

선박 자동 이접안을 위한 비선형 제어알고리즘 연구

원문철* · 홍성국* · 정윤하* · 김선영** · 손남선** · 윤현규**

*충남대학교 BK21 메카트로닉스고급인력양성산학공동사업단

**한국해양연구원 해상교통안전연구사업단

A Study on a Nonlinear Control Algorithm for the Automatic Berthing of Ships

MOON-CHEOL WON*, SEONG-KUK HONG*, YUN-HA JUNG*,

SUN-YOUNG KIM**, NAM-SUN SON** AND HYUN-GYU YOON**

*Dept. of Mechatronics of BK 21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Daejeon, Korea

**Maritime and Ocean Engineering Research Institute/KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORD: Automatic berthing 자동 이접안, Nonlinear mathematical model비선형수학모델, Nonlinear control비선형 제어, Thruster추진기, Multi-input multi-output (MIMO) 다중입력 다중출력, Line of sight (LOS) 방향주시선

ABSTRACT: his study discusses the design of an automatic berthing control algorithm for ships with a bow thruster and a stern thruster, as well as a rudder. A nonlinear mathematical model for the low speed maneuvering of ships was used to design a MIMO (multi-input multi-output) nonlinear control algorithm. The algorithm consists of two parts, the forward velocity control and heading angle control. The control algorithm was designed based on the longitudinal and yaw dynamic models of ships. The desired heading angle was obtained by the so-called "Line of Sight" method. An optimal control force allocation method for the rudder and the thrusters is suggested. The nonlinear control algorithm was tested by numerical simulations using MATLAB, and showed good tracking performance.

1. 서 론

선박의 이접안은 선박의 운항에서 가장 어려운 분야 중 하나로, 복잡한 항구에서 이접안 중에 발생하는 충돌 사고에 대한 많은 보고도 접할 수 있다. 통상, 유조선과 같은 대형 선박들은 도선사와 예인선(Tug boat)을 사용하여 이접안을 하고 있으나, 여객선이나 해양경찰정과 같은 중소형선박은 자체적으로 이접안을 수행하고 있다. 자동 이접안의 장점은 도선사와 예인선의 도움을 받지 않으므로 비용과 시간을 상당히 절약할 수 있으며, 이접안에 능숙하지 않은 선원 없이도 이접안을 수행할 수 있다는 점이다. 현재, 기존 타에 선수 또는 선미 추진기를 장착한 선박 등에 자동 이접안 제어 기술들(Hasegawa and Kitera, 1993; Im and Hasegawa, 2002)이 일부 연구된 바 있다.

선박운항 자동제어에 관한 활발한 연구는 항로에 따라 미리 예정된 방향으로 선박을 제어(Course-keeping)하는 오토 파일럿(Auto-pilot)의 연구(Bech, 1972; Amerongen and Udink, 1975)로부터 1970년대에 시작되었다고 할 수 있다. 이후 1980년대에는 복잡한 경로를 따라 선박을 제어(Track-keeping)하는 경로 제어 연구(Rios-Neto and Da Cruz, 1985; Lu et al., 1990; Burns, 1989)가 많이 수행된 바 있다. 1990년대 이후에는 복잡한 항내에서 선박을 이접안(Berthing/unberthing) 제어 연구(Koyama et al., 1993; Ohtsu et al., 1991)가 수행된 바 있다.

이 접안 제어 문제가 상기 선박 제어 문제 중 가장 어려운 이유는 다음과 같다. 먼저, 이접안 시 선박이 매우 저속으로 운항하므로 선박의 조종성이 매우 떨어지는 반면 조류나 바람 등의 외란 요소의 영향이 커진다. 다음으로는, 선박의 횡방향 움직임이 많아지고 타 및 프로펠러 등 액츄에이터의 사용 범위가 커져, 선박동역학의 비선형성이 커져 일반적인 선형 제어 알고리즘 적용만으로는 제어가 어려워진다. 따라서, 이접안 제어에 대한 많은 기존 연구는 신경망(Neural network)을 이용한 연구(Yamato et al., 1990; Zhang et al., 1997), 퍼지로지(Fuzzy logic) 또는 전문가 시스템(Expert system)을 이용한 것(Sutton et al., 1997; Yamato et al., 1993)이 많이 보고되고 있으나, 선박의 저속 비선형 동역학 식을 이용한 연구는 많이 찾아보기 어렵다. 이 이유는 선박의 저속운항 동역학 식이나 이에 사용된 파라미터에 대한 연구 결과가 많지 않기 때문이라 사료된다.

본 연구에서는 컨테이너 선박의 저속 비선형 동역학 모델을 비선형 자동 이접안 제어 알고리즘 설계에 사용하였다. 본 연구에서 제시하는 비선형 제어 알고리즘은 간략화 된 선박 동역학식을 사용하고 목표 전진방향속도와 지향각을 추종제어하는 방식을 사용하므로, 기존에 선박에 적용된 비선형 제어알고리즘(Le Minh-Duc et al., 2003; Bu et al., 2007)보다 비교적 간단한 형태를 가진다는 장점이 있다.

