

시스템 식별법을 이용한 선박의 횡동요 계수 추정

윤현규^{†*}, 손남선^{*}

한국해양연구원 해양안전방재연구본부^{*}

Estimation of Roll Related Coefficients of a Ship by Using the System Identification Method

H.K. Yoon^{†*} and N.S. Son^{*}

Maritime Safety & Pollution Control Laboratory, KRISO/KORDI^{*}

Abstract

When a fast container ship or a naval vessel is turning, comparable roll motions occur. Therefore, roll effect has to be considered in the horizontal equations of motion of the ship to predict the maneuverability well. In this thesis, a new method to determine a roll model structure and estimate its coefficients by applying the system identification technique to the data of sea trial tests was proposed. The simulation results from the estimated roll model were well consistent with the true one in spite of the difference between the estimated and the true model structures of roll hydrodynamic moment.

※Keywords: Roll(횡동요), Maneuverability(조종성능), Model structure(모델 구조), Hydrodynamic coefficient(동유체력미계수), System identification method(시스템 식별법), Sea trial(실선 시운전)

1. 서론

일반적인 선박이 선회 등의 조종운동을 하는 경우에 횡동요는 크게 일어나지 않으므로, 이 영향을 무시하고 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)만을 고려하여 조종운동을 모사한다. 그러나 고속의 컨테이너선이나 함정이 선회 등의

조종운동을 하는 경우에 타력에 의한 횡동요 모멘트가 무시할 수 없을 정도의 횡동요를 발생시키므로 이러한 선박의 조종운동을 정확하게 모사하기 위해서는 횡동요를 반드시 고려하여야 한다. 또한 근래에 들어서는 파랑중 운항하는 함정의 횡동요 감요장치로서 타의 사용이 증가되는 추세에 있으므로 수평면 운동과 횡동요에 대한 연성 운동 모델이 요구되고 있다(Tzeng et al. 2001).

선박의 조종운동 중 주변 유체에 의하여 작용하는 횡동요 모멘트는 선박의 각 방향 속도와 가속도로 표현할 수 있는 동유체력 성분과 횡동요각으

접수일: 2004년 4월 28일, 승인일: 2004년 5월 21일

† 주저자, E-mail: hkyoon@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7292

로 표현되는 복원력 성분으로 구분하여 표현할 수 있다. 동유체력 성분은 각 운동변수들에 대하여 Taylor 급수 전개를 통하여 3차 다항식으로 표현하거나(Fossen 1994), 좌우동요에 대한 동유체력 모델과 그 작용점으로 표현하는 방법(Kobayashi et al. 1995)이 있다. 각 모델에 포함된 횡동요 계수는 선형수조에서 모형선에 구속 횡동요 운동을 가하여 구하여야 하는데 자유도의 증가에 따라 많은 실험회수가 소요되는 문제가 있다. 또한 실선 시운전 결과를 이용하는 시스템 식별법을 선박 조종 문제에 적용한 예는 대부분 전후동요, 좌우동요, 선수동요의 동유체력미계수를 추정하기 위함이며(Hwang 1980, Rhee/Kim 2000, 윤현규/이기표 2003), 현재까지 선박의 횡동요 계수를 구하기 위하여 실선 시운전 결과에 시스템 식별법을

적용한 예는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 선박의 실선 시운전 결과에 시스템 식별법을 적용하여 횡동요 모델을 구성하고, 모델에 포함된 계수를 추정하는 새로운 방법을 제안하였다.

본 연구에서 사용한 시스템 식별법으로는 동유체력과 계수를 2단계로 구분하여 추정하는 모델링 전 추정기법이다(윤현규/이기표 2003). 횡동요 모델은 순수한 횡동요에 의한 성분, 좌우동요 동유체력에 의한 성분, 타에 의한 성분으로 구분하여 구성한 후 각각에 포함된 횡동요 계수와 작용점을 추정하였다. Fig.1에 도시한 바와 같이 모델링 전 추정기법의 1단계에서 운동변수와 동유체력을 추정하고, 2단계에서 좌우동요 동유체력과 타력을 추정한 후, 마지막으로 횡동요 계수를 추정하였다.

컨테이너 대상 선박(Fossen 1994)에 대한 자료를 이용해서 35° 좌우현 선회시험, 20°-20° 지그재그 시험을 시뮬레이션하고, 그 결과에 정규분포를 갖는 계측잡음을 더한 후 이를 이용해서 추정에 이용하였다. 마지막으로 10°-10° 지그재그 시험에 대하여 추정된 횡동요 모델을 검증하였다.

