

예선 연계 바지선 운동제어전략과 강인제어계 설계에 관한 연구 A Study on Motion Control Strategy and Robust Control System Design for a Barge Ship with Tugboats

이동훈* · 김영복* · 김창우***†

Dong-Hun Lee*, Young-Bok Kim* and Chang-Woo Kim***†

(Received 12 July 2022, Revision received 18 August 2022, Accepted 18 August 2022)

Abstract : In this study, a motion control system design of barge-type surface ship is considered. The barge ships are used in numerous applications for a variety of purposes. Especially, in the ship building industries, heavy and huge equipment and assembly parts are carried by these ships. However, it is difficult to achieve desirable motion because the propulsion systems are not installed on it. Therefore, the assistance of several tugboats is necessary to guarantee safe and quick operations. So far, automatic control techniques have not been incorporated with these systems. Hence, in this study, a useful control strategy is suggested to provide a solution for this issue in order to obtain the desirable motion control performance. Accordingly, a motion control system configuration is presented, and a robust control is derived. The usefulness of proposed control system is verified by comparison study with LQ control. The various simulations are carried out to provide a better look at the performance of the barge ships while being controlled.

Key Words : Barge-type surface ship, Ship building, Propulsion system, Tugboat, Robust control

1. 서 론

본 논문에서는 바지선(barge)의 운동제어문제에 대해 고찰하고 있다. 바지선은 추진장치를 장착하지 않고 예선에 견인되는 형식으로 해상에서 이동하며, 일반 선박으로는 운반하기 어려운 크고

무거운 화물이나 장비를 운반하기 위해 주로 활용된다. 특히 추진장치를 갖지 않기 때문에 정확하고 신속한 운동특성을 확보하기는 어렵다. 예선에 의해 견인되거나 예선의 도움을 받는다 하더라도, 감각적이고 경험적인 방법에 의존하므로 작업속도는 더디고 안정성 확보도 쉽지 않다. 최근

*** 김창우(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3553-8383) : 교수, 한국해양수산연수원

E-mail : kimcw@seaman.or.kr, Tel : 051-620-5562

*김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

*이동훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

***† Chang-Woo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3553-8383) : Professor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology.

E-mail : kimcw@seaman.or.kr, Tel : 051-620-5562

*Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

*Dong-Hun Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

에는 DP 시스템(dynamic positioning system) 기술의 발전으로 수상선의 운동제어성능이 크게 개선되었다. 바지선에도 별도의 DP 시스템을 설치하여 운용하는 경우도 있으나 이것은 상당히 특수한 경우이며, 대부분 예선에 의존하는 형태로 작업이 수행된다.

예선을 이용한 선박의 운동제어문제에 대해서는 많은 연구결과가 보고되어 있다. 예를 들어 예선을 제어하여 선박을 안전하게 접안시키는 문제에 대한 연구결과가 도출되었는데,¹⁻³⁾ 이때는 선박의 추진력과 예선의 견인력을 적절히 조정하는 방법을 적용하였다. 예선뿐만 아니라 윈치시스템의 자동 조종을 통해 접안완료시점에서의 안정성과 신속성을 확보하는 방법도 제안되었다.⁴⁻⁷⁾ 또한 외항에서 화물을 적재한 바지선을 단순히 견인하는 과정에서의 운항안정성과 추종성능을 개선하고자 하는 연구결과도 보고되어 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 이러한 연구결과를 기반으로 본 연구에서는 예선의 도움을 받아야 하는 경우, 즉 적절한 위치에 예선을 배치하여 이것을 제어함으로써 바지선의 운동제어성능을 획기적으로 개선하기 위한 제어전략에 대해 고찰한다. 특히 바지선이 투입되는 작업환경으로 조선소를 고려하고 있으며, 이때는 좁은 공간에서 크고 무거운 적재물을 안전하게 운반하고 하역해야 하는데 한 예를 Fig. 1에 나타내었다.

작업자체가 조선현장이라는 비교적 양호한 해상환경에서 진행되지만 그렇다고 해서 작업과정이 결코 쉬운 것이 아니다. 더욱이 최종적으로는 부두 안벽 가까이 접근시켜야 하며, 이를 위해서는 상당히 정교한 작업과정이 필요하지만 아직까지 전근대적인 방법과 기술에 의존하고 있을 뿐이다. 결국 이동을 위한 모든 작업이 거의 수동적으로 이루어지기 때문에 속도보다는 작업안정성 확보에 집중할 수밖에 없다. 즉 작업과정을 포함한 작업완성도는 예선과 이를 조종하는 조종자의 역량에 전적으로 의존할 수밖에 없는 것이 현실이다. 이러한 상황이 현재까지 개선되지 못하는 데는 여러 가지 이유가 있다. 그 중에서도 예선기술이 차지하는 비중이 크지만 아직까지 예선의 추진시스템이 화석연료 기반의 엔진에 의존하고 있다는 것도 한 몫을 한다. 이와 같은 시스템은 자동적, 자율적인 이동을 위한 제어시스템의 적용

과 활용을 어렵게 하는 주된 요인이다. 그러나 최근에는 Fig. 2와 같이 자율운항 및 원격제어가 가능한 예선기술이 개발되어 실용화 단계에 이르렀다.¹¹⁾ 이러한 기술발전은 수동적 조종에 의한 전근대적 예선 활용기술을 획기적으로 개선할 수 있는 계기가 될 것이다.

그래서 본 연구에서는 예선과 모선을 하나의 시스템으로 간주하여 통합적으로 제어함으로써 모선을 신속하고 안전하게 목표위치에 이동시킬 수 있는 제어기술을 개발하는데 연구목표를 두고 있다. 특히 열악한 환경에서도 설정 경로를 오차 없이 추종하고, 도착지점에서도 외란의 영향을 강인하게 억제하면서 위치 유지가 가능한 제어계를 설계한다.