설계된 제어 알고리즘은 기본적으로 주 추진 프로펠러와 타, 선수선미 추진기를 갖는 선박에의 적용을 목표로 한다. 이러한

교신저자 원문철: 대전광역시 유성구 궁동 220
042-821-6875 mcwon@cnu.ac.kr

선박 제어는 다중입력 및 다중 출력(Multi-input multi-output: MIMO) 시스템 문제가 된다. 설계된 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 수학적 시뮬레이션으로 효율성을 증명하였다.

2. 저속 조종운동 수학모형

자동 이접안 제어기를 설계하고, 실선 시험에 앞서 성능 검증 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 제어 대상인 선박에 대한 조종운동 수학모형이 필요하다. 본 절에서는 컨테이너선과 같은 일반 선박에 대한 조종운동 수학모형에 대하여 나타내기로 한다.

2.1 좌표계

선박의 운동을 기술하기 위하여 Fig. 1과 같이 두 개의 직각 좌표계를 정의한다. $O-xy$ 는 원점이 수면상의 임의의 점이고 관성좌표계로 간주할 수 있는 지구고정좌표계이고, $O-x_b, y_b$ 는 선박의 중앙 횡단면, 수선면, 중중심면이 만나는 점을 원점으로 하는 선박고정좌표계이다. 선박의 이동 궤적 및 침로각은 지구고정좌표계에 대하여 나타내고, 선박의 조종운동에 의하여 작용하는 동유체력, 추진력, 타력 등은 선박고정좌표계에 대하여 기술한다.

2.2 조종운동방정식

파랑중 운항하는 선박은 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave), 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 6자유도 운동을 하지만 대형선박의 경우에 상하동요, 종동요의 크기는 무시할 정도로 작다. 또한 선박의 이접안은 항만 내에서 이루어지므로, 파랑 또는 급선회에 의한 횡동요 영향도 무시할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 식 (1), (2), 및 (3) 과 같이 전후동요, 좌우동요, 선수동요의 3자유도 운동방정식을 구성하였다.

$$m(\dot{u} - vr - x_G \dot{\theta}^2) = X_H + X_R + X_P \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{\theta}) = Y_H + Y_R + Y_T \quad (2)$$

$$I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N_H + N_R + N_T \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)에서 m , I_z , x_G 는 각각 선박 질량, z 축에 대한 질량관성모멘트, 무게중심의 x 좌표이고, X , Y , N 은 선

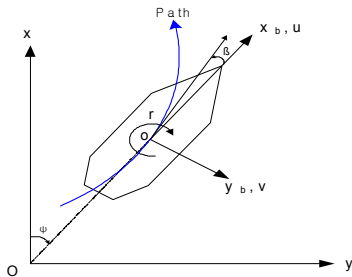


Fig. 1 Definition of coordinates and motion symbols

박에 작용하는 외력을 나타낸다. 하첨자 H, R, P, T 는 각각 선체에 작용하는 동유체력, 타력, 추진력, 선수/선미 추진기 추진력이고, Fig. 1에 정의한 운동변수 위의 점(Dot)은 각 변수들의 시간 미분을 의미한다.

선박의 이동궤적 x, y , 선수동요각 ψ 와 지구고정좌표계에 대한 운동변수들 간의 관계는 Euler 회전 변환식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 동유체력

선박이 설계속력으로 운항하는 경우와는 달리 이접안시에는 저속 상태이므로, 이를 고려하여 선박에 작용하는 동유체력을 모델링하여야 한다. 설계 속력과 저속에서 운항하는 경우에 선박에 작용하는 동유체력 수학모형의 가장 큰 차이는 Fig. 1에 나타난 편류각 β 가 저속인 경우에는 $\pm 180^\circ$ 까지 될 수 있다는 것이다. 따라서 수학모형 구조가 달라져야 하는데 본 연구에서는 Yoshimura(1986; 1988)의 교차 항력 모형에 기반하여 윤현규와 김선영(2005)이 수정한 저속 조종운동방정식을 사용하였다. 식 (1), (2), (3)의 하첨자 H 로 나타낸 선박의 조종운동에 의하여 작용하는 동유체력 및 동유체모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_H &= X_u \dot{u} + X_{|u|} |u| + X_v v + X_\alpha \alpha + X_{|\alpha|} |\alpha| \\ Y_H &= Y_v \dot{v} + Y_p \dot{p} + Y_r \dot{r} + Y_w w + Y_\beta \beta + Y_{|\beta|} |\beta| \\ &\quad - \frac{\rho}{2} LC_{D0} \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} (v + C_{rY} r x_b) |v + C_{rY} r x_b| dx_b - Lv |v| \right\} \\ N_H &= N_r \dot{r} + N_{|r|} |r| + N_\alpha \alpha + N_{|\alpha|} |\alpha| \\ &\quad - \frac{\rho}{2} LC_{D0} \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} (v + C_{rN} r x_b) |v + C_{rN} r x_b| x_b dx_b \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서, 운동변수에 곱해지는 계수들($X_u, X_{|u|}, C_{D0}, C_{rY}, C_{rN}$ 등)은 동유체력미계수로써 경험식 또는 모형시험을 통하여 결정하여야 한다. ρ, L 은 각각 유체 밀도, 선박 길이를 나타낸다. 식 (5)에 의하면 선수동요모멘트 수학모형에는 편류각 β 대신 상반 편류각 α 를 사용하였고, 다음과 같이 β 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \beta - \text{sign}(\beta) \alpha_0 \quad (6)$$

여기서, α_0 는 선박이 표류할 때 선수동요모멘트가 0이 되는 편류각이고, Sign은 인자의 부호만 취하는 함수이다.

