

예선 연계 바지선 운동제어시스템 구축에 관한 연구

A Study on Control System Design for Barge Ship Motion Control with Tug-Boats

박환철* · 이동훈** · 김영복***†

Hwan-Cheol Park*, Dong-Hun Lee** and Young-Bok Kim***†

(Received 13 June 2022, Revision received 23 June 2022, Accepted 23 June 2022)

Abstract : In this study, the design problem of a motion control system of a barge ship is addressed. For the various purposes, the barge ships are used in numerous applications. Especially, in the ship building industries, heavy and huge equipment and assembly parts are carried by these ships. However, it is impossible to carry them and achieve desirable motion without assisting forces. Therefore, the help of several tugboats is necessary to guarantee safe and quick operations. Hence, in this study, a control strategy is suggested to provide a solution for this issue. Accordingly, the mathematical system model is derived and a control system is designed. Using the designed control system, simulations are carried out to provide a better look at the performance of the barge ship control.

Key Words : Barge-type surface ship, Ship building, Propulsion system, Control system, Simulation

1. 서 론

본 논문에서는 예선을 액추에이터로 하는 바지선(barge)의 운동제어시스템 구축문제에 대해 고찰하고 있다. 바지선은 기본적으로 자체 추진장치를 갖지 않기 때문에 예선 등 외부로부터의 동력을 이용하여 이동하거나 위치를 확보할 수 있다. 추진장치뿐만 아니라 조향장치마저 갖추고 있지 않기 때문에 단순한 부유체에 지나지 않아 외력

의 적절한 조절을 통해 바지선의 운동성능과 이를 이용하는 작업의 완성도가 결정된다. 그럼에도 불구하고 여러 환경에서 다양한 목적으로 유용하게 활용되고 있다. 모래, 광석 등의 운반뿐만 아니라, 조선 현장에서 블록형 구조물의 근거리 이송은 바지선을 이용하는 것이 일반적이다. 화물을 단순히 이송하는 것은 그렇게 어려운 작업은 아니다. 즉 적재물을 싣고 이동시키는 것은 직진운동에 지나지 않기 때문에 모션제어 문제에서도

*** 김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*박환철(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) : 1등 기관사, 부경대학교 실습선 백경호
**이동훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

*** Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*Hwan-Cheol Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) : 1st Engineer, Training Ship Baek-kyung, Pukyong National University.
**Dong-Hun Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

가장 단순한 이슈라 할 수 있다. 그러나 이송의 시작과 마무리 작업은 지극히 어렵고 주의가 필요하여 작업속도도 극단적으로 느려진다.

예를 들어 Fig. 1은 조선 현장에서의 작업 예인데, 거대한 구조물을 바지선으로 이송하는 과정을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 바지선은 예선의 도움으로 좁은 공간에서 이동하게 되는데, 마지막 단계는 바지선을 안벽에 나란히 정박시켜야 한다. 이때 안벽 가까운 공간에서는 안벽과 바지선 사이에 예선이 위치할 수 없으므로, 해상에서는 예선으로 바지선을 끌고 육상쪽에서는 로우프로 당기는 등의 협조작업이 필요하게 된다. 일반 선박의 경우에도 이와 유사한 지원작업은 필수적이고, 독립된 추진장치나 조향장치를 갖지 않는 바지선을 이용하는 경우에는 더욱 복잡하고 조심스러운 준비과정이 필요할 수밖에 없다.

바지선 운동제어뿐만 아니라 일반 선박의 운동제어에 예선을 활용하는 경우, 바지선의 운동제어 성능을 개선하기 위한 노력은 지금까지 진행되고 있다. 예를 들어 예선을 제어하여 선박을 안전하게 접안시키는 문제에 대한 연구결과가 도출되었는데,¹⁻³⁾ 이 연구에서는 예선이 모선에 접촉한 상태에서 상호간의 추진력을 적절하게 조절하는 방법으로 선박을 접안시키는 문제에 대해 고찰하고 있다. 이 경우의 문제점은 예선이 모선의 양방향에 배치되므로 안벽과 접안대상 선박 사이에 예선이 끼이게 된다. 따라서 완전한 접안작업이 불가능하게 되는 근원적 문제가 해결되지 않는다는 것이다. 이에 대한 해결방안 중의 하나로, 예선뿐만 아니라 육상측에 설치된 윈치시스템의 자동조종을 통해 접안완료시점에서의 안정성과 신속성을 확보하는 방법이 제안되었다.⁴⁻⁷⁾ 그 외 외항에서 화물을 적재한 바지선을 단순히 견인하는 과정에서의 운항안정성과 추종성능을 개선하고자 하는 연구결과도 보고되어 있다.⁸⁻¹⁰⁾