이를 위해 본 논문에서는 운동제어시스템의 강인 안정성(robust stability)과 제어성능을 확보하기 위해 H_{∞} 제어이론에 기반하여 제어기를 설계한다. 구체적으로는 불확실성에 강인하게 대처하면서도 위치제어성능을 확보할 수 있는 서보계를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어전략과 제어계의 유효성을 평가하도록 한다.



Fig. 1 Motion control of barge ship by tugboats



Fig. 2 An electric tugboat

2. 문제설정 및 모델링

2.1 제어전략 및 모델링

본 연구에서는 바지선을 모선으로 하고, 모선 제어를 위해 4척의 예선을 사용하는 경우를 고려한다. 바지선은 조선소 등에서 부분 제작된 조립품을 근거리 위치로 옮겨 선체조립을 완성하는 작업과정에 빈번하게 활용된다. 이 과정은 좁은 공간에서 조심스럽게 진행되므로 고도의 주의가 필요한 작업이다. 상당히 어려운 작업이므로 여러 척의 예선을 이용하는 것이 일반적이는데, 본 연구에서는 4척의 예선을 Fig. 3과 같이 배치하여 작업을 수행하는 경우를 고려한다. 이것은 바지선이 안벽 가까이 접근하는 시점부터는 예선이 안벽쪽에 위치할 수 없다는 상황을 고려한 것이다. 따라서 작업 시작단계부터 안벽 반대쪽에 모든 예선을 배치시켜 밀고 당기는 방법으로 바지선의 운동을 제어하는 것이 합리적이다.

그래서 Fig. 3의 시스템 구성도와 같이, 바지선을 모선으로 하고 4척의 예선을 액추에이터로 할 때 만들어지는 운동방정식은 구하여 제어시스템 설계를 위한 수식 모델을 구해야 한다.¹²⁾

먼저, Fig. 3에서 $F_i (i = 1, \dots, 4)$ 는 예선에 의한

모선 제어력을 나타낸다. 특히 F_1, F_2 는 예선과 모선을 로우프로 연결하여 끌어내는 힘을 나타내며, F_3, F_4 는 예선이 모선에 직접 접촉하여 미는 힘을 의미한다. 이때 미는 힘은 일정하게 설정하고 끄는 힘만의 제어를 통해 원하는 위치로 이동하고 정지시키는 것도 가능하게 된다. 이것은 하나의 예라 할 수 있으며, 완성된 수식모델을 이용하면 다양한 환경과 조건에서 다양한 방법으로 목표달성을 위해 효과적으로 대응할 수 있다.

따라서 Fig. 3의 표현을 기준으로 하여, 모선에 접촉하여 미는 힘 F_3, F_4 를 발생시키는 2척의 예선에 대한 운동방정식은 고려하지 않고, 모선과 모선을 끌어당기는 2척의 예선에 대한 운동방정식을 차례로 유도한다. 그리고 Fig. 3에서 (b)는 예선 발생추력 $F_{pi} (i = 1, 2)$ 과 견인력 $F_i (i = 1, 2)$ 와의 관계를 나타낸다. 전체시스템 표현을 위한 운동방정식을 도출하는 개략적인 과정¹²⁾에 대해 다음과 같이 소개한다.

2.2 바지선에 대한 모델링

Fig. 3에 나타난 것과 같이 제어대상선박은 추진장치 없이 예선에 의해 운동이 제어된다. 이것은 XY 평면에서 서로 대칭이고 무게 및 회전중

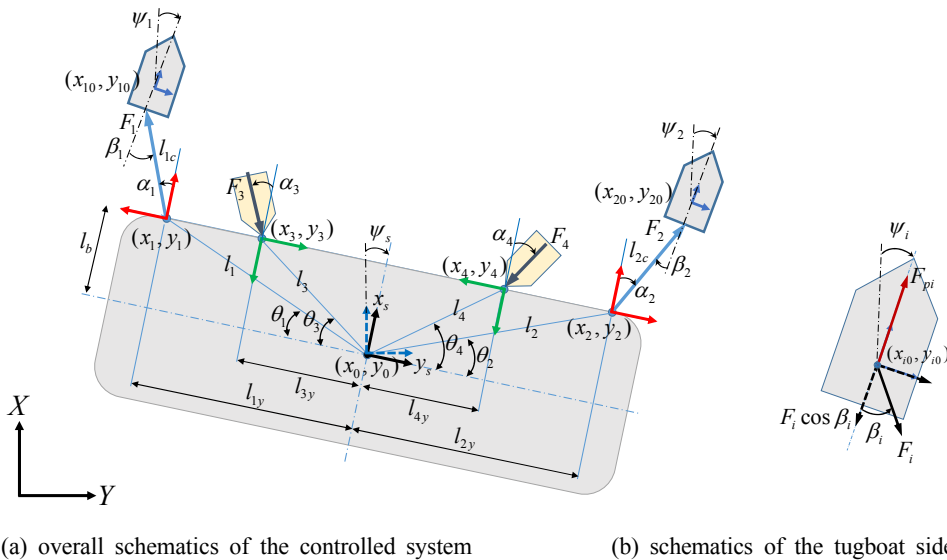


Fig. 3 Schematic diagram and coordinates setting for system modelling

심도 좌표중심 근처에 있다고 가정하면 선박운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.¹³⁾

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

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

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_s &= \begin{bmatrix} m_s - X_{u_s} & 0 & 0 \\ 0 & m_s - Y_{v_s} & -Y_{r_s} \\ 0 & -N_{v_s} & I_{z_s} - N_{r_s} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D}_s &= \begin{bmatrix} -X_{u_s} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{v_s} - Y_{r_s} \\ 0 & -N_{v_s} - N_{r_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 $\boldsymbol{\eta}_s = [x_0, y_0, \psi_s]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표 (Earth Fixed Frame)에서의 위치 (x_0, y_0) 와 각도 ψ_s 에 대한 관성위치이다.