2.4 타력 및 추진력

타력 및 추진력은 Matsumoto and Yumuro(1987)가 정리한 수학모형을 사용하기로 하고, 본 절에서는 주요 수학모형식만을 간략하게 언급하기로 한다.

타각 δ 의 변화로 인해 발생하는 유체력은 다음과 같이 타직압력 F_N , 보정계수 a_H, x_H 선체와 타간의 간섭계수 t_R 을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R+a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, x_R 은 선박고정좌표계에 대한 타의 x_b 좌표값이다. 타 직압력 F_N 은 타 중횡비의 함수인 타직압력계수 f_α , 타면적 A_R , 타위치에서의 유입속력 U_R 과 유효 영각 α_R 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_N = \frac{\rho}{2} A_R f_\alpha U_R^2 \sin \alpha_R \quad (8)$$

여기서 U_R 과 α_R 은 각 각 아래와 같이 정의된다.

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad (9)$$

$$\alpha_R = \delta + \frac{v_R}{u_R} \quad (10)$$

u_R 과 v_R 은 타로 유입되는 유체의 전진방향 및 횡방향 유체 속도이며 이들은 u, v, r 선체와 타간의 간섭계수들, 및 주추진 프로펠러 파라미터들의 함수로 계산될 수 있다(윤현규와 김선영, 2005).

프로펠러에 의한 추진력 X_P 는 다음과 같이 모델링 한다.

$$X_P = (1-t_p) \rho n D_p^4 K_T \quad (11)$$

여기서, n, K_T 는 프로펠러 회전수, 추력계수를 나타낸다. 추력 계수는 회전수와 전진속도의 관계인 전진비의 함수이다. t_p, D_p 는 각각 추력감소계수, 프로펠러 직경이다.

2.5 선수/선미 추진기(Thruster) 추진력

선박에 장착되는 선수/선미 추진기는 속력이 작아서 타에 의한 제어력이 작동하지 않을 때 좌우 이동 또는 회전을 위하여 사용하는 장치이다. 따라서 식 (2), (3)에 나타낸 바와 같이 좌우동요, 선수동요에만 고려한다.

선수/선미 추진기 추진력은 선박과의 간섭 영향 등은 무시하고 다음과 같이 단순하게 표현하기로 한다.

$$\begin{aligned} Y_T &= Y_{T_B} + Y_{T_S} \\ N_T &= x_{T_B} Y_{T_B} + x_{T_S} Y_{T_S} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, 하첨자 B, S 는 선수, 선미를 나타낸다. 만약 선수 추진기만 있는 경우에 Y_{T_S} 는 0이 된다. x_{T_B}, x_{T_S} 는 선수, 선미 추진기의 선박고정좌표계에 대한 x 좌표값이다.

식 (12)의 Y_{T_B}, Y_{T_S} 는 각각의 회전수 n_B, n_S 를 이용하여 다음과 같이 역회전을 고려한 2차함수로 모델링한다.

$$\begin{aligned} Y_{T_B} &= b_B n_B |n_B| \\ Y_{T_S} &= b_S n_S |n_S| \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, b_B, b_S 는 선수/선미 추진기의 특성치이다.

2.6 액츄에이터(Actuator) 동역학 모형

수중에서 운용되는 타, 프로펠러, 선수/선미 추진기는 부하가 크게 걸리므로, 명령값에 도달하기 위해서는 시간지연이 발생한다. 이러한 시간지연은 제어성능을 감소시키므로, 이에 대한 영향이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 액츄에이터들의 동역학을 다음과 같이 1차 선형 시스템으로 간단하게 모델링 하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \frac{1}{\tau_\delta} (\delta_c - \delta) \\ \dot{n} &= \frac{1}{\tau_P} (n_c - n) \\ \dot{n}_B &= \frac{1}{\tau_{T_B}} (n_{B_c} - n_B) \\ \dot{n}_S &= \frac{1}{\tau_{T_S}} (n_{S_c} - n_S) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, 하첨자 c 는 명령값을 나타내고, τ 는 시정수이다.

3. 자동 이접안을 위한 비선형 MIMO제어기

3.1 원하는 지향각 및 전진방향 속도 계산

본 연구에서 이접안 제어기는 미리 설정된 경유점(Way points)을 선박이 따라가도록 설계되었다. 그리고 각각의 경유점에서 원하는 선박속도(v_n)가 지정된다.

