



선박자동접안을 위한 최적 추종 제어계 설계에 관한 연구

A Study on the Optimal Tracking Control System Design for Automatic Ship Berthing

김경현* · 김병각** · 김영복***†

Kyong-Hyon Kim*, Byong-Gak Kim** and Young-Bok Kim***†

(Received 14 May 2018, Revision received 02 June 2018, Accepted 04 June 2018)

Abstract: In this study, a control system design method for realizing automatic ship berthing in the harbour area is considered. In general, the control system for berthing have been issued as a simple root tracking problem without complex harbour environment. The harbour is crowded with many ships such that the berthing root to the quay side is too complex and not easy to approach there. Therefore, in this study, the authors set the berthing root to two approaching modes which are defined as the ballistic and final phase. In the ballastic mode, the vessel moves using all actuators. And in the final mode, the vessel uses two side thrusters for keeping it in parallel moving. For obtaining good root tracking performance without tracking error in the steady state, a servo-system with an integrator is designed based on LMI approach. Simulation results using a vessel model are given such that the specified control performance is verified.

Key Words : Automatic ship berthing, Root tracking, Complex harbour environment, Quay side, Two approaching modes

1. 서 론

제어계측기술의 발전에 힘입어 특수 목적선에 국한되었던 무인화 기술이 이제는 일반 상용선에 도 적용이 가능한 수준에 이르렀다. 항만을 벗어난 외항환경에서는 자동운항모드로 운항이 가능한지는 오래전이다. 그러나 항내로 진입하게 되면 선박왕래가 빈번하지 않다 하더라도 접안지점으로 완전하게 정박하기까지는 너무나도 복잡하고

어렵다. 특히 규모가 큰 화물선이나 크루즈선의 경우는 규모만큼이나 접안을 위한 어려움도 커진다. 사이드 스러스터나 회전이 가능한 추진장치(Azimuth type propulsion system)를 갖추었다 하더라도 선박운동을 정교하게 제어하면서 특정되어진 접안위치에 선박을 접근시키는 것은 지극히 힘든 작업이다. 이러한 문제를 해결하고자, 지금까지 접안을 위한 다양한 이론 및 응용기술에 관한 연구가 진행되었고 각각은 차별화된 전략과

***† 김영복(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과

E-mail : kpijwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

*김경현 : 부경대학교 대학원 기계시스템공학과

**김병각 : 부경대학교 평생교육원

***† Young-Bok Kim(Corresponding author) : Department of

Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail: kpijwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

*Kyong-Hyon Kim : Department of Mechanical System

Engineering, the Graduate School, Pukyong National University.

**Byong-Gak Kim : Pukyong National University.

내용을 주장하고 있다.¹⁻⁶⁾ 그러나 대부분은, 접안 지점에 다른 선박이 접안해 있지 않은 단순한 상황을 전제로 하고, 접안루트를 설정한 후 일방적으로 접근해 가는 문제를 다루고 있다. 전용 항만이 아닌 경우를 제외하면, 전술한 것과 같은 환경은 거의 존재하지 않는다. 또한 선박이 안벽으로 접근함에 따라 선박과 안벽 간에는 복잡한 형태의 유체력이 작용하여 정교하게 선박운동을 제어하기가 어렵다. 그래서 아직도 최종접안 단계에서는 터그보트 및 펜더 등의 도움이 필요한 것이 현실이며, 이러한 상황을 고려한 연구결과도 보고되어 있다.⁷⁻¹³⁾ 또한 로우프 등의 장력제어를 통해 선박 및 수상구조물의 위치제어에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.^{4,17)} 이러한 연구는 접안을 위한 선박운동제어시스템 구축에 필요한 기반이 된다. 대형선박에 비해 상대적으로 운동제어가 용이한 중소형 선박의 경우에는 사이드 스텔러 등의 부가적인 장치를 활용하여 조종성능을 극대화시킴으로써 무인화 운전이 가능하다. 두기의 사이드 스텔러를 이용한 접안방법에 대한 연구결과도 있으나, 이것은 최종접안단계에서 평행이동만으로 작업을 완료하는 것으로, 접안을 위한 완성된 운동모형을 제시하지 않았고 실제 접안환경 등을 고려하지도 않았다.¹⁸⁾ 이와 같이 안전하고 신속한 접안을 위한 문제를 해결하기 위해 많은 노력이 지금까지도 지속되고 있다.

