

모델링 전 추정기법을 이용한 조종시운전시의 외력 및 조류 변수 추정

윤현규*, 이기표**

Estimation of External Forces and Current Variables in Sea Trial by Using the Estimation-Before-Modeling Method

H.K. Yoon* and K.P. Rhee**

요 약

조류를 고려한 조종운동방정식을 정립한 후 선박의 운동변수 뿐만 아니라 외력 및 조류의 방향과 속도도 상태변수로 설정하여 비선형 상태방정식과 측정방정식으로 표현하였다. 여기서 외력은 3차의 Gauss-Markov 프로세스로 표시하고, 조류의 방향과 속도는 일정하다고 가정하였다. 상태 추정을 위하여 확장 Kalman-Bucy 필터와 고정간격 스무더를 이용하였다. 기존의 Hwang은 실선 시운전 계측값을 이용하여 동유체력미계수 및 조류의 영향을 동시에 확장 Kalman 필터를 이용하여 추정하였으므로 매개변수의 개수가 상당히 많아지는 반면 모델링 전 추정기법을 사용하면 각각의 동유체력미계수를 추정하는 대신에 3방향의 외력과 조류 변수만을 추정한다. 측정값이 포함된 시뮬레이션 측정값을 적용하여 조류 변수를 추정하는 경우 실제값이 잘 추정되는 것을 확인하였다.

Keywords: 조류(Current), 확장 Kalman-Bucy 필터(Extended Kalman-Bucy filter), 고정간격 스무더(Fixed-interval smoother), 모델링 전 추정기법(Estimation-before-modeling method)

Abstract

The current is considered in the conventional manoeuvring equation. This equation is represented as the nonlinear state and measurement equations in which external forces and the direction and the velocity of current are augmented as state variables. The external forces are modeled as the third-order Gauss-

접수일자: 2001년 7월 29일, 승인일자: 2001년 10월 25일

*정회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사과정(E-mail: hyeonkyoon@hanmail.net)

**정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: kprhee@snu.ac.kr)

Markov processes and the direction and the velocity of current are assumed to be constant. The augmented state variables are estimated with extended Kalman-Bucy filter and the fixed-interval smoother. While Hwang estimated motion state variables, hydrodynamic coefficients and the current variables simultaneously by using extended Kalman filter, external forces of surge, sway and yaw and the direction and the velocity of current are the only parameters to be estimated in the estimation-before-modeling method. The current variables are satisfactorily estimated in simulation process where the measurement noise is present.

1. 서론

선박의 조종시운전 결과로부터 동유체력미계수를 추정하기 위한 연구는 모형시험에서의 척도 효과를 제거할 수 있다는 장점 때문에 많은 사람들에 의하여 수행된 바 있다(김찬기 1996, Rhee/Kim 2000). 이 때 시운전 해역에서의 조류, 파도, 바람 등의 외란 성분 때문에 계측된 결과에는 잡음이 섞이게 된다(강창구 1994). 정확한 동유체력미계수의 추정을 위해서는 이러한 잡음 성분을 제거한 데이터를 적용하여 추정하거나(이혁 1999), 외란에 대해서도 같이 모델링을 수행한 후 외란과 함께 계수 추정을 하기도 한다(Hwang 1980).

조류의 방향과 속도를 추정하기 위한 기존의 방법에서는 동유체력미계수 뿐만 아니라 조류 변수도 매개변수로 설정한 후 동시에 확장 Kalman 필터를 적용하여 추정하였다(강창구 등 1984). 그러나 이 때 추정하고자 하는 매개변수가 너무 많아지게 되어 추정정도가 떨어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 조류 변수와 3방향의 외력을 매개변수로 택하여 외력 모델링 전에 상태추정기법을 적용하여 추정하므로 추정 매개변수의 개수를 기존의 방법에 비해 상당히 줄일 수 있다. 따라서 상태변수의 추정정도를 높일 수 있다.

모델링 전 추정기법은 Sri-Jayantha/Stengel (1987)에 의하여 비행체의 비선형 공력계수를 구하기 위하여 적용된 방법인데, 이를 조류와 같은 외란이 있는 해역에서 운항하는 선박에 대한 경우로 확장하였다. 모델링 전 추정기법은 1단계에 외력을 3차의 Gauss-Markov 프로세스로 가정하

여 확장 Kalman-Bucy 필터와 고정간격 스무더를 이용하여 선박의 운동변수와 함께 추정한 후, 2단계에 회귀분석법 등을 적용하여 동유체력미계수를 구하는 방법이다. 본 논문에서는 1단계에 조류의 영향을 추가하여 외력과 함께 추정하는 방법에 대해서만 기술하기로 한다.