이 경우, "Line of sight(LOS)" 개념(Fossen, 1994)이 각각의 경유점을 선박이 원하는 속도로 운행되기 위해 필요한 선박의 필요 지향각과 전진방향속도를 결정하는데 사용될 수 있다(Fig. 2). Fig. 2에서 N 은 LOS 상수이고 $L_{vehicle}$ 은 선박의 길이이다.

현재 선박 위치(x, y)에서 필요한 속도를 구하는 식은 경유점에서 지정된 속도의 선형 보간법을 이용하여 식 (15)과 같이 정의된다.

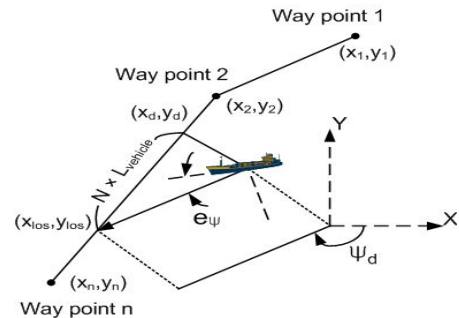


Fig. 2 Calculation of LOS vector

$$u_d = v_n + s(v_{n+1} - v_n) \quad (15)$$

여기서 s 는 식 (16)으로 주어지는 파라미터이다.

$$s = \frac{(x - x_n)(x_{n+1} - x_n) + (y - y_n)(y_{n+1} - y_n)}{d_n^2} \quad (16)$$

선박이 지향해야할 지향각은 선박과 경유점들의 연결선상의 최소 거리점 (x_d, y_d) 에서 $N \times L_{vehicle}$ 떨어진 지점 (x_{los}, y_{los}) 과 현재 선박위치의 연결선의 각도로 정할 수 있다. 따라서 원하는 지향각(ψ_d)은 아래 식 (17)과 같이 계산 될 수 있다.

$$\psi_d = \arctan\left(\frac{y_{los} - y}{x_{los} - x}\right) \quad (17)$$

3.2 비선형 제어기 설계

비선형 제어기 설계(Fossen, 2002; Slotine and Li, 1991)에 운동방정식 (1), (2) 및 (3)이 사용되었다. 3.1절에서 설명한 LOS 개념을 사용할 경우, 선박의 전진방향 속도와 선박의 지향각만이 적절히 제어되면 된다.

먼저 식 (1)을 이용하여 선박의 전진방향 속도 제어기를 설계한다. $m_0 = (m - X_u)$ 로 정의하면, 식 (1)은 식 (18)와 같이 바꿀 수 있다.

$$m_0 \dot{u} = X_h(u, v, r) + X_R(u, v, n, \delta) + X_p(u, n) \quad (18)$$

속도 오차(e_u)는 식 (19)과 같이 정의한다.

$$e_u = u - u_d(s) \quad (19)$$

원하는 오차관계식(Error dynamics)을 식 (20)과 같이 정의한다. 여기에서 η 는 양의 상수이며, 주 추진 프로펠러의 출력이 충분하다면 이 값이 클수록 속도오차의 수렴도가 빨라진다.

$$\dot{e}_u + \eta e_u = 0 \quad (20)$$

이러한 오차관계식이 유지될 경우, 속도오차가 최종적으로 0으로 수렴한다.

식 (18)와 (20)을 이용하면, 식 (21)와 같이 원하는 프로펠러의 추진력을 표현할 수 있다.

$$X_{Rl} = m_0(\dot{u}_d(s) - \lambda e_u) - X_h(u, v, r) - X_R(u, v, n, \delta) \quad (21)$$

마지막으로 식 (11)을 사용하여, 식 (21)로부터 원하는 프로펠러 속도 n_d 를 구할 수 있다.

다음은 원하는 지향각 제어를 위한 제어기의 설계과정이다. 지향각 오차(e_ψ)를 식 (22)과 같이 정의한다.

$$e_\psi = \psi - \psi_d(s) \quad (22)$$

또한 원하는 오차관계식을 식 (23)와 같이 표현한다.

$$\ddot{e}_\psi + \lambda_1 \dot{e}_\psi + \lambda_2 e_\psi = 0 \quad (23)$$

양의 λ_1 및 λ_2 값에 대하여 상기 오차관계식은 지향각 오차가 0으로 수렴 되게 한다. 여기서도, λ_1 과 λ_2 값이 커질 수록 오차가 0으로 수렴하는 속도는 빠르나, 타각 및 선수/선미 추진기의 출력이 제한적이므로 과도하게 큰 값들은 제어 성능에 오히려 부정적 영향을 미친다.