그러나 이러한 세계적 추세에도 불구하고, 자율운항선박 운용에 필요한 국내기술수준은 아직 초보적 단계에 머물고 있다. 따라서 본 연구에서는 사이드 스텔러 및 이지무스 추진장치 등 비교적 양호한 조종성능을 갖춘 선박의 정교한 운동제어를 위한 제어계 설계문제에 대해 고찰한다. 제어대상선박은 두기의 사이드 스텔러와 이지무스 주 추진장치를 갖추고 있는 실제 선박의 축소모델이다. 특히 접안을 위해서는 항내에서의 정교한 운동제어가 필요한 점을 고려하여, 최종접안 지점까지의 경로를 두 개 영역으로 나눈다. 즉 제어대상 선박이 접안해야 할 지점 앞과 뒤에 이미 다른 선박이 접안해 있는 등의 일반적인 상황을 고려하여, 직진구간과 평행이동구간으로 나눈다.

이러한 경로추종과정에서 추종오차를 최소화하기 위해 제어기는 적분기를 포함한 서보계를 최적제어기법에 따라 설계한다. 시뮬레이션을 통해 설계된 제어기의 유효성을 검토하고, 향후 진행될 실험적 연구의 기초연구로 활용하고자 한다.

2. 문제설정

1990년대 초반부터 접안을 위한 선박운동제어 문제가 연구과제로 관심을 받기 시작했다. 선박 접안은 인간경험과 제어공학기술의 융합으로 수행되는, 정교함이 요구되고 충돌위험이 상존하는 절차 중의 하나라고 할 수 있다. 이러한 어려움은 다음에 기술하는 세 가지 요인으로부터 만들어진다 할 수 있다. 첫째, 접안은 저속에서 수행되므로 낮은 수심으로 인해 운동제어성은 감소하는 반면, 바람이나 파도, 조류와 같은 환경변화에 의한 영향을 크게 받는다. 둘째, 주 추진장치 및 러더조종으로 인한 선박운동예측이 쉽지 않으며, 셋째로는 항내를 출입하거나 정박하고 있는 선박들과의 상호작용은 접안작업을 더욱 어렵게 만들게 된다. 이러한 이유로 선박의 자동접안은 아직도 도전적인 과제로 남아 있다 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 터그보트 등의 지원을 받는 일반적인 접안과정을 고려하여, Fig. 1에서와 같이 새로운 접근법을 제안한다. Ballistic phase에서는 설명한대로 최적경로를 설정하고 추종하는 제어계 설계법을 적용할 수 있다. 그리고 Final phase에서는 선박간 및 안벽과의 충돌을 방지하도록 가능한 두기의 스텔러만으로 선박운동을 제어한다.

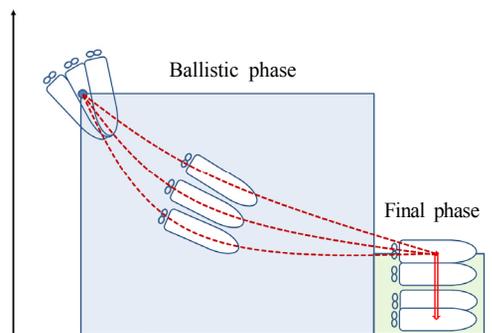


Fig. 1 A ship berthing routes in the harbour site

3. 제어대상 표현

Fig. 2에, 본 연구에서 제어대상으로 하고 있는 선박의 파일럿 모델을 나타내고 있으며, Fig. 3은 선박운동특성분석과 시스템 모델링을 위한 개념도를 나타내고 있다. 그림에 나타난 것과 같이 선박 선수 및 선미측에 바우(bow), 스텐(stern) 스러스터를 각각 장착하였다. 그리고 선미측에는 주추진장치로 이지무스 추진장치를 장착하고 있으며, 선박의 제원은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

Fig. 2의 제어대상 선박에 대한 동적특성을 표현하고 분석하기 위해, 선박운동에 대한 기초이론에 대해 간략하게 정리하도록 한다.