본 논문에서 제시한 추정방법의 성능 검증을 위하여 정규백색잡음을 포함한 시운전 결과를 시뮬레이션하여 측정값을 작성한 후 계산을 수행하였다.

2. 조종운동방정식

2.1 좌표계

Fig.1에 선체고정좌표계, 지구고정좌표계와 조류의 방향과 속도에 대한 정의를 도시하였다. 선체고정좌표계는 선박 중앙횡단면에 원점이 놓이고 선수방향과 연직하방이 각각 양의 x_s, z_s 축으로 하는 직각우수좌표계이고, 지구고정좌표계는 진북, 연직하방을 각각 x, z 로 하는 직각우수좌표계이다. 선수각과 조류의 방향은 진북축을 기준으로 계측된다.

2.2 조류 영향

조류 영향은 시운전 동안 조류의 방향과 속도는 일정하다는 가정에 따라 상대속도의 개념으로 운동방정식에 포함하자. 이 때 대수속도 및 가속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u_r &= u - u_c \cos(\phi - \alpha) \\
 v_r &= v + u_c \sin(\phi - \alpha) \\
 \dot{u}_r &= \dot{u} + u_c r \sin(\phi - \alpha) \\
 \dot{v}_r &= \dot{v} + \dot{u}_c r \cos(\phi - \alpha)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

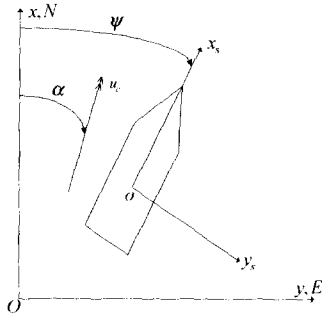


Fig.1 Coordinates systems

2.3 조류를 고려한 조종운동방정식

조류는 Fig.1과 같이 정의되는데, 가정에 따라 조류의 방향과 속도는 일정하므로 조류와 함께 등속으로 움직이는 좌표계도 관성좌표계로 간주할 수 있다. 따라서 조류를 고려하지 않은 관성좌표계와 고려하는 경우의 관성좌표계에 대한 운동방정식의 관성력 성분은 같게 표현된다.

대수속도 및 가속도로 운동방정식을 표현하면 전후동요, 수평동요 및 선수동요에 대하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u}_r - v_r r - x_G r^2) &= X \\
 m(\dot{v}_r + u_r r + x_G \dot{r}) &= Y \\
 I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v}_r + u_r r) &= N
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서 X, Y, N은 조종운동시에 작용하는 동유체력, 추력 및 타력을 모두 포함한 외력이다.

3. 상태변수 추정

식(2)에서 표현한 운동방정식의 외력 및 조류

변수를 기존의 상태추정자를 통하여 추정하기 위하여 상태변수로 정의하고, 상태 및 측정방정식 형태로 다시 표현하자. 여기서 운동방정식의 외력 성분인 X, Y, N은 3차의 Gauss-Markov 프로세스라고 가정하면 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d^3 X}{dt^3} &= w_X(t) \\
 \frac{d^3 Y}{dt^3} &= w_Y(t) \\
 \frac{d^3 N}{dt^3} &= w_N(t)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 $w_X(t), w_Y(t), w_N(t)$ 는 정규백색잡음 프로세스이다.

3.1 상태변수

상태변수는 선박의 운동변수, 외력의 시간미분값 및 조류의 속도 및 방향으로 구성되는 17×1 벡터이다.

$$\mathbf{x} = [u_r, v_r, r, x, y, \phi, X, \dot{X}, \ddot{X}, Y, \dot{Y}, \ddot{Y}, N, \dot{N}, \ddot{N}, u_c, a]^T
 \tag{4}$$

여기서 x, y 는 조류와 함께 움직이는 좌표계에 대한 좌표값이 아니라 지구고정좌표계에 대한 좌표값을 의미한다.

3.2 상태방정식과 측정방정식

앞서 정의한 상태변수, 운동방정식, 외력의 모델링 및 조류에 대한 가정에 따라 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{w}(t)
 \tag{5}$$

여기서 M 은 선박의 부가질량을 포함한 관성행렬이고 $\underline{w}(t)$ 는 프로세스 잡음이다. 부가질량은 이미 알고 있는 값이고, 프로세스 잡음은 $N(0, Q(t))$ 라고 가정하자.

