_δ / Y'_δ 의 크기가 0.5보다 약간 크다는 것을 밝혔지만, Y'_δ 가 선체운동에 미치는 영향이 적으므로 실용적인 면에서 다음과 같은 근사식을 사용할 수 있다.

$$Y'_\delta = -2N'_\delta \quad (6)$$

위와 같은 관계는 Y'_{eee} , Y'_0 에도 똑같이 적용될 수 있다.

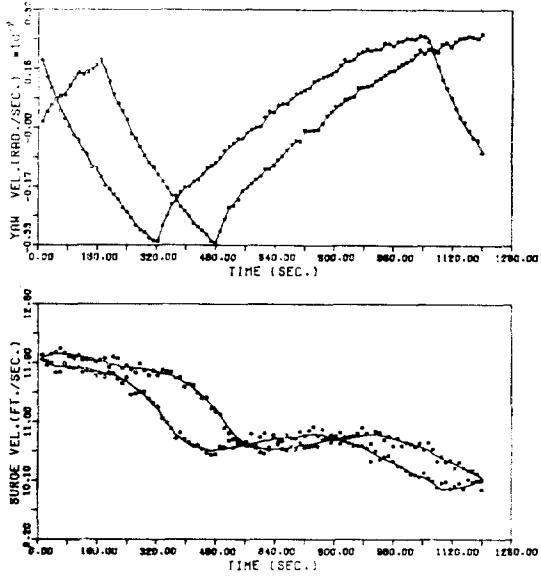
계수 N'_δ 의 추정결과는 상당히 만족스럽다 N'_δ 는 수렴이 매우 빠르고, 추정결과의 최대오차는 2% 미만이며 대체로 1%의 오차를 보이고 있다.

해류방향 α 와 크기 u_c 의 추정은 매우 정확한 편이다. 해류방향 α 의 경우 추정오차가 1%내외인데 이 값은 1°보다 적은 오차를 나타낸다. 해류크기 u_c 의 추정오차는 3~4% 정도인데 이것은 0.05 ft/sec의 오차를 나타내므로 배의 속도에 거의 영향을 주지 않는다. 또, 시스템검증시에 해류방향 α 와 크기 u_c 는 상당히 빨리 수렴한다. 그러나, 실제의 해류는 같은 시간에 측정된 것일지라도 지형적 위치와 수심에 따라 변하기 때문에 실선자료에 대한 추정정도를 떨어뜨리기 쉽다. 그래서 시험자료중에서 해류가 근본적으로 일정할때의 시험자료 부분만을 사용하면 추정이 성공적일 것이다.

4.2. 병행처리 결과

$10^\circ/10^\circ$ Zig-Zag, $20^\circ/20^\circ$ Zig-Zag, 정상선회시험등과 같이 정상상태가 오래 지속되는 조종시험자료를 처리하던 3.2.절에서 언급한 바와 같이 Y'_v , N'_v , $(Y'_r - m'u')$, N'_r 의 어떤 조합이 식(5)를 만족하는 범위내에서 서로 동시에 변할 수 있다. 이러한 것이 동시편류의 기구(mechanism)이다. 이와 같이 정상상태에 도달하는 시간을 지연시키기 위해서 2개의 자료를 정상

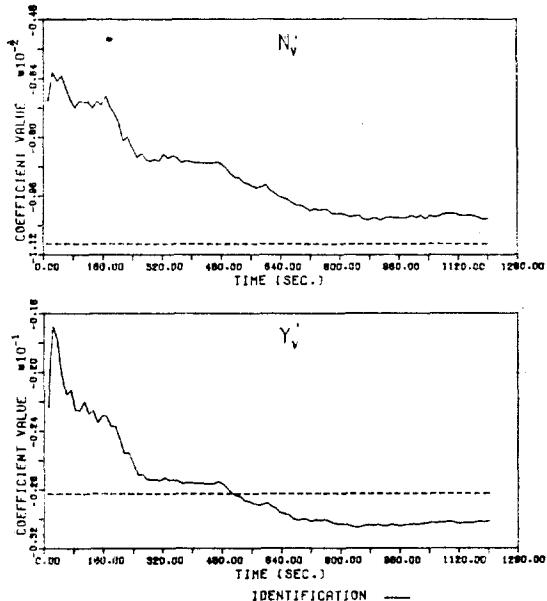
상태가 아닌 부분이 겹치지 않게 배열하는 것이 병행 처리의 기본 개념이다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 시뮬레이션된 $10^\circ/10^\circ$ Zig-Zag 자료를 병행 처리해도 동시편류현상은 방지되지 않는다.