2. 동유체력 추정

횡동요를 고려한 선박의 4자유도 운동방정식은 식(1)로 기술된다.

$$\begin{aligned}
 (m - X_{\dot{u}})\dot{u} &= m(vr + x_G r^2 - z_G pr) + X \\
 (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} \\
 + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= -mur + Y \quad (1) \\
 -(mz_G + K_{\dot{v}})\dot{v} + (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} \\
 &= mz_G ur + K \\
 (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} \\
 &= -mx_G ur + N
 \end{aligned}$$

여기서, X, Y, K, N 은 전후동요, 좌우동요, 횡동요, 선수동요 방향의 유체력 성분을 의미한다. $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{p}}, Y_{\dot{r}}$ 는 부가질량을 나타내고, $K_{\dot{v}}, K_{\dot{p}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$ 은 부가관성모멘트를 나타낸다. 부가질량 및 부가관성모멘트는 식별할 수 없

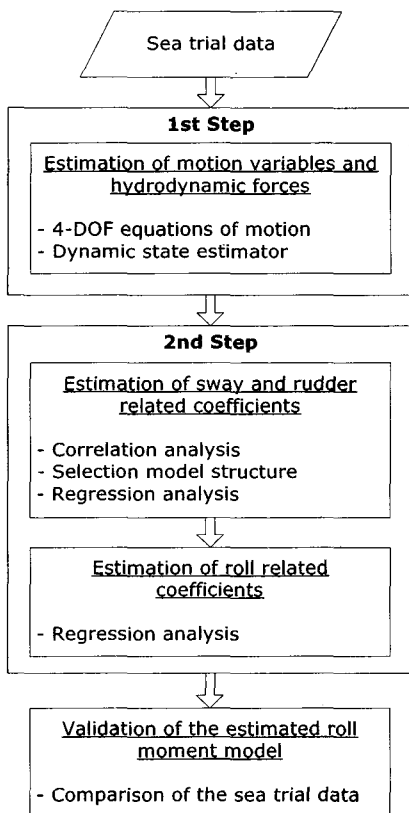


Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm for estimation of roll related coefficients

으므로(김찬기 1996) 선박의 형상이 주어지면 알 수 있는 값이라고 가정하였다. x_G, z_G 는 각각 선박고정좌표계의 원점에 대한 무게중심의 좌표값이다.

선박의 실선 시운전시에 계측값들은 전후동요 대수속도, 횡동요, 선수동요 각속도 및 Euler각, x, y 궤적이라고 가정한다. 계측값들 중에 변위와 각변위들의 동적 모델은 궤적에 대한 좌표 변환식과 Euler각 변환식으로 구성된다. 마지막으로 식(1)에 포함된 유체력의 동적 모델은 3차 Gauss-Markov 프로세스라고 가정한다(윤현규/이기표 2001).

식(1)의 운동방정식, 변위와 각변위에 대한 운동학적 조건식, 유체력에 대한 동적 모델에 의하여 상태방정식을 구성하고, 가정된 계측값들에 대한 측정방정식을 이용하여 상태공간 모델을 정립할 수 있다. 상태공간 모델에 포함된 상태변수 벡터는 식(2)와 같다.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T \quad (2)$$

여기서, $x_1 = [u \ v \ p \ r \ x \ y \ \phi \ \psi]^T$,

$$x_2 = [X \ \dot{X} \ \ddot{X}]^T,$$

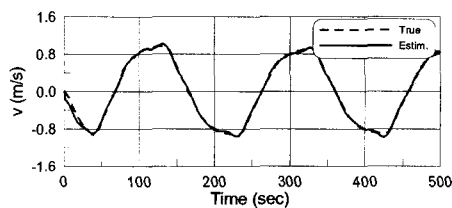
$$x_3 = [Y \ \dot{Y} \ \ddot{Y}]^T,$$

$$x_4 = [K \ \dot{K} \ \ddot{K}]^T,$$

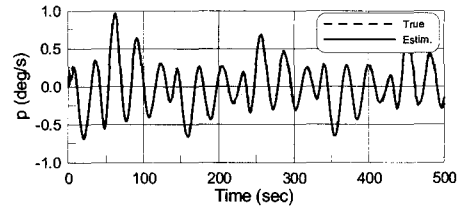
$$x_5 = [N \ \dot{N} \ \ddot{N}]^T,$$

식(2)의 상태변수는 확장 칼만 필터와 고정간격 스무더인 수정 Bryson-Frazier 스무더를 이용하여 추정한다(윤현규/이기표 2001).