선박의 조종시운전시 x, y 좌표, 선수동요각 및 선수동요 각속도, 선수와 선미에서의 전후동요 및 수평동요 대수속도 성분을 추정할 수 있다고 가정하면 추정방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{z}(n) = \underline{h}(\underline{x}(n)) + \underline{v}(n) \quad (6)$$

여기서, $\underline{h}(\underline{x}(n)) = [u_r, v_r + \frac{L}{2} r, u_r, v_r - \frac{L}{2} r, r, x, y, \phi]^T$

\underline{v} 는 계측잡음이고 $N(0, R(n))$ 이라고 가정한다. 만약 대수속도 대신 실제 대지속도성분을 계측한다면, u_r, a, u_r, v_r 은 식별성이 없으므로 조류 변수를 추정할 수 없다.

3.3 확장 Kalman-Bucy 필터

식(5), (6)의 비선형 연속상태방정식과 이산추정방정식의 상태 추정을 위해서는 확장 Kalman-Bucy 필터를 사용한다. 확장 Kalman-Bucy 필터를 통한 상태 추정 흐름도를 Fig.2에 도시하였다(Hwang 1980).

예측 상태 및 예측 상태 오차 공분산 행렬은 예측 구간내에서 필터값을 초기조건으로 다음과 같이 수치적분된다.

$$\hat{\underline{x}}(n+1|n) = \hat{\underline{x}}(n|n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \dot{\hat{\underline{x}}}(t) dt \quad (7)$$

$$P(n+1|n) = P(n|n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \dot{P}(t) dt \quad (8)$$

여기서, 추정 상태 및 오차 공분산 행렬은 각각 상태방정식 및 행렬 Riccati 미분방정식으로부터

구해진다. Kalman Gain은 식(9)로 매 측정시간 간격마다 계산되어지며, Fig.2의 F, H는 각각 식(5), (6)에서 $f(\underline{x}(t)), h(\underline{x}(n))$ 의 Jacobian 행렬을 나타낸다.

$$K(n+1) = P(n+1|n)H^T(n+1)D^{-1}(n+1) \quad (9)$$

여기서, $D(n) = H(n)P(n|n-1)H^T(n) + R(n)$

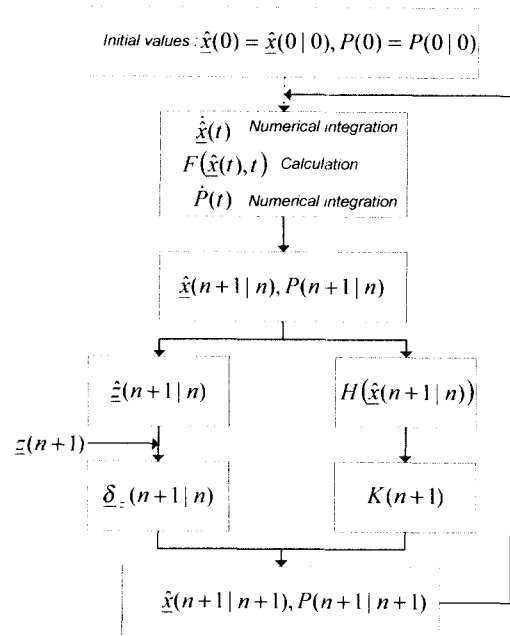


Fig.2 Flowchart of extended Kalman-Bucy filter

3.4 고정간격 스무더

스무더는 필터보다 더 많은 측정값을 이용하여 상태 추정을 수행하므로, 필터 오차 공분산을 더욱 작게 할 수 있다. 그러나 추정하고자 하는 시간 이후의 측정값이 필요하므로 온라인 제어 등의 경우에는 사용할 수 없다. 본 논문의 경우는 모든 측정이 이루어진 후의 해석 단계에서의 상태 추정

이므로 스무더 중에서도 가장 오차 공분산을 줄일 수 있는 고정간격 스무더를 적용하였다. 고정간격 스무더를 이용한 상태 추정 흐름도를 Fig.3에 도시하였다(Bierman 1973).