식 (23)에 식 (22), (2), (3)을 대입하면 유체력 Y_{Rr} , Y_T , N_R 와 N_T 의 관계가 도출되는데 이는 식 (24)와 같다.

$$c(Y_R + Y_T) + d(N_R + N_T) = -cY_h - dN_h - \lambda_1 \dot{e}_\psi - \lambda_2 e_\psi + \ddot{\psi}_d(s) \quad (24)$$

식 (24)에서, c 와 d 는 행렬 M_1 을 식 (25)과 같이 정의할 경우, M_1^{-1} 행렬의 (2,1)와 (2,2)의 요소이다.

$$M_1 = \begin{bmatrix} (m - Y_v) & (mx_G - Y_r) \\ (mx_G - N_v) & (I_{ZZ} - N_r) \end{bmatrix} \quad (25)$$

식 (24)의 유체력들은 지향각 제어를 위한 제어입력 (δ, n_B, n_S) 에 따라 식 (7), (12)에 의하여 정해지는데, 세 개의 제어입력이 식 (24) 한개만 만족하면 된다. 따라서 제어 입력들이 단일하게 결정되지 않는다. 문제를 비교적 간단하게 하기 위해 선수 추진기 회전수와 선미 추진기 회전수가 서로 절대값은 같고 부호만 다르게 설계 할 수 있다. 이 경우 선수, 선미 추진기 시스템이 근사적으로 요 모우먼트만 발생시키고, 횡 방향 힘은 발생시키지 않는다. 이 경우 $Y_T = 0$ 가 되고, $\ddot{\psi}_d$ 가 충분히 작을 경우 식 (24)는 아래 식 (26)과 같이 된다.

$$cY_R + d(N_R + N_T) = -cY_h - dN_h - \lambda_1 \dot{e}_\psi - \lambda_2 e_\psi \quad (26)$$

$\ddot{\psi}_d$ 를 충분히 작다고 가정할 수 있는 이유는 선박의 이접안 궤적이 일반적으로 급격하게 변하지 않기 때문이다.

다음으로, 최적화 기법을 이용한 제어 입력 분배를 적용 할 수 있다. 먼저 식 (26)은 2장에서 제시된 타력 및 선수, 선미 추진기가 발생시키는 유체력 표현식으로부터 식 (27)과 같이 표현 될 수 있다.

$$u_{\psi d} = 2dx_{TB} n_B |n_B| - (c(1 + a_H) + d(x_R + a_H \dot{x}_{HL})) \frac{\rho}{2} A_R f_a U_R^2 \sin(\delta + \frac{v_R}{u_R}) \cos \delta \quad (27)$$

여기서 $u_{\psi d}$ 는 식 (26)으로 정의한다.

식 (27)을 유도하는 데에는 선수 및 선미 추진기가 같은 회전수에 대하여 동일한 회전 모우멘트를 발생시킴을 가정하였다.

본 연구에서는 선속이 0.4m/sec 이상인 경우에 대하여 최적화 지수 $J = n_B^2$ 로 놓고 J 를 최소화하고 식 (27)을 만족하는 δ 를 구하는 것으로 설정하였다. 이 경우 선속이 0.4m/sec 이상인 경우 가급적 타를 이용하는 것이 된다. 한편 J 는 식 (27)을

$$J = \frac{|u_{\psi d} + (c(1+a_H) + d(x_R + a_H \dot{x}_H L)) \frac{\rho}{2} A_R f_a U_R^2 \sin(\delta + \frac{v_R}{u_R}) \cos \delta|}{2d v_{\psi \theta a}} \quad (28)$$

이용하면, 식 (28)가 되므로 수치적으로 δ 를 변화시켜가며 식 (28)을 계산하여 최소의 J 를 갖는 δ 를 찾을 수 있다. 선속이 0.4m/sec 이하인 경우 $J = \delta^2$ 으로 놓고 상기 문제를 풀면 가급적 타의 사용을 최소화하는 제어입력 분배가 될 수 있다. 본 연구에서는 선속이 0.4m/sec 이하인 경우 간단히 선수, 선미 추진기만을 사용하였고, 이 경우 제어 입력은 최적화 과정 없이 단일하게 결정된다.

상기에서 유도한 제어 알고리즘을 실제 실험에 적용할 경우, 선속(u, v) 및 선회속도(r) 등의 값이 필요한데 이는 선박에 DGPS(Differential global positioning system) 등의 장비가 있는 경우 비교적 정확히 추정될 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

제어 알고리즘의 검증은 대상 선박을 선정 한 후, 선박의 유체력 계수에 대한 불확실성이 없는 경우와 불확실성이 있는 경우에 대하여 시뮬레이션을 통하여 수행하였다.

4.1 대상 선박

대상 선박은 한국해양연구원에서 설계한 9000TEU급 컨테이너선(김선영 등, 2004)의 1/72 축척 모형으로 선정하였다. Table 1에 대상 선박의 주요목을 나타내었다.

식 (5)에 포함된 저속 수확모형에 대한 동유체력미계수는 Yoshimura(1986; 1988)의 컨테이너선에 대한 모형시험 결과를 적용하였고, 식 (7)~(13)의 타력, 추진력, 쓰러스터력에 포함된 실험상수들은 Table 1의 모형선에 대한 구속모형시험 결과를 적용하였다.

Table 1 Principal particulars of a target ship

Particular	Item	Value
L	Length between perpendiculars	4.063 m
B	Breadth	0.633 m
T	Draft	0.201 m
m	Mass	320.4 kg
I_z	z-axis Mass mount of inertia	330.49 kg-m ²
x_G	Mass center	-0.076 m
A_R	Rudder area	0.0138 m ²
D_p	Propeller diameter	0.122 m

4.2 유체력 계수에 불확실성이 없는 경우

설계된 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 두 가지 경우의 시뮬레이션을 수행하였다.