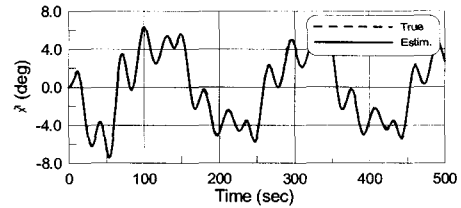
앞서 언급한 대상선박에 대한 시운전 결과를 이용하여 추정된 운동변수와 유체력의 시계열을 참값과 비교하여 각각 Fig.2~3에 도시하였다.



(a) Sway velocity

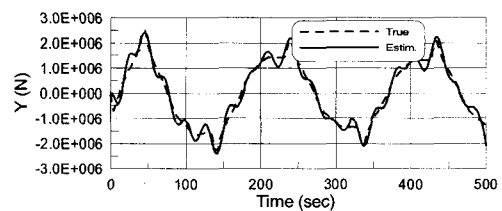


(b) Roll rate

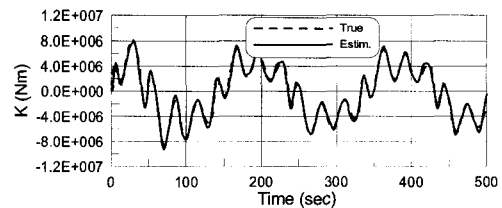


(c) Roll angle

Fig. 2 Estimated motion variables in case of 20°-20° zig-zag test



(a) Y



(b) K

Fig. 3 Estimated external force and moment in case of 20°-20° zig-zag test

Fig.2~3에 의하면 타각이 변경되는 시점에서는 약간의 추정 오차가 발생하지만 계속하지 않는 좌우동요 속도와 유체력 성분도 만족스럽게 추정하는 것을 볼 수 있다.

3. 좌우동요 유체력 모델 추정

선박의 조종 운동시 작용하는 유체력의 시계열을 추정하였으므로, 이를 바탕으로 다른 조종 운동의 모사에도 적용할 수 있는 횡동요 모멘트 모델링과 계수들의 추정이 필요하다.

횡동요 모멘트는 식(3)과 같이 동유체력과 복원력 성분으로 구분하고, 그 중에 동유체력은 순수한 횡동요에 의한 성분과 좌우동요 동유체력에 의한 성분으로 나누어 표현하기로 한다.

$$K = K_{HD} + K_{HS} \tag{3}$$

여기서, $K_{HD} = K_1(\phi, \rho) + K_2(Y)$

$$K_{HS} = \Delta GM \sin \phi$$

식(3)에 나타난 바와 같이 횡동요 모멘트 모델링을 위해서는 좌우동요 동유체력의 모델링이 선행되어야 한다. 이는 평면운동장치 시험 또는 정도 높은 경험식에 의하여 수행될 수도 있지만 본 연구에서는 2장의 1단계에서 추정된 운동변수와 동유체력을 통하여 정립하기로 한다.

좌우동요 동유체력 모델은 타력 표현식을 제외하고는 실선 시운전에 대한 시뮬레이션 결과를 얻을 때와 동일하게 식(4)와 같이 모델링하였다.

$$Y = Y_{uv}uv + Y_vv + Y_{vr}r + Y_{vvv}v^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 + Y_{rrr}r^3 + Y_{\rho\phi} + Y_{\phi\phi} + Y_{vv\phi}v^2\phi + Y_{v\phi\phi}v\phi^2 + Y_{rr\phi}r^2\phi + Y_{r\phi\phi}r\phi^2 + Y_{\delta\delta} + Y_{\delta\delta\delta}\delta^3 \tag{4}$$

식(4)에서 추정하고자 하는 계수는 무차원화된 좌우동요 조종계수이다. 일반적인 선박이 조종운동을 하는 경우 좌우동요 속도와 선수동요 각속도는 거의 선형적인 상관관계가 있으므로(Hwang 1980), 식(4)의 모델을 재정립할 필요가 있다. 이를 위하여 상관관계 해석을 수행하였다. Table 1에 상관관계가 큰 계수들간의 상관관계를 괄호 안에 나타내었다. 상관관계 해석시 사용한 선박의 운동변수는 35° 좌우현 선회시험, 20°-20° 지그재그 시험을 통하여 추정된 결과를 합쳐서 사용하였다.