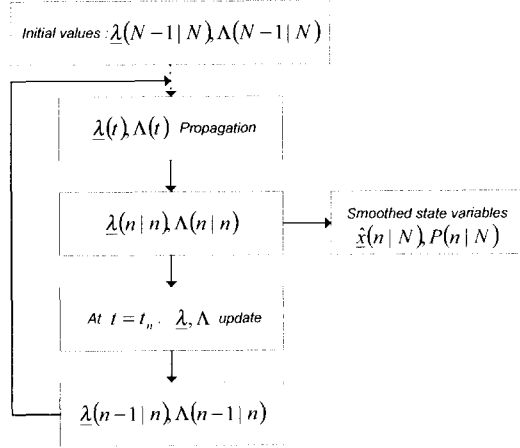


Fig.3 Flowchart of fixed-interval smoother

Fig.3의 $\underline{\lambda}, \Lambda$ 는 adjoint 상태변수 및 오차 공분산 행렬이고, 초기 조건은 필터 경우의 말기 조건에 해당한다. 또한 상태 추정은 필터 경우의 역방향으로 수행한다.

Adjoint 상태변수 및 오차 공분산 행렬의 역시간 전파식은 다음과 같다.

$$\underline{\dot{\lambda}}(t) = -F^T(\hat{x}(t), \underline{u}(t), t)\underline{\lambda}(t) \quad (10)$$

$$\dot{\Lambda}(t) = -F^T(\hat{x}(t), \underline{u}(t), t)\Lambda(t) - \Lambda^T(t)F(\hat{x}(t), \underline{u}(t), t) \quad (11)$$

계측시간 t_n 에서의 adjoint 상태변수 및 오차 공분산 행렬의 수정값은 다음과 같다.

$$\underline{\lambda}(n-1|n) = \underline{\lambda}(n|n) - H^T(n)D^{-1}(n) [\hat{\delta}_z(n|n-1) + D(n)K^T(n)\underline{\lambda}(n|n)] \quad (12)$$

$$\Lambda(n-1|n) = [I - K(n)H(n)]^T \Lambda(n|n) [I - K(n)H(n)] + H^T(n)D^{-1}(n)H(n) \quad (13)$$

여기서, $\hat{\delta}_z$ 는 이노베이션 프로세스이다.

측정시간 t_n 에서의 스무더 상태변수 추정값과 상태 오차 공분산 행렬은 다음식으로 주어진다.

$$\hat{x}(n|N) = \hat{x}(n|n) - P(n|n)\underline{\lambda}(n|n) \quad (14)$$

$$P(n|N) = P(n|n) - P(n|n)\Lambda(n|n)P(n|n) \quad (15)$$

4. 계산 결과 및 고찰

4.1 대상 선박

계산에 사용된 대상 선박은 ITTC 조종성분과 표준모형선인 ESSO OSAKA를 택하였으며, 그 제원은 Crane(1979)에 의하여 상세하게 기술되어 있다.

4.2 시뮬레이션

식(6)의 측정값을 얻기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션시 Hwang(1980)의 동유체력 모델링을 사용하였다. 시뮬레이션은 초기속도가 7 knots인 경우의 35° 우현 선회시험, 20-20 지그재그시험에 대하여 수행하였다.

측정시간 간격은 2초이고, 프로세스 및 측정잡음은 모두 정적 프로세스이고 연관성은 없다고 가정하였다. 프로세스 잡음은 u_r, v_r, r, x, y, ϕ 에 대하여는 0이고, 외력에 대하여는 10^6 으로 가정하였다. 측정잡음의 공분산 행렬은 다음과 같이 가정하였다.

$$R = \text{diag}[10^{-4}, 10^{-4}, 10^{-4}, 10^{-4}, (0.0008 \frac{\pi}{180})^2, 10^2, 10^2, (0.09 \frac{\pi}{180})^2]$$

조류는 45° 방향으로 2 knots의 속도로 일정하게 흐른다고 가정하였다.

4.3 외력 및 조류 변수 추정

조류에 대한 초기조건으로는, 참값에 대하여 약간의 오차가 있다고 가정하여, 방향이 40°, 속도가 1.5 knots인 경우에 대하여, 외력 및 조류 변수를 포함한 상태변수들을 추정하였다.