또한 $\boldsymbol{\nu}_s = [u_s, v_s, r_s]^T \in R^3$ 는 선체고정좌표 (Body Fixed Frame)에서의 서지(surge), 스웨이 (sway) 및 요우(yaw)방향 속도를 나타낸다. 그리고 $\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}_s)$ 는 선박좌표를 관성좌표로 변환시키는 변환행렬로 다음 식과 같다. (단, $c(*) = \cos(*)$, $s(*) = \sin(*)$)

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}_s) = \begin{bmatrix} c\psi_s & -s\psi_s & 0 \\ s\psi_s & c\psi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

본 논문에서 사용되는 주요 파라미터는 다음과 같이 정리한다.

- m_s : 모선(바지선) 선체질량
- I_{z_s} : 선체의 z_s 방향 관성모멘트
- $X_{u_s}, Y_{v_s}, Y_{r_s}$: 부가질량
- N_{v_s}, N_{r_s} : 부가관성모멘트
- u_s, v_s : x_s, y_s 방향 속도 성분
- ψ_s, ψ_1, ψ_2 : 모선 및 예선 #1, #2의 선수각
- $\theta_i (i=1, \dots, 4)$: 모선 중심과 각 제어력 작용점이 이루는 각도

$\alpha_i (i=1, \dots, 4)$: 모선 선측 기준선과 예선에 의한 제어력이 이루는 각도

β_1, β_2 : 예선 중심선과 로우프 연결선이 이루는 각도

$\delta_i (i=1, 2)$: 예선#1, #2 러더 회전각

$l_{ic} (i=1, 2)$: 예선 #1, #2와 모선을 연결하는 로우프 길이

$l_i (i=1, \dots, 4)$: 모선 무게중심에서 각 제어력 작용점까지의 거리

l_b : 제어력 작용점과 무게중심과의 수직거리

$l_{iy} (i=1, \dots, 4)$: 제어력 작용점과 무게중심과의 수평거리

식 (1)의 운동방정식에서 $\boldsymbol{\tau}_s = [\tau_{sx}, \tau_{sy}, \tau_{sr}]^T$ 는 각각 서지(surge), 스웨이(sway)방향 힘과 요우모멘트 제어력을 나타내는데, Fig. 3으로부터 모선에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{cases} \tau_{sx} = F_1 c\alpha_1 + F_2 c\alpha_2 + F_3 c\alpha_3 + F_4 c\alpha_4 \\ \tau_{sy} = F_1 s\alpha_1 + F_2 s\alpha_2 + F_3 s\alpha_3 + F_4 s\alpha_4 \\ \tau_{sr} = F_1 (l_{1y} c\alpha_1 + l_b s\alpha_1) + F_2 (-l_{2y} c\alpha_2 + l_b s\alpha_2) \\ \quad + F_3 (l_{3y} c\alpha_3 + l_b s\alpha_3) + F_4 (-l_{4y} c\alpha_4 + l_b s\alpha_4) \end{cases} \quad (4)$$

힘에 대한 부호는 당기는 힘을 양으로, 미는 힘을 음으로 처리한다. 이것으로부터

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}) = \begin{bmatrix} c\alpha_1 & c\alpha_2 \\ s\alpha_1 & s\alpha_2 \\ (l_{1y} c\alpha_1 + l_b s\alpha_1) & (-l_{2y} c\alpha_2 + l_b s\alpha_2) \\ c\alpha_3 & c\alpha_4 \\ s\alpha_3 & s\alpha_4 \\ (l_{3y} c\alpha_3 + l_b s\alpha_3) & (-l_{4y} c\alpha_4 + l_b s\alpha_4) \end{bmatrix} \quad (5)$$

라 두면 식 (4)는 $\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{F}$ 와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $\mathbf{F} = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T$ 는 액추에이터인 4기의 예선으로부터 만들어지는 각각의 추력을 나타낸다. 제어기로부터의 제어신호를 각 액추에이터에 전달하기 위해서는 제어력분배(control allocation)가 필요하다. 이를 위해서는 다음 식과 같이 Pseudo-Inverse를 이용하는 것이 일반적이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha})^T \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha})^* \boldsymbol{\tau}_s \\ \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha})^* &= \{\mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha})^T\}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

즉, $B(\alpha)$ 가 정칙(nonsingular)이 아니기 때문에 이것의 Pseudo-Inverse 인 $B(\alpha)^*$ 를 이용한다.

따라서 기본적으로 각도 α_i 가 설정되면 각 예선이 생산해야 할 힘 \mathbf{F} 가 자동적으로 계산된다.

식 (1)과 다음 식의 관계

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}^T(\psi_s) \dot{\boldsymbol{\eta}}_s \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_s = \dot{\mathbf{R}}^T(\psi_s) \dot{\boldsymbol{\eta}}_s + \mathbf{R}^T(\psi_s) \ddot{\boldsymbol{\eta}}_s \quad (8)$$

로부터 바지선의 운동특성은 식 (9)의 상태방정식으로 표현된다.¹²⁾

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_s = -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{D}_s \dot{\boldsymbol{\eta}}_s + \mathbf{M}_s^{-1} \boldsymbol{\tau}_s \quad (9)$$

이것은 선형근사화 모델이며, ψ_s 가 충분히 작다고 가정하고 $\mathbf{R}(\psi_s) \approx \mathbf{I}$ 라 두어 구한 것이다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_s = [\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{\psi}_s]^T, \dot{\boldsymbol{\eta}}_s = [\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{\psi}_s]^T \text{ 이다.}$$

2.3 예선의 모델링

$\boldsymbol{\eta}_1 = [x_{10}, y_{10}, \psi_1]^T \in R^3$ 를 지구고정좌표(Earth Fixed Frame)에서의 예선 #1의 위치 (x_{10}, y_{10}) 와 선수각(ψ_1)이라 두면, 모선인 바지선의 운동방정식을 구하는 방법으로 예선의 운동방정식도 유도할 수 있다. 이것으로부터 예선 #1의 운동방정식은 다음 식과 같이 표현된다.¹²⁾

$$\mathbf{M}_1 \dot{\boldsymbol{\nu}}_1 + \mathbf{D}_1 \boldsymbol{\nu}_1 = \boldsymbol{\tau}_1 + B_{\delta 1} \delta_1 \quad (10)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{R}(\psi_1) \boldsymbol{\nu}_1$$

로우프 연결점이 예선의 무게중심에 가깝다고 가정하면 예선의 요우모멘트는 발생하지 않는다.