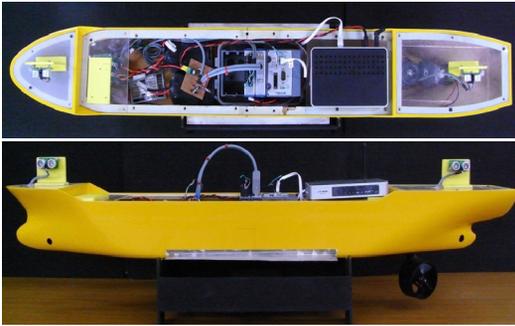


Fig. 2 Photos of the scaled vessel

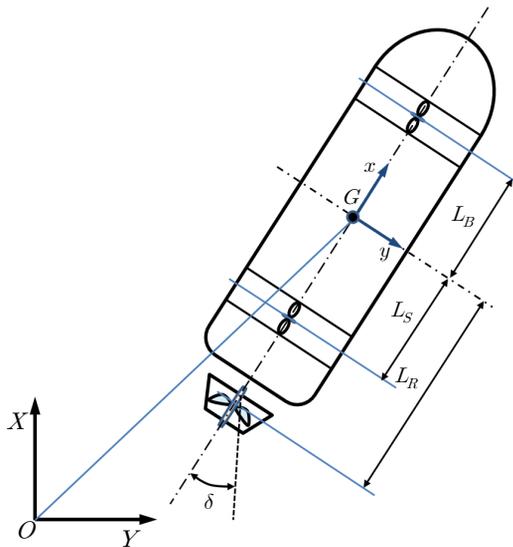


Fig. 3 System description of the controlled ship

Table 1 Specification of the vessel for experiment

Parameter	Value
Length overall	1.10[m]
Breadth	0.15 [m]
Draft	0.05 [m]
Number of Propeller	1 set
Numbers of side thruster	2 set
L_B	0.48[m]
L_S	0.40[m]
L_R	0.34[m]

본 논문에서 고려하는 선박은 무게 및 회전중심도 좌표중심 근처에 있고, XY 평면에서 서로 대칭이라고 가정한다. 그러면 선박운동방정식은 다음과 같은 일반적인 선형모델로 나타낼 수 있다.¹⁹⁾

$$\begin{aligned} M\dot{\nu} + D\nu &= \tau, \\ \dot{\eta} &= R(\psi)\nu. \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $M \in R^{3 \times 3}$ 은 관성행렬이고, $D \in R^{3 \times 3}$ 는 댐핑행렬로 각각 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v - Y_r & -Y_r \\ 0 & -N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}, \\ D &= \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_r \\ 0 & -N_v - N_r \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 Y_r, N_v, Y_r, N_v 는, 선속, 방향전환속도가 느린 경우에는 일반적으로 무시한다. 이럴 경우 식 (2)의 행렬은 대각행렬로 간단하게 표현된다.

그리고 $\eta = [x, y, \psi]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표(Earth Fixed Frame)에서의 관성위치 및 각도를 표현하는 변수이다. 또한 $\nu = [u, v, r]^T \in R^3$ 는 선체 고정좌표(Body Fixed Frame)에서의 서지(surge), 스웨이(sway) 및 요우(yaw)방향 속도를 나타낸다. 그리고 $R(\psi)$ 는 선박좌표를 관성좌표로 변환시키는 변환행렬로 다음 식과 같다.

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

선박에 작용하는 서지, 스웨이, 요우방향의 외력 및 모멘트 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in R^3$ 는 바우, 스텐 스러스터 및 주추진장치로부터 생산되며, 이것은 다음 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= T_P + T + \Delta u, \\ \tau_2 &= T_B + T_S + N + \Delta v, \\ \tau_3 &= T_B L_B - T_S L_S + N L_R + \Delta r. \end{aligned} \quad (4)$$

제어대상 선박의 운동특성을 표현하고 있는 Fig. 3과 식 (2)와 식 (4)에서, 각 파라미터는 다음과 같이 정리한다.

$O(x_0, y_0)$: 공간고정좌표계

$G(x, y)$: 선체고정좌표계

m : 선체질량

I_z : 선체의 z 방향 관성모멘트

X_u, Y_v, Y_r, Y_p : 부가질량

N_v, N_r : 부가관성모멘트

u, v : x, y 방향 속도성분

ψ : 선수방위각

T_P : 아지무스 프로펠러 추력

N, T : 아지무스 프로펠러의 직압력 및 평행력

T_B, T_S : 바우 및 스텐 스러스터 추력

L_B, L_S, L_R : 각 스러스터 및 주추진장치 중심

에서 선박무게중심까지 거리

δ : 주추진장치 회전각도 (타각도)

$\Delta u, \Delta v, \Delta r$: 정의되지 않는 불확실성 (외란, 파라미터 불확실성 등)

식 (1) 및 (2)에 나타난 수식모델에서의 물리파라미터는 수조실험을 통해 구하였다. 이때 선박의 운항속도와 방향전환속도가 느리다면, 식 (2)의 행렬은 대각행렬로 나타내어도 된다. 따라서 실험을 통해 동정한 식 (2)의 행렬식은 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 10.03 & 0 \\ 0 & 0 & 1.19 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 2.70 & 0 \\ 0 & 0 & 0.08 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 M_{11}, D_{11} 은 \mathbf{M}, \mathbf{D} 의 요소중에서 상대적으로 파라미터 변화 폭이 크다. 따라서 그 변동범위를 실험을 통해 측정하고 제어기 설계시에 반영하고자 한다. 결국 수차례 실험을 통해 변동범위는 $0.18 \leq M_{11} \leq 0.22, 0.72 \leq D_{11} \leq 0.89$ 와 같이 측정되었다.