FILTERED STATE —

MEASUREMENT

Fig. 5. a Results of parallelly processing two identical files that have a phase shift-the filtering of state measurements



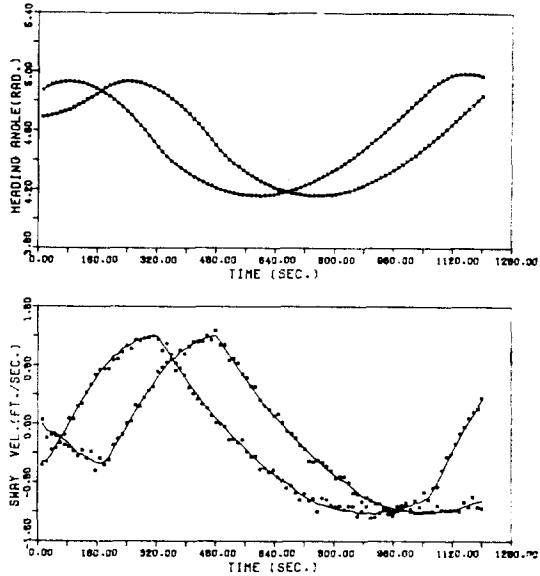
IDENTIFICATION —

MODEL TEST VALUE

Fig. 5. b Results of parallelly processing two identical files that have a phase shift-the estimation of coefficients

4.3. 확률적 입력선택 결과

3.2. 절에서 언급한 바와 같이 $\left(\frac{v'}{r}\right)$ 곡선에 정상상태가 많이 포함되어 있는 조종자료를 EKF에 통과시키면 동시편류현상이 발생할 가능성이 커진다. $10^\circ/10^\circ$



MEASUREMENT

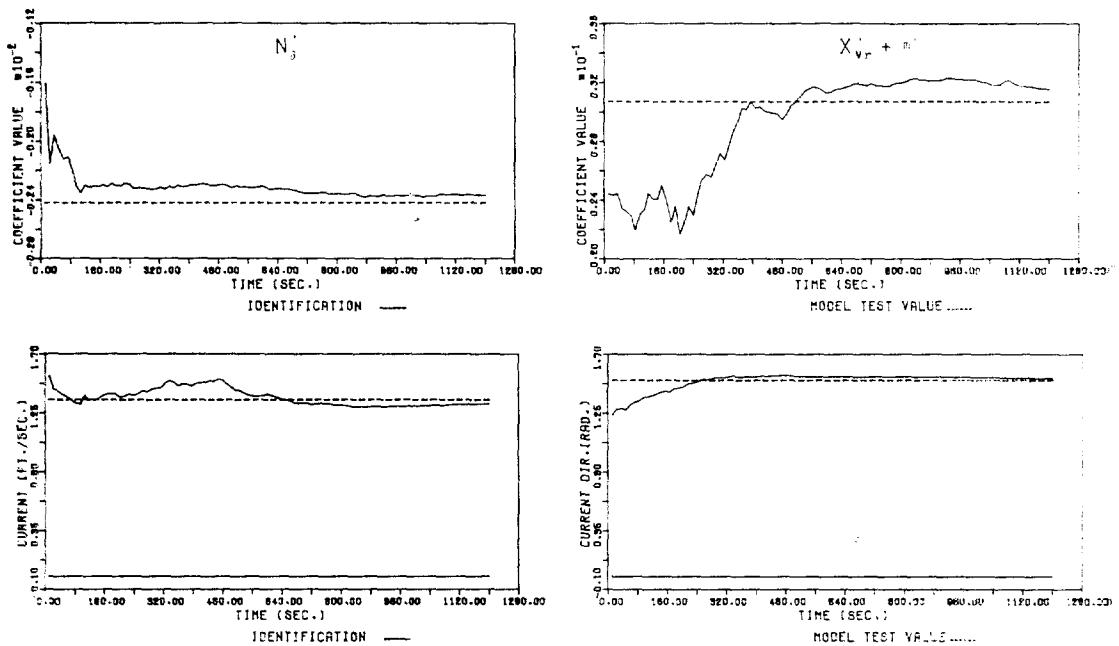


Fig. 5.c Results of parallelly processing two identical files that have a phase shift-the estimation of coefficients and current