Fig.4~6에 35° 우현 선회시험 경우, 시뮬레이션된 측정값에 대하여 확장 Kalman-Bucy 필터, 고정간격 스무더에 의하여 추정된 운동변수, 외력 및 조류 변수를 실제 시뮬레이션값과 비교하여 도시하였다. Fig.7~9는 20-20 지그재그시험에 대한 결과이다. Fig.4~5와 7~8에서 원은 실제 시뮬레이션 결과이며, 좌·우측 그림에서 실선은 각각 필터, 스무더에 의한 것이다. Fig.6과 9의 조류 변수 결과에서 원형 실선은 스무더, 사각형 실선은 필터에 의한 것이다.

35° 우현 선회시험과 20-20 지그재그시험 경우의 추정값의 특성은 시험 종류에 관계없이 비슷한 결과를 보이고 있다. 측정값이 Fig.4와 7의 운동변수이고, 측정잡음은 정규백색잡음이므로 추정값은 필터, 스무더 모두 실제값과 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig.5와 8의 외력은 Gauss-Markov 프로세스라는 단순 모델링에 의하여 추정되므로 실제값과 차이를 보이고 있다. 그러나 외력이 급격하게 변화하는 범위를 제외하면 필터에서 제거되지 않은 잡음 성분이 스무더를 사용하는 경우 상당히 개선되는 것을 알 수 있다. 이렇게 추정된 외력은 동유체력, 추진력 및 타력 등의 모델링에서의 동유체력미계수를 구할 때 측정값으로 사용될 수 있으므로 정밀한 추정값이 요구된다. Fig.6과 9의 조류 속도와 방향의 추정값은 두 경우 모두 실제값과 잘 일치하고 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 선박속도에 대한 상태변수가 대수속도이므로 측정 운동변수값은 역시 대수속도이어야 조류 변수를 식별할 수 있다.

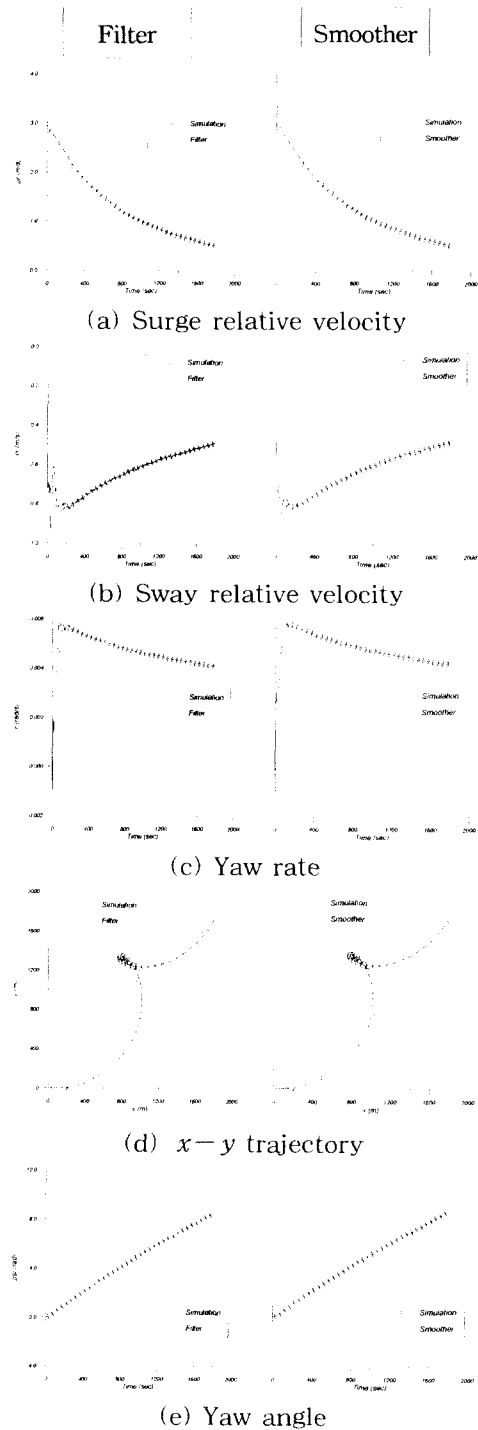


Fig.4 Filtered and smoothed estimates of motion variables (35° starboard turn)