그리고 추진장치(스러스터 및 주추진장치)의 동적특성은 단순한 선형관계식으로 표현한다. 즉 액추에이터에 인가되는 구동전압에 대한 추력(토크) 관계로 근사화하여 표현한다. 이것 또한 수차례의 실험을 통해 구하였으며, 대표성을 가질 수 있도록 평균값을 계산하여 결정하였다. 즉 식 (4)에서 추진장치의 추력을 나타내는 T_B, T_S, T_P 는

$$\begin{aligned} T_B &= 0.18 V_B, \\ T_S &= 0.26 V_S, \\ T_P &= 0.21 V_P \end{aligned} \quad (6)$$

과 같고, 이때, V_B, V_S, V_P 는 각각 바우, 스텐 및 주추진장치 구동전압을 나타낸다. 그리고 식 (4)에서 N 과 T 는 주추진장치를 회전할 때, 추진장치 중심선과 수직방향에 작용하는 압력(직압력), 평행하게 나타나는 힘(평행력)을 각각 나타내며, 다음 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} N &= k_u \frac{\delta}{\delta_{\max}} \cdot \max(T_P, \delta=0), \\ T &= k_v \frac{\delta}{\delta_{\max}} \cdot \max(T_P, \delta=0). \end{aligned} \quad (7)$$

이때, $\max(T_P, \delta=0)$ 는 주추진장치의 회전각도가 0[deg] 일 때의 최대추력을 나타낸다.

여기서, k_v, k_u 는 추정해야 할 상수값이며, $\max(T_P, \delta=0)$ 는 주추진장치의 최대추력이다. k_v, k_u 값은 실험적 방법으로 추정하기 위해 주추

진장치를 최대출력상태로 해 두고, 추진장치의 회전각도를 0 deg에서 30 deg까지 변경해 가면서 서지 및 스웨이방향 추진력분포를 계측하였다. 결국 각각은 $0.73 \leq k_v \leq 2.78$, $0.65 \leq k_u \leq 1.61$ 의 범위의 값으로 계측되었다. 이것으로부터, 식 (5) 및 식 (7)에 포함된 불확실한 파라미터를 공칭값(nominal value)과 불확실성의 크기로 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_0 \pm \Delta_m, \\ D_{11} &= D_0 \pm \Delta_d. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} k_v &= k_{v0} \pm \Delta_v, \\ k_u &= k_{u0} \pm \Delta_u. \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, M_0, D_0, k_{v0}, k_{u0} 는 각각의 공칭값, $\Delta_m, \Delta_d, \Delta_v, \Delta_u$ 는 파라미터 변동의 크기로 나타낸 것이다. 이때 공칭값을 변동의 평균값으로 선정하면, 식 (8) 및 식 (9)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} M_{11} &= 0.20 \pm 0.02, \\ D_{11} &= 0.81 \pm 0.09. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} k_v &= 1.76 \pm 1.03, \\ k_u &= 1.13 \pm 0.48. \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10) 및 식 (11)의 표현은 로버스트 제어기 설계법에 기반한 제어기 설계시에 이용된다.

4. 제어력분배 및 제어기 설계

본 연구에서는 제어대상 선박이 설정된 경로를 잘 추종하면서, 최종 목표위치에 오차없이 도달하도록 하는데 제어기 설계 목표를 두고 있다. 이를 위해서는 추종오차를 최소화 할 수 있는 서보계(servo-system) 설계가 필요하다. 그리고 본 연구에서 제어변수는 서지, 스웨이 및 요우각도로 3개를 설정하였다. 그런데 제어대상 선박에 장착한 액추에이터는, 두기의 사이드 스러스터, 주추진장치와 러더에 해당되는 주추진장치 회전각도 조절장치로 4개이다. 즉 제어변수보다 액추에이터 수가 많다. 이러한 경우는 DP(Dynamic Positioning) 시스템

에서 흔히 찾아볼 수 있는 일반적인 시스템 구성으로 제어력분배(Control Allocation)를 통해 대응이 가능하다. 따라서 본 연구에서도 Fig. 4와 같이, 제어기에서 계산된 제어신호(τ_c)를 제어력분배를 통해 액추에이터에 전달하는 방법을 도입한다. 그림에서 $f_i (i=1, \dots, 4)$, δ_c 는 사이드 스러스터 및 주추진장치 회전각도를 제어하기 위한 제어입력을 나타낸다. 그리고, τ_a 는 액추에이터를 통해 발생하는 실제 선박운동(x, y, ψ)을 제어하기 위한 제어입력이다.