Table 1 Correlation between typical hydrodynamic coefficients

Coefficient	Correlation
Y_v	$Y_{uv}(0.98), Y_r(0.98)$
Y_{vvv}	$Y_{vvr}(1.00), Y_{vrr}(0.99), Y_{rrr}(0.98)$
$Y_{vv\phi}$	$Y_{rr\phi}(0.97)$
$Y_{v\phi\phi}$	$Y_{r\phi\phi}(0.97)$
Y_{δ}	$Y_{\delta\delta\delta}(0.93)$

Table 2 Estimated sway coefficients

Coeff.	Estimated	Standard error(%)
y'_v	-1.1834E-2	3.39
y'_{vvv}	-2.3217E-1	3.74
Y_{ρ}	-8.6687E-4	9.56
Y_{ϕ}	-6.7372E-3	9.98
$y'_{vv\phi}$	-2.8548E-1	14.68
$y'_{v\phi\phi}$	-1.4042E-1	41.01
y'_{δ}	-2.4710E-3	2.44

Table 1의 상관관계가 의미하는 것은 1열 계수와 2열 계수를 동시에 추정하기는 어렵다는 것이다. 따라서 2열 계수들의 영향은 1열 계수들에 반영되므로 식(4)의 모델을 식(5)와 같이 단순화하여 재정립하기로 한다.

$$Y = y_vv + y_{vvv}v^3 + Y_{\rho}\rho + Y_{\phi}\phi + y_{vv\phi}v^2\phi + y_{v\phi\phi}v\phi^2 + y_{\delta}\delta \tag{5}$$

여기서, 소문자로 표현한 계수들은 Table 1에 나타난 상관관계가 큰 계수들을 대표하는 것이다.

Table 2에 2장에서 추정된 운동변수와 좌우동요 동유체력을 이용하여 회귀분석법으로 추정된 무차원 계수들을 나타내었다. 여기서 힘과 모멘트는 각각 $\rho L^2 U^2 / 2$, $\rho L^3 U^2 / 2$ 로 무차원하였고, ρ , L , U 는 각각 유체 밀도, 선장, 선속이다.

Table 2의 계수들로 표현된 회귀식의 결정계수(coefficient of determination)는 0.960이므로 식

(5)로 가정된 모델 구조와 추정된 계수들은 동유체력을 잘 기술하고 있다. 또한 계수들의 표준 오차도 실제 중요한 의미를 갖는 선형계수들에서 10% 미만이므로, 어느 정도의 외삽에는 충분히 사용할 수 있다고 판단된다.

4. 횡동요 모멘트 모델 추정

선박의 배수량과 \overline{GM} 은 미리 알고 있는 값이라면 2장에서 추정한 식(3)의 횡동요 모멘트 성분 중에 복원력 성분 K_{HS} 는 이론적으로 소거할 수 있다. 좌우동요 유체력에 의한 횡동요 모멘트를 선체와 타에 의한 것으로 구분하면, 횡동요 동유체모멘트를 표현하는 모델을 식(6)과 같이 구성할 수 있다.

$$K_{HD} = K_{\phi}\phi + K_{\rho}\dot{\phi} + z_Y(y_v v + y_{vv}v^3 + Y_{\rho}\dot{\rho} + Y_{\phi}\dot{\phi} + y_{v\phi}v^2\dot{\phi} + y_{v\phi\phi}v\dot{\phi}^2) + z_R y_{\delta}\delta \tag{6}$$

식(6)에서 추정할 계수는 K_{ϕ} , K_{ρ} , z_Y , z_R 이고, Table 3에 회귀분석법에 의하여 추정된 값들을 참값과 비교하여 나타내었다. *는 선박의 반출수를 나타낸다.

Table 3에서 식(6)의 회귀식과 추정계수들에 의한 결정계수는 0.87인데, 그 원인은 좌우동요 유체력도 추정식을 사용함에 따라 오차가 누적된 데 기인한다. 계수들을 살펴보면 K'_{ϕ} , K'_{ρ} 는 비교적 참값의 경향과 비슷하고, z_Y 는 반출수 보다는 클 것이므로 어느 정도 합리적인 값을 주고 있다고 판단된다. 타력 작용점 거리인 z_R 의 추정값

Table 3 Estimated roll coefficients

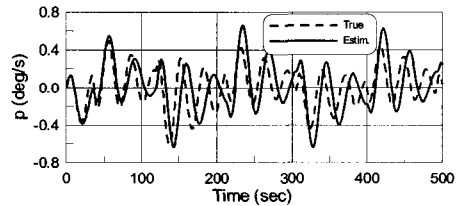
Coeff.	Estimated	Standard error (%)	True
K'_{ϕ}	-5.7492E-6	92.99	-2.1000E-5
K'_{ρ}	-2.1850E-5	6.12	-7.5000E-6
z_Y	-2.1052	1.12	-4.2500*
z_R	-6.4521	0.91	-5.7750

과 참값 간의 오차가 생긴 이유는, 시운전 자료를 얻기 위한 모델에서는 MMG(Kobayashi et al. 1995)에서 제안한 타력 모델을 사용한 반면 본 연구에서는 식(6)과 같이 고려하였기 때문이다.