따라서 $\boldsymbol{\tau}_1 = [\tau_{1x}, \tau_{1y}, \tau_{1r}]^T$ 과 $B_{\delta 1}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \tau_{1x} = F_{p1} - F_1 c\beta_1 \\ \tau_{1y} = -F_1 s\beta_1 \\ \tau_{1r} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$B_{\delta 1} = \begin{bmatrix} -k_{1x} \\ -k_{1y} \\ k_{1r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (10)에서 $\mathbf{M}_1 \in R^{3 \times 3}$ 은 관성행렬, $\mathbf{D}_1 \in R^{3 \times 3}$ 는 댐핑행렬이다.

앞에서 설명한 것과 같이 식 (11)에서 F_{p1}, F_1 은 예선 #1의 추력과 견인력을 각각 나타내며, δ_1 은 타각을 나타낸다. 여기서, 예선 #1의 무게중심 좌표 (x_{10}, y_{10}) 를 모선의 위치좌표 (x_0, y_0) 로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} x_{10} = x_1 + l_{1c} c\beta_1 = x_0 + l_1 s(\theta_1 + \psi_s) + l_{1c} c\beta_1 \\ y_{10} = y_1 - l_{1c} s\beta_1 = y_0 - l_1 c(\theta_1 + \psi_s) - l_{1c} s\beta_1 \end{cases} \quad (13)$$

위 식에서 $l_{1c} = \sqrt{(x_{10} - x_1)^2 + (y_{10} - y_1)^2}$ 이고, 식 (13)의 미분은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{cases} \dot{x}_{10} = -l_{1c} s\beta_1 \dot{\beta}_1 - l_1 (s\theta_1 s\psi_s - c\theta_1 c\psi_s) \dot{\psi}_s + \dot{x}_0 \\ \dot{y}_{10} = -l_{1c} c\beta_1 \dot{\beta}_1 + l_1 (c\theta_1 s\psi_s + s\theta_1 c\psi_s) \dot{\psi}_s + \dot{y}_0 \end{cases} \quad (14)$$

따라서 식 (9)에 나타낸 바지선의 수식모델을 구하는 방법을 이용하여 예선의 운동방정식을 구하면 된다. 이에 따라 다음의

$$\boldsymbol{\nu}_1 = \mathbf{R}^T(\psi_1) \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \quad (15)$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_1 = \dot{\mathbf{R}}^T(\psi_1) \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 + \mathbf{R}^T(\psi_1) \ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 \quad (16)$$

관계식으로부터 예선 #1의 수식모델은

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 = -\mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_1) [\dot{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{L}_0 \dot{\mathbf{X}}_0] + \mathbf{M}_1^{-1} (\boldsymbol{\tau}_1 + B_{\delta 1} \delta_1) \quad (17)$$

와 같이 구해진다.¹²⁾ 여기서, $\ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 = [\ddot{x}_{10}, \ddot{y}_{10}, \ddot{\psi}_1]^T$,

$\dot{\mathbf{X}}_1 = [\dot{\beta}_1, \dot{\psi}_s, \dot{\psi}_1]^T$, $\dot{\mathbf{X}}_0 = [\dot{x}_0, \dot{y}_0]^T$, 그리고

$$\mathbf{R}(\tilde{\psi}_1) = \begin{bmatrix} -l_{1c} s\psi_1 - l_1 (s\theta_1 s\psi_s - c\theta_1 c\psi_s) & 0 \\ -l_{1c} c\psi_1 & l_1 (c\theta_1 s\psi_s + s\theta_1 c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

이다. 예선 #2에 대한 상태방정식도 위와 같은 방법으로 구하면 된다.

따라서 $\boldsymbol{\eta}_2 = [x_{20}, y_{20}, \psi_2]^T \in R^3$ 를 지구고정좌

표(Earth Fixed Frame)에서의 예선 #2의 위치 (x_{20}, y_{20}) 와 선수각(ψ_2)이라 두면 운동방정식은 다음과 같이 구해진다.¹²⁾

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_2 \dot{\boldsymbol{\nu}}_2 + \mathbf{D}_2 \boldsymbol{\nu}_2 &= \boldsymbol{\tau}_2 + B_{\delta_2} \delta_2 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 &= \mathbf{R}(\psi_2) \boldsymbol{\nu}_2 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서도 $\mathbf{M}_2 \in R^{3 \times 3}$ 은 관성행렬, $\mathbf{D}_2 \in R^{3 \times 3}$ 은 댐핑행렬이다.