이제 본 연구에서의 목표인 추종오차를 최소화 하는 서보계 설계 문제에 대해 간단히 설명하도록 한다. 최종적으로 구성되는 서보계는 Fig. 5와 같고, 계단상 입력이나 외란으로 인해 발생하는 추종오차를 없애도록 적분기를 포함하고 있다.

여기서 K_w, K_f 는 적분기 이득 및 상태피드백 이득이며, 최적제어이론에 따라 최적의 제어성능을 확보할 수 있는 것으로 설계한다. 이때 외란이 존재하지 않을 경우 Fig. 5의 서보계는

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ \dot{w}_e &= e = r - Cx, \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (12)$$

와 같이 표현되므로, $u = -K_{fw} = [-K_f - K_w]$ 라 두면, 식 (12)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{w}_e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BK_f & BK_w \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \\ y &= [C \ 0] \begin{bmatrix} x \\ w_e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

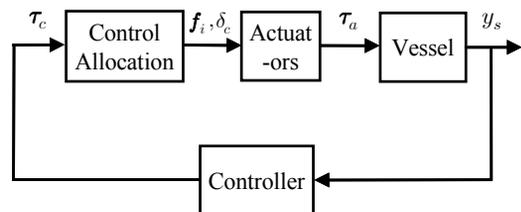


Fig. 4 Extended control allocation problem with actuators

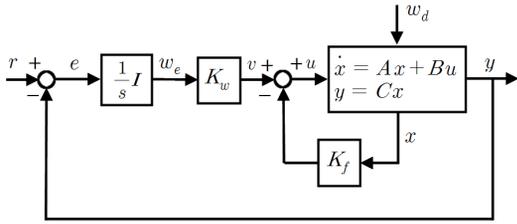


Fig. 5 A servo-system with an integrator to reject step type input signals

Fig. 5에 나타낸 제어계의 설계목표는 정상상태에서 오차 $e = r - Cx$ 가 '0'이 되도록 하는 이득 K_f, K_w 를 결정하는 문제이다.

단, 식 (10) 및 식 (11)에 정의한 파라미터 변동을 고려하여 강인성(robustness)을 확보하도록 제어기를 설계한다. 이럴 경우, 식 (13)의 서보계에서 식 (8)~(11)과 같이 파라미터 변동이 영향을 미치는 행렬을

$$A_s(\Delta) = \begin{bmatrix} A(\Delta) - B(\Delta)K_f & B(\Delta)K_w \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

(where, $\Delta \in \{\Delta_m, \Delta_d, \Delta_v, \Delta_u\}$)

와 같이 표현하면, 이것은 다시 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_s(\Delta) = \sum_{j=1}^k \kappa_j A_{s_j}, \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^k \kappa_j = 1, \kappa \geq 0.$$

본 연구에서는 기본적으로는 LQ 제어이론에 따라 이득을 구한다. 이때 식 (15)의 표현으로부터 하나의 리카티(Riccati) 방정식으로 제어기 이득을 구하지 않는다. 즉 모든 파라미터 변동범위에서 시스템의 안정성이 확보되어야 하므로 다음의 부등식

$$PA_{s_j} + A_{s_j}^T P < 0, (j = 1, \dots, 16) \quad (16)$$

를 만족하는 $P = P^T (> 0)$ 를 구하면 각각의 제어기 이득은 자동적으로 구해진다. 즉 LQ 제어이

론에 기초를 두고, 리카티 방정식을 부등식으로 변환하여, LMI(Linear Matrix Inequality)기법으로 강인성과 제어성능을 동시에 만족하는 제어기 이득을 구할 수 있다.