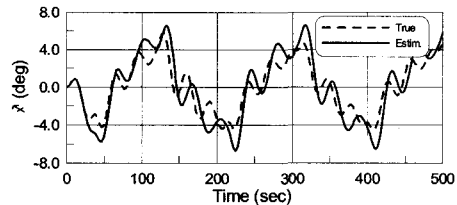
5. 횡동요 모멘트 모델 검증

2~4장의 동유체력 및 계수 추정에 사용하지 않은 10°-10° 지그재그 시험에 대하여 본 연구에서 제안한 식(6)의 횡동요 모델의 타당성을 검증하였다. 이 때 전후동요, 좌우동요, 선수동요 동유체력 모델은 동일한 모델을 사용하였다.

Fig.4~5에 각각 횡동요 운동변수, 횡동요 모멘트의 시뮬레이션 결과를 참값과 비교하여 도시하였다. 타각 변경 시간 지연 때문에 약간의 위상차



(a) Roll rate



(b) Roll angle

Fig. 4 Simulated roll variables in case of 10°-10° zig-zag test

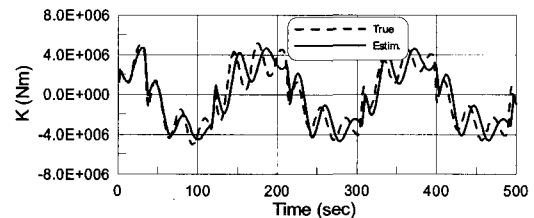


Fig. 5 Simulated roll moment in case of 10°-10° zig-zag test

가 발생하였다. 추정 모델에 의한 시뮬레이션 결과가 참값 보다 약간 크지만 전반적으로 참값을 잘 모사하고 있다고 생각한다.

6. 결 론

횡동요가 크게 발생하는 선박의 조종운동을 정확하게 모사하기 위해서는 횡동요를 고려한 4자유도 운동방정식을 적용하여야 한다. 횡동요 운동방정식에 포함된 계수를 모형시험을 통하여 구하는 데는 많은 시간과 횡동요 발생장치 등이 추가로 필요하므로 본 연구에서는 실선 시운전 시뮬레이션 결과에 시스템 식별법을 적용하여 횡동요 모멘트 구조와 계수 추정 방법을 제안하였다. 새로운 모델이 실제모델과는 구조상으로 차이가 있기 때문에 계수들 자체에는 소폭 오차가 발생하였지만 추정치 사용하지 않은 조종운동 시나리오도 잘 모사하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 횡동요를 고려한 autopilot의 설계나 타를 이용한 횡동요 저감 제어기의 설계 등에 모델로 사용할 수 있을 것이라고 기대한다.

후 기

본 논문은 과학기술부 인군경용기술개발사업 “파랑중 수상선의 자세제어장비 기술개발” 과제와 기본연구사업 “해양위해도 통합관리시스템 기반기술 개발(III)” 과제에서 지원하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김찬기, 1996, 계수식별법에 의한 물수체의 조종계수 추정, 공학박사학위 논문, 서울대학교 조선해양공학과
- 윤현규, 이기표, 2001, “모델링 전 추정기법을 이용한 조종시운전시의 외력 및 조류 변수 추정,” 대한조선학회 논문집, 제 31권, 제 4호, pp. 26-31.
- 윤현규, 이기표, 2003, “선박 조종미계수 식별 시 모델링 전 추정기법과 확장 Kalman 필터에 의한 계수추정법의 비교에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 5호, pp. 43-52.
- Rhee, K.P. and Kim, K.H., 2000, “A new sea trial method for estimating hydrodynamic derivatives,” SOTECH, Vol.3, No.3, pp. 25-45
- Fossen, T.I., 1994, “Guidance and Control of Ocean Vehicles,” John Wiley & Sons.
- Hwang, W., 1980, Application of System Identification to Ship Maneuvering, Ph.D Thesis, MIT.
- Kobayashi, E., Kagemoto and H., Furukawa, Y., 1995, “Research on ship manoeuvrability and its application to ship design, chapter 2,” The 12th Marine Dynamic Symposium, pp. 23-90.
- Tzeng, C.Y., Wu, C.Y., and Chu, Y.L., 2001, “A Sensitivity Function Approach to the Design of Rudder Roll Stabilization Controller,” J.of Marine Science and Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 100-112.



< 윤 현 규 >



< 손 남 선 >