첫 번째 수치실험에서는 식 (29)과 같은 함수가 선박의 원하는 궤적을 나타내는데 사용되었다.

$$Y = 50(1 - e^{-0.09X}) \quad (29)$$

이때 선박이 추종해야 할 경유점의 궤적벡터(Way X, Way Y)와 각 경유점에서 선박이 가져야 할 속도 벡터 Way V는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{WayX} &= [0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91, 98] \\ \text{WayY} &= [0, 23.4, 35.8, 42.4, 46.0, 47.9, 48.9, 49.4, \\ &\quad 49.7, 49.8, 49.9, 49.9, 50.0, 50.0, 50.0] \\ \text{WayV} &= [0, 0.5, 0.8, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0] \end{aligned}$$

이 시뮬레이션에서, LOS 길이는 $L_{vehicle}$ 의 2배이고 초기조건 벡터를 $X_0 = [u, v, r, x, y, \psi]$ 로 정의할 경우, 초기 조건은 $X_0 = [0.01, 0, 0, 5, 1, 90^\circ]$ 으로 주었다. Fig. 3은 시뮬레이션의 결과이다.

시뮬레이션 결과를 보면 선박이 원하는 경로를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전진 방향 속도와 지향각의 추종 오차가 거의 없다. 타각과 선수/선미 추진기의 회전속도는 $t=100 \sim 200\text{sec}$ 의 범위에서 채터링(Chattering)현상을 나타낸다. 이러한 이유는 최적제어 분배 알고리즘에 의한 결과이다.

두 번째 시뮬레이션은 Fig 4에서의 페루프를 추종하는 것이다. 시뮬레이션에 사용된 실제 경유점의 좌표와 각각의 경유점에서 가져야 할 선박의 속도 벡터는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{WayX} &= [0, 16, 37, 58, 74, 128, 148, 158, 150, 135, 105, 76, 40, 0, -20] \\ \text{WayY} &= [0, 14, 66, 79, 85, 85, 85, 70, 45, 28, 17, 12, 9, 0, 0] \\ \text{WayV} &= [0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.8, 0.0] \end{aligned}$$

이때 LOS 길이는 $L_{vehicle}$ 의 2배를 사용하였다. Fig 4에서 최대 위치 추종 오차는 1.0m보다 작음을 알 수 있다. 여기서 추종오차는 경유점들이 연결되는 모서리 점 근처에서 크다. LOS 길이를 $L_{vehicle}$ 의 3배로 한 다른 시뮬레이션 결과에서는 이 오차가 3.0m보다 작음을 확인하였다.

첫 번째 시뮬레이션에서와 같이 전진방향 속도와 지향각 추종 오차는 거의 0임을 알 수 있으며 또한, 첫 번째 시뮬레이션 결과에서와 같이 최적제어 분배 알고리즘의 결과로 선수/선미 추진기에서 채터링(Chattering) 현상을 볼 수 있다. 약간의 제어 성능의 저하를 감수하면, 이러한 현상을 없애기 위해, 채터링(Chattering) 현상이 발생하는 부분에서 선수/선미 추진기 명령을 0으로 해도 무방함을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

4.3 유체력 계수에 불확실성이 있는 경우

4.2절에서의 시뮬레이션은 선박의 유체력 계수를 정확히 안다는 가정 하에 이루어졌다. 하지만 실제 선박에서는 유체력 계수를 정

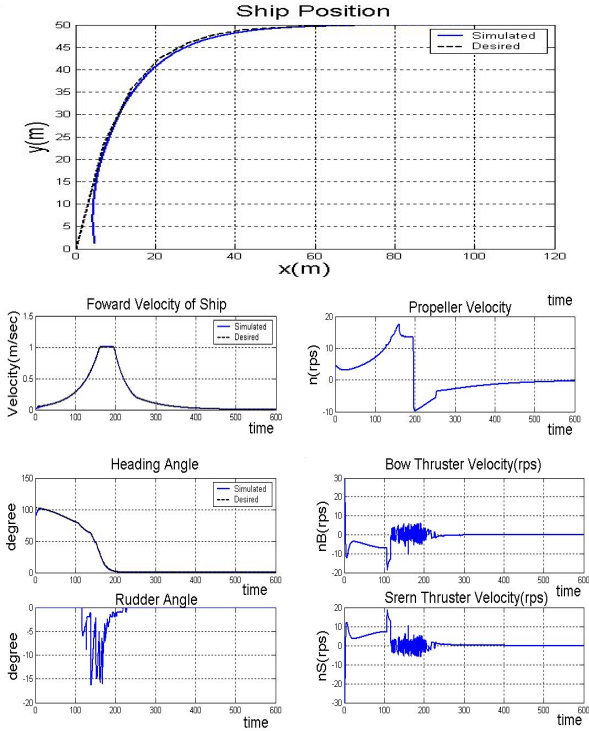


Fig. 3 Simulation result of LOS based nonlinear controller for an exponential ship desired trajectory