결국 MatLab LMI 툴을 이용하여 상태 피드백 이득과 적분기 이득을 각각 다음 식과 같이 구하였다.

$$K_f = \begin{bmatrix} 207.02 & 0 & 0 & 29.60 & 0 & 0 \\ 0 & 47.14 & -0.01 & 0 & 50.39 & -0.01 \\ 0 & -0.01 & 132.84 & 0 & 0 & 54.42 \end{bmatrix},$$

$$K_w = \begin{bmatrix} 12.04 & 0 & 0 \\ 0 & 2.38 & -0.01 \\ 0 & -0.01 & 4.78 \end{bmatrix} \quad (17)$$

5. 시뮬레이션 평가

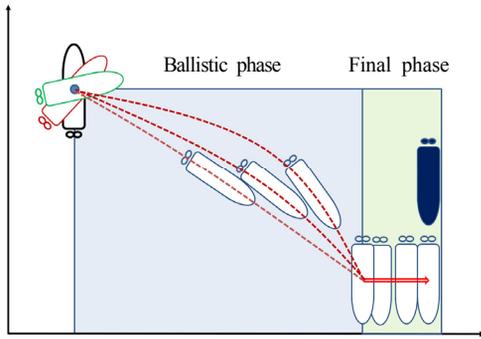
4장에서 소개한 제어기 설계방법에 따라 설계된 식 (17)의 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 스러스터와 주추진장치로, 대상선박을 접안 지점 부근까지 이동시킨 후, 마지막 접안지점인 안벽까지는 평행하게 이동시켜 접안작업을 완성하도록 한다. 이것은 터그보트의 지원으로 접안작업을 수행하는 현재의 작업방법과 유사하다.

먼저, 본 연구에서는 접안경로를 Fig. 1과 유사하게, Fig. 6 (a)와 같이 두 단계로 설정하였다. 출발점에서의 선박위치는 $(x_0, y_0) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, 선수각(ψ_0)은 0 deg로 설정하였다. 이 상태에서 출발하여 선박위치가 $(x_b, y_b) = (-8 \text{ m}, 10 \text{ m})$, 선수각(ψ_b)이 180 deg가 되면 일차 접안단계인 Ballastic 과정은 종료된다.

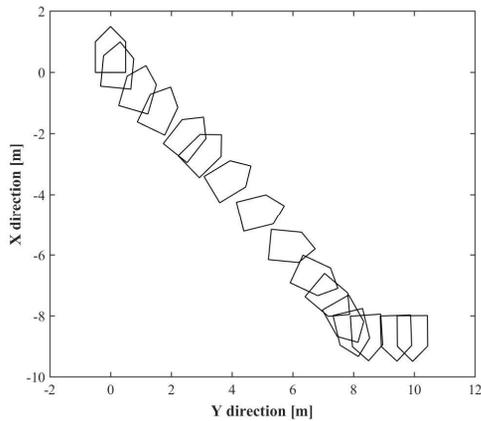
Ballastic 종료지점에서, 다시 평행으로 이동하여 최종 접안위치 $(x_{final}, y_{final}, \psi_{final}) = (-8 \text{ m}, 10 \text{ m}, 180 \text{ deg})$ 에 도달하게 되면 주어진 접안작업이 완전히 종료된다.

이와 같은 설정 아래, 시뮬레이션을 실행하였다. 먼저 Fig. 6 (b)는 제어대상 선박이 초기위치 $(x_0, y_0, \psi_0) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ deg})$ 에서 출발하여, Ballastic 과정 종료단계인 $(x_b, y_b, \psi_b) = (-8 \text{ m},$

10 m, 180 deg) 지점을 거쳐, 최종위치에 도달하기까지의 추종특성을 나타내고 있다. 초기상태에서 최종적으로 접근해야 할 위치까지 잘 추종해가고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 7과 Fig. 8은 선박이 Fig. 6과 같이 경로추종을 수행하는 과정에서의 선박 및 액추에이터의 운동특성을 보다 상세하게 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 7은 경로추종 과정에서의 서지, 스웨이 및 요우운동특성을 각각 나타내고 있다. 그리고 Fig. 8은 선박운동을 제어하기 위해 각 액추에이터에 인가되는 구동전압을 나타내고 있다. 전술하였듯이 제어대상 선박에는 두기의 스러스터, 하나의 주추진장치와 회전각도를 조절하기 위한 구동장치로 구성되어 있다.