그리고 예선 #2의 무게중심좌표 (x_{20}, y_{20}) 는, 모선의 위치좌표 (x_0, y_0) 로 변환하여 나타내면 다음 식과 같이 구해진다.

$$\begin{cases} x_{20} = x_2 + l_{2c} c\beta_2 = x_0 + l_2 s(\theta_2 - \psi_s) + l_{2c} c\beta_2 & (20) \\ = x_0 + l_2 (s\theta_2 c\psi_s - c\theta_2 s\psi_s) + l_{2c} c\beta_2 \\ y_{20} = y_2 + l_{2c} s\beta_2 = y_0 + l_2 c(\theta_2 - \psi_s) + l_{2c} s\beta_2 \\ = y_0 + l_2 (c\theta_2 c\psi_s + s\theta_2 s\psi_s) + l_{2c} s\beta_2 \end{cases}$$

예선 #1과 마찬가지로, 선수각과 로우프 연결선이 동일 선상에 존재($\beta_2 = \psi_2$)한다고 가정하고, 식 (20)의 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}_{20} = -l_{2c} s\beta_2 \dot{\beta}_2 - l_2 (s\theta_2 s\psi_s + c\theta_2 c\psi_s) \dot{\psi}_s + \dot{x}_0 & (21) \\ \dot{y}_{10} = l_{2c} c\beta_2 \dot{\beta}_2 - l_2 (c\theta_2 s\psi_s - s\theta_2 c\psi_s) \dot{\psi}_s + \dot{y}_0 \end{cases}$$

이것으로부터 식 (19)는 다음과 같이 간단히 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 = \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2) \dot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{L}_0 \dot{\mathbf{X}}_0 \quad (22)$$

위 식에서 $\dot{\mathbf{X}}_2 = [\dot{\beta}_2, \dot{\psi}_s, \dot{\psi}_2]^T$, $\dot{\mathbf{X}}_0 = [\dot{x}_0, \dot{y}_0]^T$ 이고, 변환행렬 $\mathbf{R}(\tilde{\psi}_2)$ 는 다음 식과 같다.

$$\mathbf{R}(\tilde{\psi}_2) = \begin{bmatrix} -l_{2c} s\psi_2 - l_2 (s\theta_2 s\psi_s + c\theta_2 c\psi_s) & 0 \\ l_{2c} c\psi_2 - l_2 (c\theta_2 s\psi_s - s\theta_2 c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

그리고 다음의 관계로부터

$$\boldsymbol{\nu}_2 = \mathbf{R}^T(\psi_2) \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \quad (24)$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_2 = \dot{\mathbf{R}}^T(\psi_2) \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 + \mathbf{R}^T(\psi_2) \ddot{\boldsymbol{\eta}}_2 \quad (25)$$

예선 #2의 운동특성은 다음과 같이 근사화된 수식모델로 표현할 수 있다.¹⁴⁾

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}}_2 &= -\mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2) [\dot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{L}_0 \dot{\mathbf{X}}_0] \\ &\quad + \mathbf{M}_2^{-1} (\boldsymbol{\tau}_2 + B_{\delta_2} \delta_2) \end{aligned} \quad (26)$$

결론적으로 Fig. 3에 나타난 전체시스템의 운동방정식은 모선과 예선의 상태방정식을 통합하면 된다. 그래서 예선 #1, #2의 운동특성을 나타낸 식 (17) 및 식 (26)에서 일부 행렬을 편의상 다음과 같이 정리한다.

$$-\mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{1d11} & \mathbf{M}_{1d12} & \mathbf{M}_{1d13} \\ \mathbf{M}_{1d21} & \mathbf{M}_{1d22} & \mathbf{M}_{1d23} \\ \mathbf{M}_{1d31} & \mathbf{M}_{1d32} & \mathbf{M}_{1d33} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$-\mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{2d11} & \mathbf{M}_{2d12} & \mathbf{M}_{2d13} \\ \mathbf{M}_{2d21} & \mathbf{M}_{2d22} & \mathbf{M}_{2d23} \\ \mathbf{M}_{2d31} & \mathbf{M}_{2d32} & \mathbf{M}_{2d33} \end{bmatrix} \quad (28)$$

이것으로부터 전체시스템의 운동특성을 통합적으로 나타내는 상태방정식은 식 (29)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (29)$$

이때 상태벡터는 $\mathbf{x} = [\dot{\eta}_s^T \ \eta_s^T \ \dot{\eta}_1^T \ \eta_1^T \ \dot{\eta}_2^T \ \eta_2^T]^T$ 이고, 제어입력벡터는 $\mathbf{u} = [\tau_s^T \ \tau_1^T \ \tau_2^T \ \delta_1 \ \delta_2]^T$ 이다.

또한 식 (29)의 상태방정식에서 각 시스템행렬은 다음과 같이 요소행렬로 구성된다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{D}_s & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad A_{12} = A_{13} = [\mathbf{0}_{6 \times 6}],$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{1d11} & \mathbf{M}_{1d12} & 0] \\ \mathbf{M}_{1d21} & \mathbf{M}_{1d22} & 0 \\ \mathbf{M}_{1d31} & \mathbf{M}_{1d32} & 0 \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= \begin{bmatrix} [00 M_{d13}] \\ 00 M_{d23} \\ 00 M_{d33} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad A_{23} = [\mathbf{0}_{6 \times 6}], \\
 A_{31} &= \begin{bmatrix} [M_{2d11} M_{2d12} 0] \\ M_{2d21} M_{2d22} 0 \\ [M_{2d31} M_{2d32} 0] \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad A_{32} = [\mathbf{0}_{6 \times 6}], \\
 A_{33} &= \begin{bmatrix} [00 M_{2d13}] \\ 00 M_{2d23} \\ 00 M_{2d33} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} M_s^{-1} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & M_1^{-1} \mathbf{0}_{3 \times 3} & M_1^{-1} B_{\delta 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & M_2^{-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (31) \\
 C &= [I_{9 \times 9} \quad \mathbf{0}_{9 \times 9}]
 \end{aligned}$$

3. 제어기 설계

2장에서는 모션인 바지선을 비롯하여 두 척의 예선에 대한 운동방정식을 도출하였다. 그리고 이것으로부터 각각의 수식모델과 전체시스템에 대한 상태방정식을 구하였다.