이러한 연구결과를 기반으로 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 항내에서의 작업 안정성과 신속성을 동시에 확보하기 위한 바지선 운동제어시스템을 구축하도록 한다. 즉, 적절한 위치에 예선을 배치하여 제어함으로써 바지선의 운동제어성능을



Fig. 1 Motion control of barge ship by tugs

획기적으로 개선하기 위한 제어전략을 제안하고, 이에 따라 수식모델을 구한 후 제어계를 설계한다.

이때 도입되는 예선은 4척으로 설정하고 예선 조종을 통해 바지선의 바람직한 제어성능을 확보할 수 있도록 제어계를 설계한다. 그리고 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 제안하는 제어전략의 유효성을 평가하도록 한다.

2. 문제설정 및 제어대상에 대한 모델링

2.1 제어전략 및 시스템 모델링

서론에 기술하였듯이, 본 연구에서는 추진 동력원이 없는 바지선에 4척의 예선을 배치하여 바지선의 운동제어시스템을 구축하는 것은 목표로 하고 있다. 단순한 이동이 아니라, Fig. 1과 같이 화물을 적재한 상태에서 안벽측에 정확하고 안전하게 접근시켜야 하는 고난이도 작업을 완성하기 위한 것이다. 이와 관련된 일반적인 작업과정을 살펴보면, 안벽과 선박과의 거리가 수 미터 영역에서부터는 예선이 사이에 끼어들어 안벽과의 충돌을 방지하도록 하는 역할을 하게 된다. 이것마저도 예선 조종자의 경험에 의존해야 하는 전근대적인 방법으로 대부분의 작업이 수행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 4척의 예선을 배치하고 예선의 운동제어를 통해 바지선의 이동작업을 자동적으로 수행하는 방법을 제안한다. 특히 안벽측과 바지선 사이 공간에서는 예선을 배치할 수 없다고 가정하고 있다.

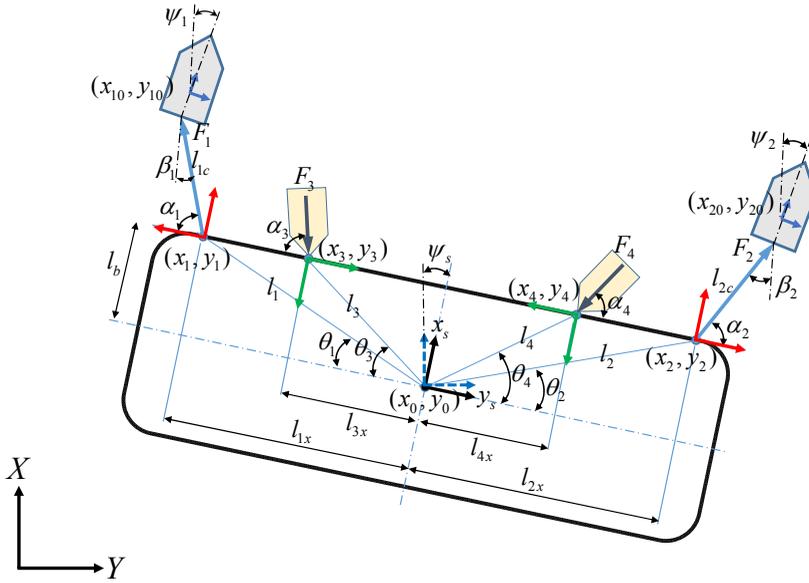


Fig. 2 Schematic diagram and coordinates setting for system modelling

이것은 앞서 기술하였던 것과 같이 예선의 자동조정을 통한 바지선 운동제어를 위해서는 타당한 설정이다.

만일 Fig. 2와 같은 설정이라면, 예선을 이용하여 밀고 당기는 힘만으로 바지선의 운동을 적절히 제어할 수 있게 된다.

그래서 Fig. 2와 같이 시스템을 구성하여 바지선과 예선의 운동방정식을 도출하고, 이를 기반으로 제어계를 설계하도록 한다.