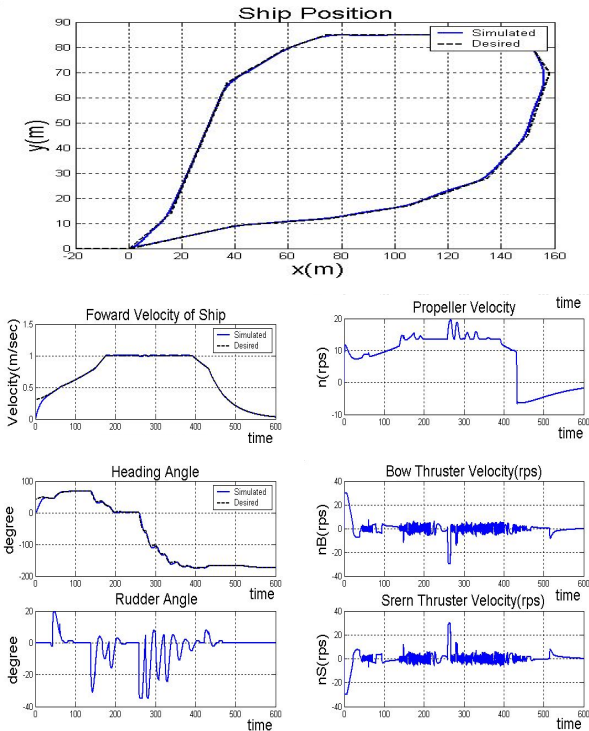


Fig. 4 Simulation result of LOS based nonlinear controller for a closed trajectory tracking (LOS = 2L)

확히 구할 수 없는 경우가 있기 때문에 이 절에서는 선박의 유체력 계수에 불확실성(Multiplicative uncertainty)을 곱한 후, 시뮬레이션을 수행하였다.

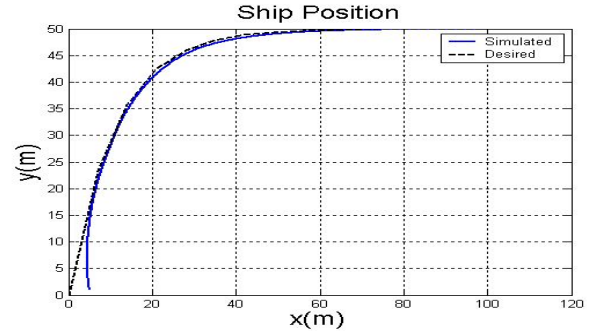


Fig. 5 Simulation result of LOS based nonlinear controller for an exponential ship desired trajectory (with uncertainty parameter values)

선박의 유체력 계수에 곱해질 불확실성을 식 (30)과 같이 지정한 후 이를 전진 방향 속도 제어 및 선회 방향 속도 제어와 관련된 식 (21)와 식 (24)의 유체력 계수에 곱해주었다.

$$mu = (1 + 0.2 \sin(0.1t)) \tag{30}$$

따라서 mu 가 곱해진 유체력 계수는 시간에 따라 천천히 변하는 최대 $\pm 20\%$ 의 불확실성을 갖는다.

불확실성을 곱한 프로펠러 추진력은 식 (31)와 같이 정의 하며, 타와 선수/선미 추진기에서 구해지는 요 모우멘트는 식 (32)과 같이 정의 할 수 있다.

$$X_{Pl} = (m - X_u \cdot mu) (\dot{u}_d(s) - \lambda e_u) - X_h(u, v, r) \cdot mu - X_R(u, v, n, \delta) \cdot mu \tag{31}$$

$$c(Y_R + Y_T) + d(N_R + N_T) = -cY_h \cdot mu - dN_h \cdot mu - \lambda_1 \dot{e}_\psi - \lambda_2 e_\psi + \ddot{\psi}_d(s) = u_{\psi_d} \tag{32}$$

이때 선박이 추종해야할 경유점의 웨지벡터(WayX, WayY)와 각 경유점에서 선박이 가져야 할 속도 벡터 WayV는 4.2절의 첫 번째 시뮬레이션과 동일하다.

또한 LOS 길이와 초기조건 벡터도 4.2절의 첫 번째 시뮬레이션과 같다. Fig 5는 선박 위치제어 시뮬레이션 결과이다. 선박속도, 지향각 및 각 액추에이터의 시간이력도도 Fig. 3에서의 결과와 유사하다.

시뮬레이션 결과를 보면 불확실성이 없는 경우의 시뮬레이션 결과인 Fig. 3과 큰 차이 없이 제어가 잘 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 유체력 계수들의 최대 $\pm 20\%$ 정도의 불확실성을 제어 알고리즘이 잘 극복해내는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 타 및 선수/선미 추진기를 갖는 선박의 MIMO (Multi-input multi-output) 자동 이접안 제어 알고리즘을 설계 하였다. 제어기는 Line of sight(LOS) 개념을 이용하고, 주어진 경유점과 해당 경유점에서 지정된 전진방향 속도를 추종하는 형태이다. 선박의 비선형 동역학 모델을 이용하고, 최적화 과정

을 통하여 타 및 선수/선미 추진기의 명령 분배 알고리즘이 적용된 제어 알고리즘은 수치 실험을 통하여 성능이 검증되었다.