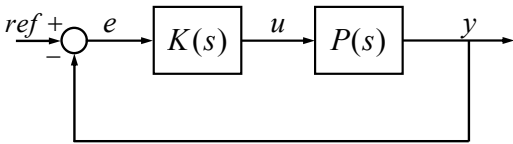


Fig. 4 A servosystem for tracking the given route and keeping the target position

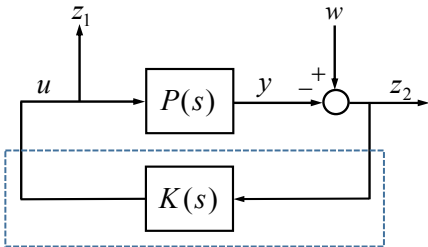


Fig. 5 Schematics for designing a robust servosystem based on H_∞ control framework

지금부터는 2장의 결과를 바탕으로, 추진장치를 갖지 않는 바지선을 안전하고 신속하게 정해진 위치로 이동시켜 안정적인 상태를 유지하기 위한 제어계를 설계한다.

본 연구에서의 제어계 설계목표는 설정된 경로와 지정된 목표지점을 가능한 정확하게 추종하고 위치를 유지하도록 하는데 있다.

아울러 외란이 존재할 경우에도 설계목표를 달성할 수 있는 강인성도 확보해야 한다. 그래서 기본적으로 필요한 것은 Fig. 4에 나타난 서보계를 구성하여 추종성능을 확보해야 한다. 그리고 외란 등의 불확실성을 고려한다면 당연히 강인제어기법에 따라 제어계를 설계하는 것이 타당하다. 따라서 Fig. 4의 서보계는 강인서보계(robust servosystem)를 구성하기 위한 Fig. 5의 개념도를 기반으로 설계한다.

제어계를 설계하기 위해서는 Fig. 5를 정식화해야 하며 그것은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z_1 \\ z_2 \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_{11} & D_{111} & D_{121} \\ C_{21} & D_{211} & D_{221} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad (32)$$

식 (32)에서 A 를 제외한 각 요소행렬은 다음과 같이 각각 정의된다.

$$\begin{aligned}
 B_1 &= [\mathbf{0}_{18 \times 3}], \quad B_2 = B, \\
 C_{11} &= [\mathbf{0}_{11 \times 18}], \quad C_{21} = -C, \quad C_2 = C, \\
 D_{111} &= [\mathbf{0}_{11 \times 9}], \quad D_{211} = [I_{9 \times 9}], \\
 D_{121} &= [\mathbf{0}_{11 \times 11}], \quad D_{221} = [I_{9 \times 9} \quad \mathbf{0}_{9 \times 2}], \\
 D_{21} &= [I_{9 \times 9}], \quad D_{22} = [\mathbf{0}_{9 \times 11}]
 \end{aligned} \quad (33)$$

이때 강인서보계를 구성하는 문제는 식 (32)에서 외란의 영향을 가능한한 억제하는 것이며, 결국 아래의 노름(norm) 조건을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이다.

$$\|T_{zw}\|_\infty < \gamma (> 0) \quad (34)$$

이때 T_{zw} 는 Fig. 5 또는 식 (32)에서 외란 w 에서 출력 z_i ($i=1,2$)까지의 전달함수이다. 식 (34)

Table 1 Specification of model ships

Item	Parameter	Value
Barge Ship	Length	2.0 m
	Breath	1.0 m
	Weight	21.5 kg
Tug Boat	Length	0.75 m
	Breath	0.3 m
	Weight	0.45 kg

의 조건을 만족하는 제어기는 식 (32)의 표현을 기반으로 Matlab을 이용하여 구하였으며, 제어기 설계시 이용한 모션과 예선에 대한 주요 물리적 특성은 Table 1^(10,14)에 정리한 것과 같다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 제어대상 선박에 대한 정보는 Table 1에 나타난 것과 같이 실험용 선박이다. 선박에 대한 물리파라미터 값은 기 수행된 연구 결과⁹⁾를 통해 검증된 것으로, 이러한 정보를 이용하면 모션과 예선의 관성행렬 및 댐핑행렬은 식 (35)와 식 (36)과 같다. 식 (35)는 바지선의 관성행렬과 댐핑행렬이며, 식 (36)은 예선의 관성행렬과 댐핑행렬이다. 단, 두 예선은 동일한 운동특성을 갖는 것으로 간주한다.

$$M_s = \begin{bmatrix} 35.12 & 0 & 0 \\ 0 & 37.24 & 0 \\ 0 & 0 & 11.32 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.80 \end{bmatrix}$$

$$M_1(M_2) = \begin{bmatrix} 2.25 & 0 & 0 \\ 0 & 4.15 & 0.065 \\ 0 & 0.065 & 0.56 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$D_1(D_2) = \begin{bmatrix} 0.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 0.05 \\ 0 & 0.05 & 0.178 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션에서는, 본 논문에서 제안하는 강인서보계와 가장 일반적 제어기법인 최적레귤레이터(LQ 제어) 설계법으로 설계한 제어기¹⁴⁾를 이용한 경우를 비교 평가한다. 또한 외란이 존재하는 경우와 그렇지 않은 조건에서의 운동제어성능도

평가한다.

먼저 Fig. 6은 외란이 존재하지 않는 조건에서 LQ 제어기를 적용한 경우의 초기값 응답(initial response)을 나타내고 있다. 선박의 초기 위치와 선수가이 각각 $x_0=10$ m, $y_0=10$ m, $\psi_s=10$ deg 인 상태에서 출발하여, 원점(0 m, 0 m, 0 deg)으로 복귀하도록 선박을 제어할 때의 제어성능을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 목표지점에 도착했을 때는 설정된 위치 및 각도에 대한 오차가 발생하지 않았다. 그러나 출발지점에서 목표위치에 이르는 과정에서는 설정된 경로를 벗어난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같이 외란이 없는 조건에서 강인제어기를 적용한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 강인제어기를 적용한 경우에는, 선박이 목표지점에 정확하게 도착할 뿐만 아니라, 목표로 하는 위치에 도달하기까지의 과정에서도 설정된 경로를 거의 벗어나지 않았다.

다음으로 제어계의 강인성을 평가하도록 한다.