바지선에 대한 예선의 배치방법은 다양하게 고안할 수 있으나, 안벽과 바지선 사이에는 예선배치를 고려하지 않는 방법이 그 중의 하나가 될 것이다. 이것마저도 최선이 아닐 수도 있으나, 이것이 가장 보편적 방법이라는 판단 아래 시스템을 구성하고 제어계를 설계하도록 한다.

전체 시스템 구성도를 나타낸 Fig. 2에서 F_i ($i=1, \dots, 4$)는 예선으로부터 생산되는 바지선 제어력을 나타낸다. 즉 모든 예선은 한쪽으로 배치하여 밀고 당기는 힘의 조절을 통해 원하는 위치로 이동시키도록 한다.

그래서 F_1, F_2 는 로우프로 예선과 모선을 연결하여 끌어내는 힘, F_3, F_4 는 모선에 예선이 직접

접촉하여 미는 힘을 나타낸다. 이때 미는 힘과 끌어당기는 힘의 방향변화는 없이 힘의 세기만을 제어하는 방법이 가장 현실적이고 단순한 방법이라 할 수 있다. 그러므로 미는 힘은 일정하게 설정하고 끄는 힘만의 제어를 통해 원하는 위치로 이동시켜 정지시키는 것도 하나의 대안이 될 수 있다. 이것은 하나의 예라 할 수 있으며, 완성된 수식모델을 이용하면 다양한 환경과 조건에 대해 다양한 방법을 통해 효과적으로 대응할 수 있을 것이다.

따라서 Fig. 2의 시스템 구성도를 기반으로 바지선과 예선 #1, #2에 대한 운동특성은 전체 시스템 모델식에 반영한다. 단 바지선에 접촉하여 미는 힘 F_3, F_4 를 발생시키는 2척의 예선의 운동특성은 고려하지 않는다.

2.2 바지선의 운동방정식

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 제어대상선박은 추진장치 없이 예선에 의해 운동이 제어되며, XY 평면에서 서로 대칭이고 무게 및 회전중심도 좌표중심 근처에 있다고 가정하면 바지선 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.¹¹⁾

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

위 식에서 $\mathbf{M}_s \in R^{3 \times 3}$ 은 관성행렬, $\mathbf{D}_s \in R^{3 \times 3}$ 는 댐핑행렬로 각각 식 (2)와 같이 표현된다.

그리고 $\boldsymbol{\eta}_s = [x_0, y_0, \psi_s]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표 (Earth Fixed Frame)에서의 바지선의 중심위치 (x_0, y_0) 와 선수각(ψ_s)을 나타낸다.

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

또한 $\mathbf{v}_s = [u_s, v_s, r_s]^T \in R^3$ 는 선체고정좌표 (Body Fixed Frame)에서의 서지(surge), 스웨이 (sway) 방향 속도와 요우(yaw) 각속도를 나타낸다. 그리고 $\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}_s)$ 는 선박좌표를 관성좌표로 변환시키는 변환행렬로 식 (3)과 같다. 편의상 지금부터는 $c(*) = \cos(*)$, $s(*) = \sin(*)$ 와 같이 나타낸다. 이때 각도는 시계방향으로의 변화를 양으로 한다.

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

아울러 식 (1)~(3)에서의 주요 파라미터를 다음과 같이 정리한다.

- m_s : 모선(바지선) 선체질량
- I_{z_s} : 선체의 z_s 방향 관성모멘트
- $X_{u_s}, Y_{v_s}, Y_{r_s}, Y_{r_s}$: 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
- $\alpha_i (i=1, \dots, 4)$: 선측 기준선과 예선에 의한 제

어력이 이루는 각도
 β_1, β_2 : 모선과 예선 연결선이 지구고정좌표와 이루는 각도

γ_1, γ_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

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

또한 식 (1)에서 $\boldsymbol{\tau}_s = [\tau_{sx}, \tau_{sy}, \tau_{sr}]^T$ 는 각각 서지(surge), 스웨이(sway)방향 힘과 요우 모멘트 제어력을 나타낸다. 바지선으로부터는 발생추력이 없으므로 제어력은 예선에 의해 만들어지고 Fig. 2로부터 다음 식과 같이 표현된다. 이때 τ 는 힘을 양, 미는 힘을 음으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_s &= \mathbf{B}(\alpha) \mathbf{F} \\ \mathbf{B}(\alpha) &= \begin{bmatrix} s\alpha_1 & s\alpha_2 \\ -c\alpha_1 & c\alpha_2 \\ (l_{1x}c\alpha_1 - l_b s\alpha_1) & (-l_{2x}s\alpha_2 + l_b c\alpha_2) \\ -s\alpha_3 & -s\alpha_4 \\ c\alpha_4 & -c\alpha_4 \\ (-l_{3x}s\alpha_3 + l_b c\alpha_3) & (l_{4x}s\alpha_4 - l_b c\alpha_4) \end{bmatrix} \\ \mathbf{F} &= [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T \end{aligned} \quad (4)$$