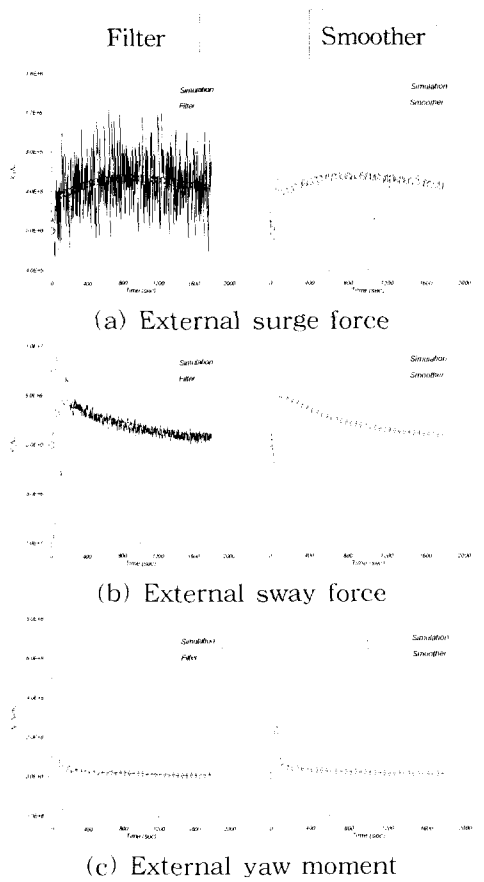


Fig.5 Filtered and smoothed estimates of external forces (35° starboard turn)

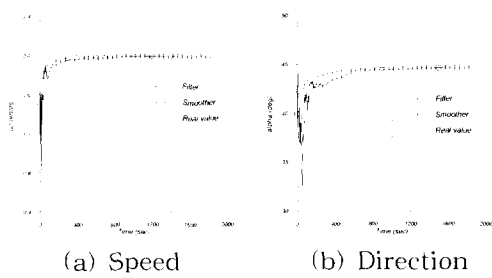


Fig.6 Filtered and smoothed estimates of current variables (35° starboard turn)

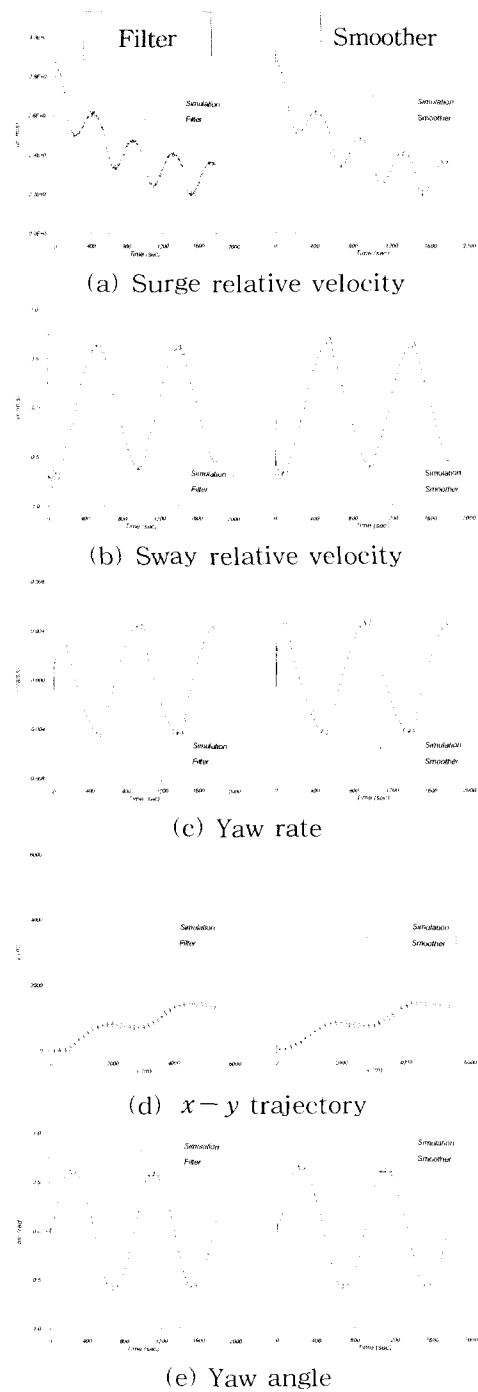


Fig.7 Filtered and smoothed estimates of motion variables (20-20 zig-zag)