(a) target tracking root

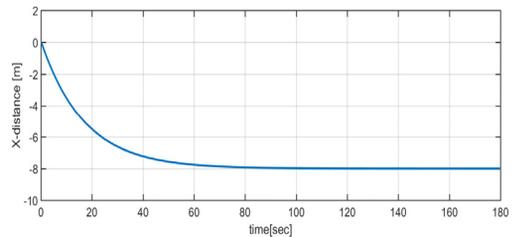


(b) root tracking simulation result

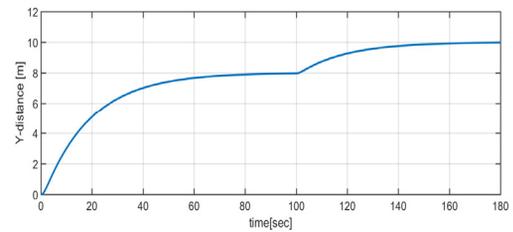
Fig. 6 Tracking performance of the controlled ship (start position : (0 m, 0 m, 0 deg), final position : (-8 m, 10 m, 180 deg)

Fig. 8에서 (a)는 주추진장치 구동전압, (b)는 바우 스러스터 구동전압, (c)는 스텐 스러스터 구동전압, (d)는 러더 구동전압을 각각 나타내고 있다. 각 액추에이터 구동전압은 ± 20 V 이하이다. 이것은 실험용 선박에 장착된 액추에이터의 허용전압 크기를 고려하여 제어기를 설계한 결과로, 향후 진행될 실험에서 하드웨어적인 문제가 없도록 설계하였다.

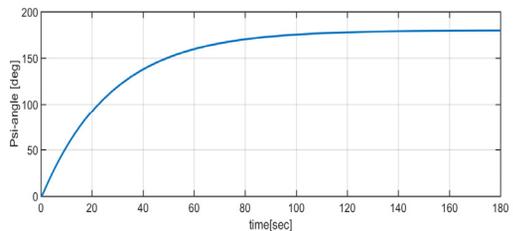
결론적으로 각 액추에이터 및 선박운동의 적절한 제어를 통해 임의의 지점에서부터 목표지점까지 선박을 안전하고 정확하게 이동시킬 수 있음을 확인하였다.



(a) surge motion

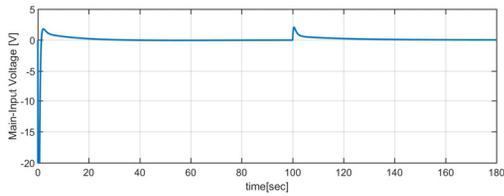


(b) sway motion

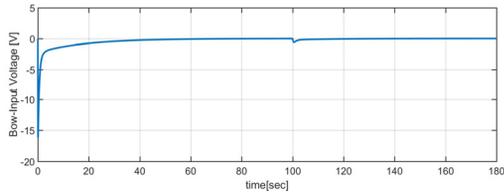


(c) yaw motion

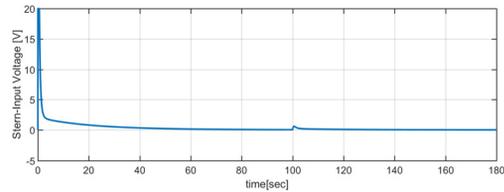
Fig. 7 Ship motions during tracking the given target route



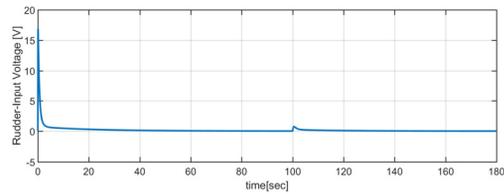
(a) control power input to the main propeller [V]



(b) control power input to the bow thruster [V]



(c) control power input to the stern thruster [V]



(d) control power input to the rudder [V]

Fig. 8 Control power signals for the actuators

5. 결 론

본 연구에서는 비교적 우수한 운동제어 특성을 가진 선박의 운동제어 문제에 대해 고찰하였다. 즉, 두기의 사이드 스티어와 하나의 아지무스형 주추진장치를 갖춘 선박을 제어대상으로 하여, 고정도 제어성능을 확보하도록 제어를 설계하였다. 본 연구에서의 선박운동제어시스템 설계목표는 항만내에서 정교한 운동제어를 통해 안전하고 신속한 접안작업을 수행하기 위한 것이다. 그러나 항내 접안환경은 복잡하고 위험하여 Auto-pilot 개념과는 다른 방법으로 접근해야 한다. 그

래서 본 연구에서는 접안경로를 Ballistic 과정과 Final 과정으로 구분하고, 안전하고 신속하게 접안이 가능하도록 제어를 설계하였다. 특히 파라미터 변동에 대한 강인 안정성과 강인추종성능을 동시에 확보하기 위해 강인 제어기 설계법에 기초하여 제어를 설계하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제어전략 및 제어기법 등의 유효성을 검증하였다.

자율운항선박관련 기술에 관한 관심도가 고조되고 있는 국내의 상황을 고려할 때, 본 연구결과가 관련기술 발전에도 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (Ministry of Education) (No. NRF-2015R1D1A1A09056885).