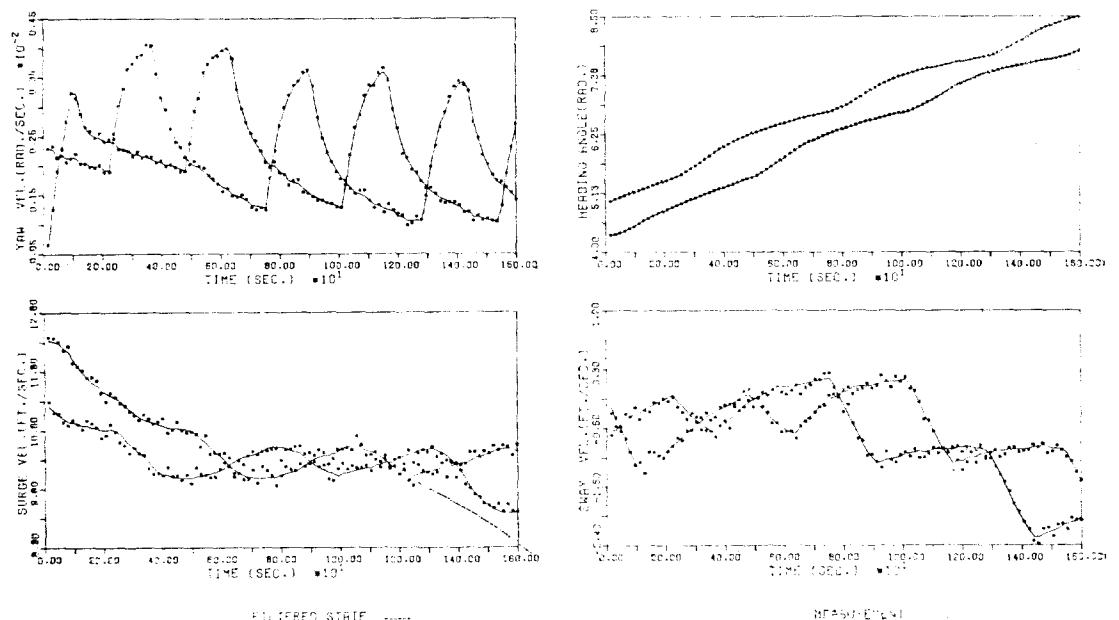


Fig. 6.a Results of parallelly processing two identical biased Zig-Zag data files that have a phase shift-the filtering of state measurements

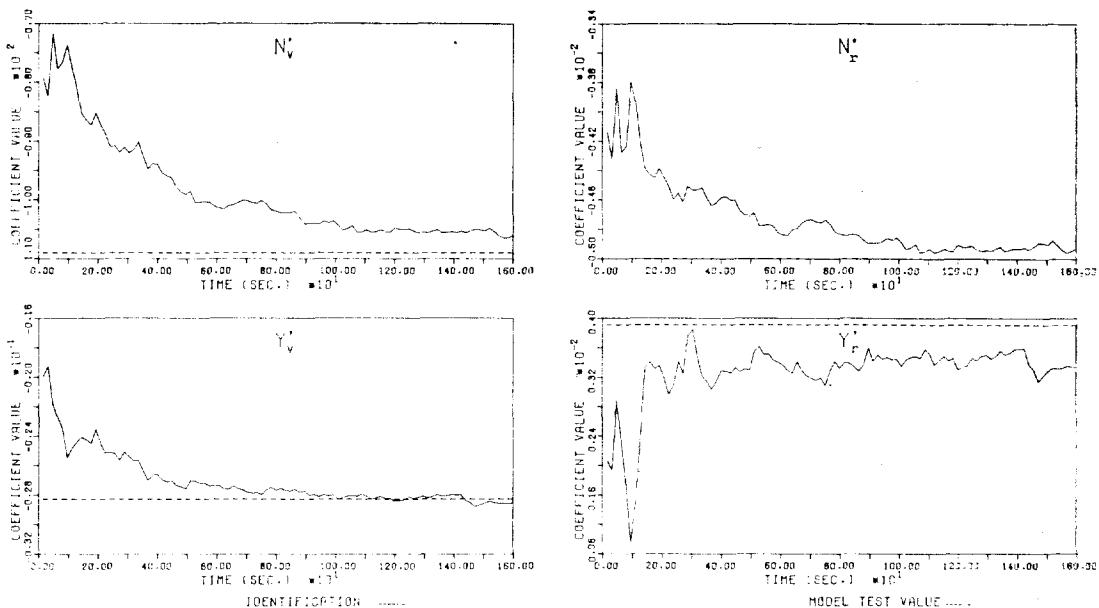


Fig. 6. b Results of identification

Zig-Zag자료와 같이 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선에 정상상태가 많은 자료에 여러가지 기법과 함께 EKF를 적용했음에도 불구하고 동시편류현상을 막을 수는 없었다.

본 절에서는 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선에 정상상태가 적은 자료를 택하여 EKF에 적용하고자 한다. 먼저 비선형 계수를 추정하기 위해서 시뮬레이션된 편심 Zig-Zag($15^\circ \pm 10^\circ$) 자료에 관해서 검토해 보자.