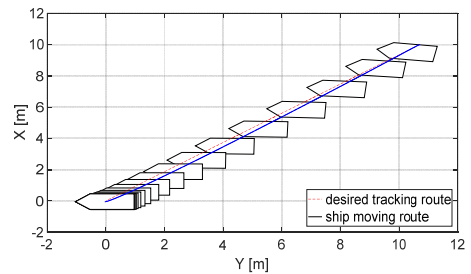


Fig. 6 LQ control performance without disturbance : initial response from (10 m, 10 m, 10 deg)

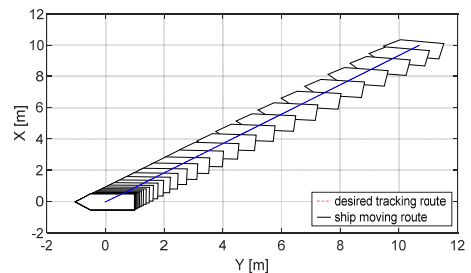
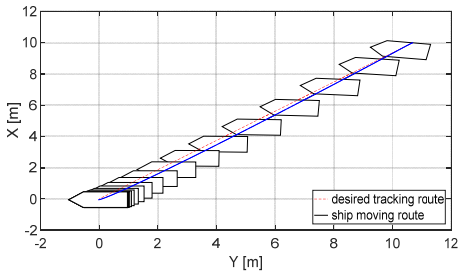
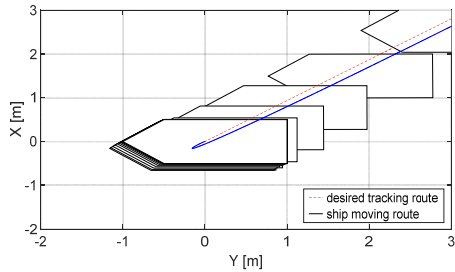


Fig. 7 H_∞ control performance without disturbance : initial response from (10 m, 10 m, 10 deg)



(a) route tracking performance



(b) position keeping at the final position

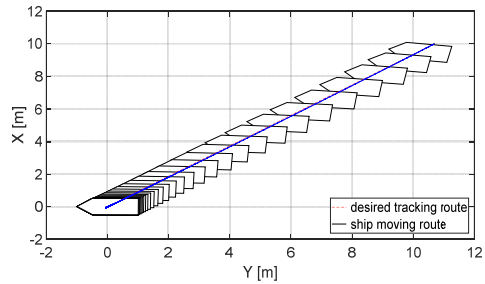
Fig. 8 LQ control performance with disturbance : initial response

먼저 Fig. 8은 외란이 존재할 때, LQ 제어를 적용한 경우의 응답을 나타내고 있다. Fig. 8 (a)는 경로추종성능을 나타내고 있으며, (b)는 최종 목표지점 근처에서의 위치유지성능을 확인하기 위해 확대한 그림이다. Fig. 8의 그림에서 알 수 있듯이 외란의 영향으로 이동경로에서 벗어날 뿐만 아니라 목표지점에서의 위치유지성능이 떨어진다는 것을 확인할 수 있다.

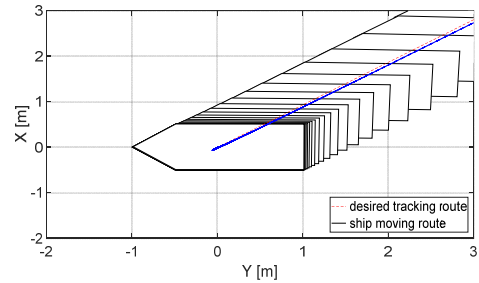
같은 조건에서 강인제어를 적용한 경우의 운동제어성능을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 이동하는 과정에서 뿐만 아니라, 최종 도착지점에서도 외란에 강인하게 대응하면서 목표지점에서 거의 벗어나지 않는 우수한 제어성능이 확보된다는 것을 알 수 있다. 이때 외란입력신호는 선박운동제어에 필요한 최대 제어력(0.5 N)의 10%에 해당하는 크기(0.05 N)로 제어대상의 입력측에 지속적으로 가하였다. (Fig. 13 참조)

결론적으로 강인제어기법으로 설계한 제어를 적용하면 외란에 적극적으로 대응하여 우수한 제어성능을 확보할 수 있다는 것을 검증하였다.

본 연구에서 설계한 제어기는 서보계로 선박을 설정된 위치로 오차 없이 이동시키는 것이 설계의 주된 목적이다. 따라서 Fig. 6 ~ 9에 나타난 초기응답과 달리, 제어기의 추종성능을 평가하도록 한다. 그래서 출발점에서의 관성위치와 선수각 (x_0, y_0, ψ_s) 이 $(0, 0, 0)$ 인 상태에서 출발하여 목표지점에서는 $x_0 = 10$ m, $y_0 = 10$ m, $\psi_s = 0$ deg가 되도록 하는 시뮬레이션을 실행하였다.



(a) route tracking performance



(b) position keeping at the final position

Fig. 9 H_∞ control performance with disturbance : initial response

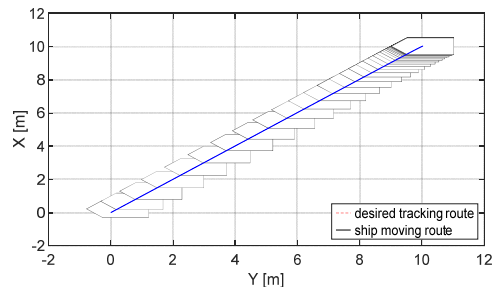


Fig. 10 H_∞ control performance without disturbance : target tracking from $(0$ m, 0 m, 0 deg)

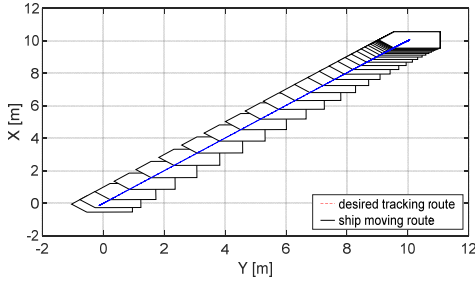


Fig. 11 H_{∞} control performance with disturbance : target tracking from (0 m, 0 m, 0 deg)