References

1. H. Hasegawa and T. Fukutomi, 1994, "On Harbour Maneuvering and Neural Control System for Berthing with Tug operation", Proc. 3th International Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft, UK, pp. 197-210.
2. Y. Zhang, G. E. Hearn and P. Sen, 1997, "A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing", Journal of IEEE Control System, Vol. 17, No. 4, pp. 31-45. (DOI:10.1109/37.608535)
3. N. Aksaka and M. Yamamoto, 1999, "Design Method of Ship's Track Keeping Control System and Verification by Field Test", Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 35, No. 7, pp. 934-942. (DOI:10.9746/sicetr1965.35.934)
4. J. Y. Park and N. W. Kim, 2014, "Design of an Adaptive Backstepping Controller for Auto-

- berthing a Cruise Ship Under Wind Loads", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 347-360. (DOI:10.2478/ijnaoe-2013-0184)
5. V. S. Nguyen, V. C. Do and N. K. Im, 2018, "Development of Automatic Ship Berthing System Using Artificial Neural Network and Distance Measurement System", International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 41-49. (DOI:10.5391/ijfis.2018.18.1.41)
 6. V. P. Bui, H. Kawai, K. S. Lee and Y. B. Kim, 2011, "A Ship Berthing System Design with Four Tug Boats", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 25, No. 5, pp. 1257-1264. (DOI:10.1007/s12206-011-0215-4)
 7. V. P. Bui and Y. B. Kim, 2011, "Design of Sliding Mode Controller for Ship Position Control", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 17, No. 9, pp. 869-874. (DOI:10.1109/iceceng.2011.6057045)
 8. V. P. Bui and Y. B. Kim, 2011, "Development of Constrained Control Allocation for Ship Berthing by Using Autonomous Tugboats", International Journal of Control Automation and Systems, Vol. 9, No. 6, pp. 1203-1208. (DOI:10.1007/s12555-011-0622-4)
 9. V. P. Bui and Y. B. Kim, 2012, "A Study on the Development of Dynamic Positioning System for Barge Type Surface Vessels", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 66-74. (DOI:10.9726/kspse.2012.16.2.066)
 10. K. H. Choi and Y. B. Kim, 2012, "A Study on the Robust Stability and Stabilization Problem for Marine Vessel", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 5, pp. 379-385. (DOI:10.5394/kinpr.2012.36.5.379)
 11. S. W. Ji, V. P. Bui, B. Balachandran and Y. B. Kim, 2013, "Robust Control Allocation for Marine Vessel", Ocean Engineering, Vol. 63, pp. 105-111. (DOI:10.1016/j.oceaneng.2013.02.004)
 12. J. S. Jang and Y. B. Kim, 2012, "Nonlinear Observer Design for Dynamic Positioning Control of a Surface Vessel", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 79-85. (DOI:10.9726/kspse.2012.16.6.079)
 13. S. W. Ji, T. Y. Jeong and Y. B. Kim, 2013, "A Control Allocation Strategy Based on Multi-Parametric Quadratic Programming Algorithm", Journal of the Korean Society of Fisheries Technology, Vol. 49, No. 2, pp. 153-160.
 14. Y. B. Kim, 2013, "A Positioning Mooring System Design for Barge Ship Based on PID Control Approach", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 94-99. (DOI:10.9726/kspse.2013.17.5.094)
 15. Y. B. Kim, 2014, "A Study on the Control System Design for Ship Mooring Winch System", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 3, pp. 1065-1072. (DOI:10.1007/s12206-013-1181-9)
 16. S. W. Ji, M. S. Choi and Y. B. Kim, 2015, "A Study on Position Mooring System Design for the Vessel Moored by Mooring Lines", IEEE-ASME Transactions On Mechatronics, Vol. 20, No. 6, pp. 2824-2832. (DOI:10.1109/tmech.2015.2407612)
 17. A. M. Tran, S. H. Jeong, J. I. Yoon and Y. B. Kim, 2016, "Vessel Motion Control Using Rope Tension Control Strategy", International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 915-923. (DOI:10.1007/s12555-015-0046-7)
 18. V. P. Bui, J. S. Jeong, Y. B. Kim and D. W. Kim, 2010, "Optimal Control Design for Automatic Ship Berthing by Using Bow and Stern Thrusters", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 24, No. 2, pp. 10-17.
 19. T. I. Fossen, 2002, Marine Control System : Guidance, Navigation, Rigs and Underwater Vehicle, Trondheim, Norway, Norwegian University of Science and Technology.