이때, 제어기로부터의 제어신호를 각 액추에이터에 전달하기 위해서는 제어력분배가 필요하다. 일반적으로 Pseudo-Inverse를 이용하여 다음식으로부터 제어력분배가 실행된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{B}(\alpha)^T \mathbf{B}(\alpha)^* \boldsymbol{\tau}_s \\ \mathbf{B}(\alpha)^* &= \{\mathbf{B}(\alpha) \mathbf{B}(\alpha)^T\}^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

즉, $\mathbf{B}(\alpha)^*$ 는 정칙(non singular)이 아닌 행렬 $\mathbf{B}(\alpha)$ 의 Pseudo-Inverse이다. 여기서 제어력분배는

기본적으로 각도 α_i 가 설정되면 각 예선이 생산해야 할 힘 \mathbf{F} 가 자동적으로 계산된다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 예선 #3, #4는 모선에 접촉한 상태에 있다고 가정하므로 α_3, α_4 만 결정하면 된다. 그러나 α_1, α_2 가 결정되면 이에 따라 예선 #1, #2의 위치와 선수각이 설정되고 이것을 목표값으로 하는 예선운동제어가 실행된다.

그리고 예선 #1, #2로부터 만들어지는 추력 (F_{p1}, F_{p2})와 견인력 (F_1, F_2)는 Fig. 2로부터 다음 식으로 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{p1}c\gamma_1 \\ F_{p2}c\gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\gamma_1 & 0 \\ 0 & c\gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

그리고 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, 바지선에 대한 운동특성은 아래 식 (9)의 상태방정식으로 표현된다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_s = -\mathbf{M}_{sf}^{-1}[\mathbf{M}_s\dot{\mathbf{R}}(\psi_s) + \mathbf{D}_s\mathbf{R}^T(\psi_s)]\dot{\boldsymbol{\eta}}_s + \mathbf{M}_{sf}^{-1}\boldsymbol{\tau}_s \quad (9)$$

단, $\ddot{\boldsymbol{\eta}}_s = [\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{\psi}_s]^T$, $\dot{\boldsymbol{\eta}}_s = [\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{\psi}_s]^T$, $\mathbf{M}_{sf} = \mathbf{M}_s\mathbf{R}^T(\psi_s)$ 이다. 일반적으로 ψ_s 가 충분히 작다고 가정하고 $\mathbf{R}(\psi_s) \approx \mathbf{I}$ 라 두어 선형근사화할 수 있다. 따라서 $\mathbf{M}_{sf} = \mathbf{M}_s\mathbf{R}^T(\psi_s) \approx \mathbf{M}_s$ 가 되어 식 (9)는 다음 식으로 근사화된다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_s = -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{D}_s\dot{\boldsymbol{\eta}}_s + \mathbf{M}_s^{-1}\boldsymbol{\tau}_s \quad (10)$$

2.3 예선의 운동방정식과 상태방정식

여기서는 전체시스템의 상태방정식을 구하기 위해 두 척의 예선에 대한 운동방정식과 근사식을 구하도록 한다. 그래서 먼저 예선 #1의 운동방정식과 모선과의 관계식을 계산한다.

만일 $\boldsymbol{\eta}_1 = [x_{10}, y_{10}, \psi_1]^T \in \mathbb{R}^3$ 를 지구고정좌표

(Earth Fixed Frame)에서의 예선 #1의 위치 (x_{10}, y_{10})와 각도(ψ_1)라 두면, 모선인 바지선의 운동방정식을 구하는 방법으로 예선의 운동방정식도 유도할 수 있다.