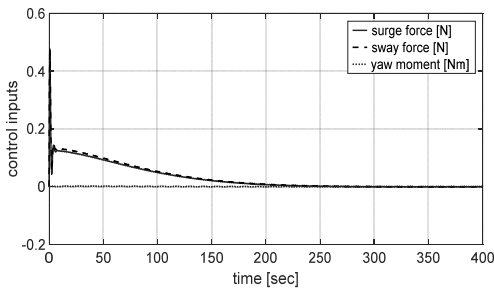


Fig. 12 Control inputs of H_{∞} controller when the disturbance attacks the controlled ship : surge, sway force [N], yaw moment [Nm]

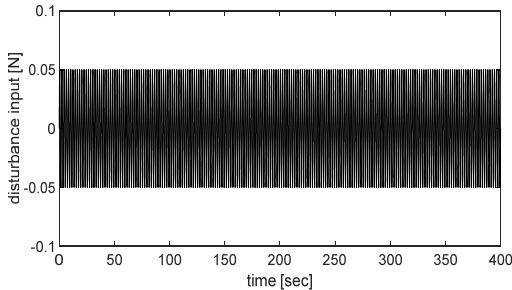


Fig. 13 Disturbance input ([N])

Fig. 10은 외란이 없는 경우, Fig. 11은 외란의 영향을 고려한 경우의 시뮬레이션 결과이며, 이때의 제어입력을 Fig. 12에 나타내었다. 강인제어기를 적용한 경우에는 기대대로 외란의 존재 유무에 상관없이 설정된 경로를 잘 추종한다. 또한 목표지점에 도착한 이후에도 외란의 영향에도 불구하고 강인한 위치유지제어성능을 나타내고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무동력 바지선의 운동제어시스템 구축방법에 대해 고찰하였다. 특히 안벽으로 이동하는 경우를 고려하여, 안전하고 신속하게 작업을 완료하기 위한 예선배치 전략과 운동제어기법을 제안하였다. 이동과정에서는 예선배치를 변경할 필요가 없도록 모든 예선을 우현에 배치하고, 예선 추력의 적절한 제어를 통해 안벽으로의 접안작업을 안전하고 신속하게 완료할 수 있는 제어기법을 제안하였다. 특히 파랑 등의 외란에 적절히 대응하도록 강인제어기법으로 제어기를 설계하였다. 최적제어기법과의 비교평가를 통해 제안하는 제어전략의 유효성과 우수한 제어성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1A2C1003486).

Author contributions

C. W. Kim; Conceptualization. Y. B. Kim; Data curation. D. H. Lee; Formal analysis. Y. B. Kim; Funding acquisition. C. W. Kim; Investigation. C. W. Kim; Methodology. D. H. Lee; Software. Y. B. Kim; Supervision. D. H. Lee; Validation. C. W. Kim; Writing-original draft. Y. B. Kim; Writing-review & editing.

References

1. 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.

2. V. P. Bui, H. Kawai, Y. B. Kim and K. S. Lee, 2011, "A Ship Berthing System Design with Four Tug Boats", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, pp. 1257-1264. (<https://doi.org/10.1007/s12206-011-0215-4>)
3. 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. (<http://doi.org/10.1007/s12555-011-0622-4>)
4. A. M. Tran, S. W. Ji and Y. B. Kim, 2014, "A Ship Berthing System Design by Cooperating with Tugboats and Dampers", *Journal of Drive and Control*, Vol. 11, No. 3, pp. 7-13. (<https://doi.org/10.7839/ksfc.2014.11.3.007>)
5. A. M. Tran and Y. B. Kim, 2016, "Dynamic Identification and Robust Control Performance Evaluation of Towing Rope Under Rope Length Variation", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 58-65. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.2.058>)
6. D. J. Lee, J. K. Kim and B. S. Kim, 2000, "Design of an Automatic Winch System for Small Fishing Vessel", *Journal of the Korean Society for Fisheries and Technology*, Vol. 36, No. 3, pp. 157-165.
7. Y. B. Kim, H. C. Park and C. W. Kim, 2020, "A Study on Vessel Motion Control with Towing Ropes and Dampers for Berthing", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 92-101. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.5.092>)
8. D. Q. Tran, D. H. Lee, T. W. Kim, Y. B. Kim and H. C. Park, 2018, "A Study on Maneuvering Performance Improvement of a Towed Vessel without a Power Propulsion System : System Modelling", *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean echnology*, Vol. 54, No. 4, pp. 343-352. (<https://doi.org/10.3796/KSFOT.2018.54.4.343>)
9. D. H. Lee, S. Chakir, Y. B. Kim and D. Q. Tran, 2020, "Control System Design for Vessel Towing System by Activating Rudders of the Towed Vessel", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 12, pp. 943-956. (<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.11.008>)
10. D. Q. Tran, Y. B. Kim and B. G. Kim, 2020, "Control System Design and Experimental Evaluation for Improving Maneuvering Performance of a Leader Following System", *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, Vol. 56, No. 3, pp. 238-245. (<https://doi.org/10.3796/KSFOT.2020.56.3.238>)
11. <https://www.porttechnology.org/news/electric-tugboat-for-port-of-sandiego>, Crowley Maritime Corporation.
12. H. C. Park, D. H. Lee and Y. B. Kim, 2022, "A Study on Control System Design for Barge Ship Motion Control with Tug-Boats", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 60-70. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.3.060>)
13. T. I. Fossen, 2002, "Marine Control System -Guidance : Navigation, Rigs and Underwater Vehicle", *Marine Cybernetics*, Trondheim, Norway.
14. A. M. Tran, S. H. Jung, 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. (<https://doi.org/10.1007/s12555-015-0046-7>)