수치 실험은 선박 비선형 모델에서 유체력 계수의 불확실성이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수행되었으며, 두 경우 모두에서 LOS 상수가 2이하인 경우 1.0m 이내의 궤적 추종결과를 보여준다. 향후, 모형선 및 실선 실험을 통하여 설계된 제어기의 효율성이 검증될 예정이다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원의 기본사업 "네트워크 기반 항만 관제 및 항법체계 기술 개발" 과제에서 수행한 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- 김선영 등 (2004). 차세대 선박의 조종성/안전성 평가기술 개발 (II), 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 연구보고서, UCN00370-2433.
- 윤현규, 김선영 (2005). "저속시 선체에 작용하는 유체력 수확 모형 정립을 위한 모형시험 방안 연구", 대한조선학회논문집, 제42권, 제2호, pp 98-104.
- Amerongen, J.van and Udink, T.C.A.J. (1975). "Model Reference Adaptive Autopilots for Ships", *Automatica*, Vol 11, pp 441-449.
- Bech, M.I. (1972). "Some Aspects of the Stability of Automatic Course Control of Ships", *Journal of Mechanical Engineering Science (supplementary issue)*, Vol 14, No 7, pp 123-131.
- Bu, R., Liu, Z. and Li, T. (2007). "Nonlinear Sliding Mode Berthing Control of Underactuated Surface Ships", 2007 IEEE International Conference on Control and Automation (2007 ICCA), Guangzhou, pp 1371-1376.
- Burns, R.S. (1989). "Application of the Riccati Equation in Control and Guidance of Marine Vehicles", *IFAC Proc. Workshop on the Riccati Equation in Control, Systems, and Signals*, Italy, pp 7.
- Fossen, T. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., pp 307-321.
- Fossen, T. (2002). *Marine control Systems*, 1th ed., Marine Cybernetics.
- Hasegawa, K. and Kitera, K. (1993). "Automatic Berthing Control System Using Network and Knowledge-base", *Journal of Kansai Society of Naval Architecture of Japan*, pp 144-153.
- Im, N. and Hasegawa, K. (2002). "Motion Identification using Neural Networks and Its Application to Automatic Ship", *Journal of Ship and Ocean Technology*, pp 16-26.
- Koyama, T., Yan J. and Huan, J.K. (1993). "A Systematic Study on Automatic Berthing Control(1st Report)", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol 162, pp 201-210 (in Japanese).
- Le Minh-Duc, Nguyen, S.H. and Nguyen, L.A. (2003). "Sliding mode control for harbor maneuvering of large ships", *SICE 2003 Annual Conference*, Vol 3, pp 2635- 2640.
- Lu, X.R., Jiang, J.H. and Huang, Y.X. (1990). "Design of a Self-Tuning Adaptive Track-Keeping Control System for Ships", *Proc. International Conference on Modelling and Control of Marine Craft*, Exeter, UK, pp 178-192.
- Matsumoto, N. and Yumuro, A. (1987) "Prediction of Ship Manoeuvrability and its Application - Chapter 3 : Interference Effects of Hydrodynamics between Hull, Rudder and Propeller", *Society of Naval Architects of Japan, the Fourth Manoeuvrability Symposium*, pp 93-132.
- Ohtsu, K., Takai, T. and Yoshihisa, H. (1991). "A Fully Automatic Berthing Test Using the Training Ship Shioji Maru", *The Journal of Navigation*, Vol 44, No 2, pp 213-223.
- Rios-Neto, A. and Da Cruz, J.J. (1985). "A Stochastic Rudder Control Law for Ship Path-Following Autopilots", *Automatica*, Vol 21, No 4, pp 371-384.
- Sutton, R., Roberts, G.N. and Taylor, S.D.H. (1997). "Tuning fuzzy ship autopilots using artificial neural networks", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol 19, No 2, pp 94-106.
- Slotine, J.J. and Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall.
- Yoshimura, Y. (1986) "Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water", *The Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, Vol 200, Japan, pp 41-51.
- Yoshimura, Y. (1988) "Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water (2nd Report) - Mathematical Model at Slow Forward Speed -", *The Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, Vol 210, Japan, pp 77-84.
- Yamato, H., Uetsuki, H. and Koyama, T. (1990). "Automatic Berthing by the Neural Controller", *Proc. 9th Ship Control Systems Symposium (9th SCSS)*, Bethesda, MD, USA, Vol 3, pp 183-201.
- Yamato, H., Koyama, T. and Nakagawa, T. (1993). "Automatic Berthing Using the Expert System", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol 174, pp 327-337 (in Japanese).
- Zhang, Y., Hearn, Grant E. and Pratyush, S. (1997). "A Multi variable Neural Controller for Automatic Ship Berthing", *Control Systems Magazine, IEEE*, Vol 17, pp 31-45.

2007년 7월 9일 원고 접수

2008년 3월 28일 최종 수정본 채택