이것으로부터 예선 #1의 운동방정식은 다음 식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1\dot{\mathbf{v}}_1 + \mathbf{D}_1\mathbf{v}_1 &= \boldsymbol{\tau}_1 + B_{\delta 1}\delta_1 \\ \boldsymbol{\eta}_1 &= \mathbf{R}(\psi_1)\mathbf{v}_1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\tau}_1 = \begin{bmatrix} \tau_{1x} \\ \tau_{1y} \\ \tau_{1r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-c^2\gamma_1) \\ s\gamma_1c\gamma_1 \\ 0 \end{bmatrix} F_{p1}, B_{\delta 1} = \begin{bmatrix} -k_{1x} \\ -k_{1y} \\ k_{1r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

위 식에서 $\mathbf{M}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 관성행렬, $\mathbf{D}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 댐핑행렬이다. 앞에서 설명한 것과 같이 식 (12)에서 F_{p1}, F_1 은 예선의 추력과 모선을 당기는 예인력을 각각 나타내며, δ_1 은 예선 타각을 나타낸다. 이때 제어신호 $\boldsymbol{\tau}_1$ 을 예선의 추력으로 변환하고, 각도 γ_1 도 결정해야 하는 과정이 필요하다. 이것은 앞에서 설명한 바지선의 제어력분배와 같은 방법으로 다음과 같이 계산하여 실행하면 된다. 즉, 식 (12)에서

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_1 &= B(\gamma_1)F_{p1} \\ B(\gamma_1) &= \begin{bmatrix} 1-c^2\gamma_1 \\ s\gamma_1c\gamma_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

인 관계를 이용하면 제어신호를 예선 추진력으로 변환하는 것은 다음 식을 이용하면 된다.

$$\begin{aligned} F_{p1} &= B(\gamma_1)^T B(\gamma_1)^* \boldsymbol{\tau}_1 \\ B(\gamma_1)^* &= \{B(\gamma_1)B(\gamma_1)^T\}^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

위 식에서 $B(\gamma_1)^*$ 는 정칙이 아닌 행렬 $B(\gamma_1)$ 의 Pseudo-Inverse이다.

예선 #1의 무게중심좌표 (x_{10}, y_{10})를 모선의 위치좌표 (x_0, y_0)로 변환하여 표현하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{10} &= x_1 + l_{1c}c\beta_1 = x_0 + l_1s(\theta_1 + \psi_s) + l_{1c}c\beta_1 \quad (15) \\ y_{10} &= y_1 - l_{1c}s\beta_1 = y_0 - l_1c(\theta_1 + \psi_s) - l_{1c}s\beta_1 \end{aligned}$$

위 식에서 $l_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$ 이고, 식 (15)의 미분에 예선 선수각의 미분 $\dot{\psi}_1$ 을 더하면 다음 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{10} \\ \dot{y}_{10} \\ \dot{\psi}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -l_{1c}s\beta_1 & -l_1(s\theta_1s\psi_s - c\theta_1c\psi_s) & 0 \\ -l_{1c}c\beta_1 & l_1(c\theta_1s\psi_s + s\theta_1c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\psi}_1 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} \quad (16) \end{aligned}$$

결국 식 (10)에 나타낸 바지선의 수식모델을 구하는 방법을 이용하면 예선 #1의 수식모델은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\nu}_1 = \mathbf{R}^T(\psi_1)\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \quad (17)$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_1 = \dot{\mathbf{R}}^T(\psi_1)\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 + \mathbf{R}^T(\psi_1)\ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 &= -\mathbf{M}_{1f}^{-1}[\mathbf{M}_1\dot{\mathbf{R}}^T(\psi_1) + \mathbf{D}_1\mathbf{R}^T(\psi_1)] \\ &\cdot \mathbf{R}(\tilde{\psi}_1)[\dot{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{L}_0\dot{\mathbf{X}}_0] + \mathbf{M}_{1f}^{-1}(\boldsymbol{\tau}_1 + B_{\delta_1}\delta_1) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, $\ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 = [\ddot{x}_{10}, \ddot{y}_{10}, \ddot{\psi}_1]^T$, $\mathbf{M}_{1f} = \mathbf{M}_1\mathbf{R}^T(\psi_1)$, $\dot{\mathbf{X}}_1 = [\dot{\beta}_1, \dot{\psi}_s, \dot{\psi}_1]^T$, $\dot{\mathbf{X}}_0 = [\dot{x}_0, \dot{y}_0]^T$ 이며,

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\tilde{\psi}_1) &= \begin{bmatrix} -l_{1c}s\beta_1 - l_1(s\theta_1s\psi_s - c\theta_1c\psi_s) & 0 \\ -l_{1c}c\beta_1 & l_1(c\theta_1s\psi_s + s\theta_1c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20) \\ \mathbf{L}_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이다. 이때, 예선의 선수각 ψ_1 가 충분히 작다고 가정하면 $\mathbf{R}(\psi_1) \approx \mathbf{I}$ 라 둘 수 있으며, 이것으로부터 $\mathbf{M}_{1f} = \mathbf{M}_1\mathbf{R}^T(\psi_1) \approx \mathbf{M}_1$ 가 된다.