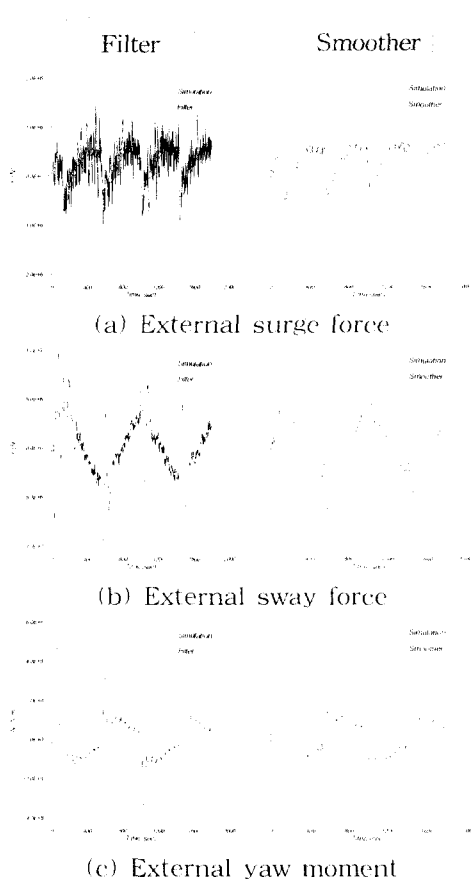


Fig.8 Filtered and smoothed estimates of external forces (20-20 zig-zag)

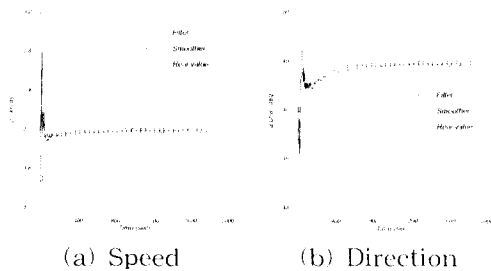


Fig.9 Filtered and smoothed estimates of current variables (20-20 zig-zag)

5. 결론

조종시운전 결과를 이용하여 동유체력미계수 및 조류 변수를 식별하는 경우, 기존에는 확장 Kalman 필터를 이용하여 선박의 운동상태 및 많은 수의 매개변수를 동시에 추정하였다. 그러나 본 논문에서는 모델링 전 추정기법 개념에 따라 동유체력미계수를 추정하기 전에 외력을 간단한 3차의 Gauss-Markov 프로세스라고 가정하여 매개변수의 개수를 줄인 후 운동상태, 외력 및 조류 변수를 추정하였다.

운동 및 조류 변수 추정값은 확장 Kalman-Bucy 필터값과 고정간격 스무더값 모두 시뮬레이션값과 잘 일치하는 결과를 주고 있고, 외력 성분도 스무더에 의하여 필터로부터 제거되지 않은 잡음을 상당히 제거할 수 있었다. 추정된 운동상태와 외력성분을 동유체력미계수를 포함한 외력 모델링에 대입하면 매개변수를 기존의 회귀분석식을 적용하여 구할 수 있을 뿐만 아니라, 조종시운전시의 운동변수가 동유체력미계수에 미치는 영향을 쉽게 확인할 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- 강창구 1994 "선박 조종성 시운전 해석법," 대한조선학회지, 제31권 제4호, pp. 26-28
- 강창구, 서상현, 김재신 1984 "시스템 검증법에 의한 조종성능 해석," 대한조선학회지, 제21권 제4호, pp. 10-20
- 김찬기 1996 "계수식별법에 의한 불수체의 조종계수 추정," 서울대학교 대학원, 석사학위논문.
- 이혁 1999 "실선 시운전 자료를 이용한 조종성미계수의 추정과 선박의 조종 성능 평가," 서울대학교 대학원, 석사학위 논문.
- Rhee, K.P. and Kim, K.H. 2000 "A New Sea Trial Method for Estimating Hydrodynamic Derivatives," SOTTECH, Vol. 3, No. 3, pp. 25-45.
- Bierman, G.J. 1973 "Fixed interval smoothing with discrete measurements," Int. J. of Control, Vol. 18, No. 1, pp.

- 65-75.
- Crane, C.L. 1979 "Maneuvering Trials of a 278,000-DWT Tanker in Shallow and Deep Waters." SNAME Transaction, Vol. 87, pp. 251-283.
 - Hwang, W.Y. 1980 "Application of System Identification to Ship Maneuvering," Ph.D thesis, MIT.
 - Sri-Jayantha, M. and Stengel, R.F. 1987 "Determination of Nonlinear Aerodynamic Coefficients Using the Estimation-Before-Modeling Method," J. of Aircraft, Vol. 25, No. 9, pp. 796-804.



〈 윤 현 규 〉



〈 이 기 표 〉