Fig. 4에서 본 바와 같이 편심 Zig-Zag($15^\circ \pm 10^\circ$)의 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선은 시간축에 거의 평행인 부분이 $1/2$ 정도 밖에 안된다. 즉, 편심 Zig-Zag($15^\circ \pm 10^\circ$)의 결과를 EKF의 입력자료로 사용한다면 선형계수들의 동시편류현상이 거의 없을 것으로 예상할 수 있다. Zig-Zag($15^\circ \pm 10^\circ$) 시험결과처럼 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선이 시간축에 평행한 부분이 $1/2$ 정도 되는 자료에 병행처리기법을 적용하면 좋은 효과를 얻을 것이다. $(\frac{v'}{r'})$ 곡선에서 시간축에 거의 평행한 부분과 평행하지 않은 부분이 같은 구간내에서 잘 겹치도록 2개의 자료를 만든 후에 병행처리한 결과가 Fig. 6에 보여지고 있다. 이 그림을 보면 병행처리의 유용성을 알 수 있다. 각 계수들은 상당히 빨리 수렴할 뿐만 아니라 거의 일정한 값에서 벗어나지 않는다. 즉, 상당히 좋은 안정성을 가지며, 추정치의 오차는 $(Y'_r, -m'u')$ 의 4.02%를 제외하고는 2%内外에 안된다. 특히, N'_v 와 N'_r 같은 잘못된 초기추

정치를 사용했음도 불구하고 잘 추정되는 것은 아주 고무적인 것이다. 이러한 사실은 미지의 계수들을 추정할 때 초기 추정치에 거의 영향을 받지 않으므로 EKF의 신뢰도를 상당히 향상시킬 수 있다.

5. 결 议

앞에서의 계산결과 및 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 선박조종문제에 시스템검증법을 적용할 때 유체동력학적 계수들의 동시편류현상이 나타나지만 Fig. 4와 같이 $(\frac{v'}{r'})$ 곡선에서 정상상태가 적은 자료를 입력자료로 선택하면 이를 방지 할 수 있다.

- SAEKF에 의해서 계수를 추정할 때 병행처리법을 함께 사용하면 계수추정결과에 안정성을 주지만, 원래의 입력자료가 내포하고 있는 특성을 바꾸지는 못한다.

- 시스템 검증시에 나타나는 선형계수들의 동시편류현상에 대한 원인을 규명하였는데, 계수 Y'_v 와 Y'_r , $-m'u'$, N'_v 와 N'_r 끼리만의 동시편류가 아니고 Y'_v , Y'_r , $-m'u'$, N'_v , N'_r , 등 4개의 계수가 동시에 편류하는 것으로 밝혀졌다. 단지 계수 Y'_v 와 Y'_r , $-m'u'$, N'_v 와 N'_r , 각각이 좀 더 강하게 영향을 주고 받는

다.

4. SAEKF는 시뮬레이션된 자료를 처리하는데 있어서 성공적이었다. 이것의 특징인 추정이력이 선박조종의 수학모형을 개선하는데 도움이 된다.

앞으로 고속콘테이너선과 같이 횡요(roll)의 영향을 많이 받는 선형에 이용할 수 있는 시뮬레이션 방정식의 개발과 이에 대한 시스템검증 가능성의 연구가 수행되어야 하며, 또 전진속도, 해류등에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Nomoto, K., "Analysis of Kemf's Standard Manoeuvre Test and Proposed Steering Quality Indices", Proc. 1st Symp. on Ship Maneuverability, 1960 (DTMB 1461)
- [2] Norrbin, N.H., "Zig Zag Test Technique and Analysis with Preliminary Statistical Results", SSPA No. 12 (BSRA Transl. 2188), 1965.
- [3] Bech, M. and Smitt, L.W., "Analogue Simulation of Ship Manoeuvre Based on Full Scale Trials on Free-Sailing Model Tests", Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium Report No. Hy-14, 1969.
- [4] Åström, K.J. Källström, C.G., Norrbin, N.H., and Byström, L., "The Identification of Linear Ship Steering Dynamics Using Maximum Likelihood Parameter Estimation", SSPA Nr. 75, 1975.
- [5] Abkowitz, M.A., "Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials by System Identification", SNAME Trans., Vol. 88, 1980.
- [6] 강창구, 서상현, "시스템검증법에 의한 조종성능 해석 연구", 한국기계연구소 연구보고서 UCN131 C-238.D, 1982.
- [7] Abkowitz, M.A., "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles", The MIT Press, Cambridge, Mass., 1969.
- [8] Scheppele, F.C., "System Identification of Linear Time Invariant Systems", M.I.T. Electric Power Systems Engineering Laboratory Report, September, 1976.
- [9] Hwang, W.Y., "Application of System Identification to Ship Maneuvering", M.I.T. Ph.D. Thesis, Dept. of Ocean Engineering, 1980.
- [10] Ogawa, A. and Kasai, H., "On the Mathematical Model of Maneuvering Motion of Ships", International Shipbuilding Progress, Vol. 25, pp. 306-319, 1978.