또한 Fig. 2에서 예선의 선수방향과 바지선을 연결하는 로우프는 거의 같은 선상에 존재한다. 이러한 사실을 고려하면 $\beta_1 = \psi_1$ 이 되어 식 (19)

와 식 (20)은 각각 다음 식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 &= -\mathbf{M}_1^{-1}\mathbf{D}_1\mathbf{R}(\tilde{\psi}_1)[\dot{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{L}_0\dot{\mathbf{X}}_0] \\ &+ \mathbf{M}_1^{-1}(\boldsymbol{\tau}_1 + B_{\delta_1}\delta_1) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\mathbf{R}(\tilde{\psi}_1) = \begin{bmatrix} -l_{1c}s\psi_1 - l_1(s\theta_1s\psi_s - c\theta_1c\psi_s) & 0 \\ -l_{1c}c\psi_1 & l_1(c\theta_1s\psi_s + s\theta_1c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

그리고 예선 #2에 대한 상태방정식도 바지선과 예선 #1의 운동방정식을 구하는 방법으로 쉽게 구할 수 있다. 따라서 $\boldsymbol{\eta}_2 = [x_{20}, y_{20}, \psi_2]^T \in R^3$ 를 지구고정좌표(Earth Fixed Frame)에서의 예선 #2의 위치 (x_{20}, y_{20}) 와 각도 (ψ_2) 라 두면 예선 #2의 운동방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_2\dot{\boldsymbol{\nu}}_2 + \mathbf{D}_2\boldsymbol{\nu}_2 &= \boldsymbol{\tau}_2 + B_{\delta_2}\delta_2 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 &= \mathbf{R}(\psi_2)\boldsymbol{\nu}_2 \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$\boldsymbol{\tau}_2 = \begin{bmatrix} (1 - c^2\gamma_2) \\ s\gamma_2c\gamma_2 \\ 0 \end{bmatrix} F_{p2}, \quad B_{\delta_2} = \begin{bmatrix} -k_{2x} \\ -k_{2y} \\ k_{2r} \end{bmatrix} \quad (24)$$

이고, 예선 #1의 경우와 마찬가지로 제어신호를 예선 추진력으로 변환하기 위해서는 다음 식을 이용하면 된다. 즉,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_2 &= B(\gamma_2)F_{p2} \\ B(\gamma_2) &= \begin{bmatrix} 1 - c^2\gamma_2 \\ s\gamma_2c\gamma_2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

라 두면, 제어신호의 예선 추진력으로의 변환은 다음 식으로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} F_{p2} &= B(\gamma_2)^T B(\gamma_2)^* \boldsymbol{\tau}_2 \\ B(\gamma_2)^* &= \{B(\gamma_2)B(\gamma_2)^T\}^{-1} \end{aligned} \quad (26)$$

앞에서 설명한 방법에서와 마찬가지로, 식 (26)에서 $B(\gamma_2)^*$ 는 정칙이 아닌 행렬 $B(\gamma_2)$ 의

Pseudo-Inverse를 나타낸다. 그리고 예선 #2의 무게중심좌표 (x_{20}, y_{20}) 를 모선의 위치좌표 (x_0, y_0) 로 변환하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{20} &= x_2 + l_{2c}c\beta_2 = x_0 + l_2s(\theta_2 - \psi_s) + l_{2c}c\beta_2 \quad (27) \\ &= x_0 + l_2(s\theta_2c\psi_2 - c\theta_2s\psi_2) + l_{2c}c\beta_2 \\ y_{20} &= y_2 + l_{2c}s\beta_2 = y_0 + l_2c(\theta_2 - \psi_s) + l_{2c}s\beta_2 \\ &= y_0 + l_2(c\theta_2c\psi_s + s\theta_2s\psi_s) + l_{2c}s\beta_2 \end{aligned}$$

위 식의 미분과 선수각의 미분 $\dot{\psi}_2$ 을 더하면 다음 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{20} \\ \dot{y}_{20} \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -l_{2c}s\beta_2 & -l_2(s\theta_2s\psi_s + c\theta_2c\psi_s) & 0 \\ l_{2c}c\beta_2 & -l_2(c\theta_2s\psi_s - s\theta_2c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta}_2 \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} \quad (28) \end{aligned}$$

위 식은 다음과 같이 간단히 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2)\dot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{L}\dot{\mathbf{X}}_0 \quad (29)$$

위 식에서 $\dot{\mathbf{X}}_2 = [\dot{\beta}_2, \dot{\psi}_s, \dot{\psi}_2]^T$, $\dot{\mathbf{X}}_0 = [\dot{x}_0, \dot{y}_0]^T$ 이다. 그리고 다음의 관계로부터

$$\nu_2 = \mathbf{R}^T(\psi_2)\dot{\eta}_2 \quad (30)$$

$$\dot{\nu}_2 = \dot{\mathbf{R}}^T(\psi_2)\dot{\eta}_2 + \mathbf{R}^T(\psi_2)\ddot{\eta}_2 \quad (31)$$

예선 #2의 운동특성을 나타내는 수식모델은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\eta}_s \\ \ddot{\eta}_s \\ \ddot{\eta}_1 \\ \ddot{\eta}_1 \\ \ddot{\eta}_2 \\ \ddot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ds11} & M_{ds12} & M_{ds13} \\ M_{ds21} & M_{ds22} & M_{ds23} \\ M_{ds31} & M_{ds32} & M_{ds33} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} M_{1d11} & M_{1d12} & 0 \\ M_{1d21} & M_{1d22} & 0 \\ M_{1d31} & M_{1d32} & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & M_{1d13} \\ 0 & 0 & M_{1d23} \\ 0 & 0 & M_{1d33} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_s \\ \dot{\eta}_s \\ \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{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 3} & \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{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 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{M}_2^{-1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_s \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\ddot{\eta}_2 = -\mathbf{M}_{2f}^{-1}[\mathbf{M}_2 \mathbf{R}^T(\psi_2) + \mathbf{D}_2 \mathbf{R}^T(\psi_2)] \cdot \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2)[\dot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{L}_0 \dot{\mathbf{X}}_0] + \mathbf{M}_{2f}^{-1}(\tau_2 + B_{\delta 2} \delta_2) \quad (32)$$

여기서, $\ddot{\eta}_2 = [\ddot{x}_{20}, \ddot{y}_{20}, \ddot{\psi}_2]^T$, $\mathbf{M}_{2f} = \mathbf{M}_2 \mathbf{R}^T(\psi_2)$ 이다. 아울러 예선의 선수각 ψ_2 가 충분히 작다고 가정하면 $\mathbf{R}(\psi_2) \approx \mathbf{I}$, $\mathbf{M}_{2f} = \mathbf{M}_2 \mathbf{R}^T(\psi_2) \approx \mathbf{M}_2$ 로 된다. 또한 $\beta_2 = \psi_2$ 라는 조건을 고려하면 식 (33) 및 식 (34)와 같이 근사식이 구해진다.

$$\mathbf{R}(\tilde{\psi}_2) = \begin{bmatrix} -l_{2c}s\psi_2 & -l_2(s\theta_2s\psi_s + c\theta_2c\psi_s) & 0 \\ l_{2c}c\psi_2 & -l_2(c\theta_2s\psi_s - s\theta_2c\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\ddot{\eta}_2 = -\mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2)[\dot{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{L}_0 \dot{\mathbf{X}}_0] + \mathbf{M}_2^{-1}(\tau_2 + B_{\delta 2} \delta_2) \quad (34)$$

바지선과 예선 #1, #2의 운동특성을 나타낸 식 (10), 식 (21) 및 식 (34)에서 일부 행렬을 편의상 다음과 같이 정리한다.

$$\mathbf{M}_{DS} = -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{D}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ds11} & \mathbf{M}_{ds12} & \mathbf{M}_{ds13} \\ \mathbf{M}_{ds21} & \mathbf{M}_{ds22} & \mathbf{M}_{ds23} \\ \mathbf{M}_{ds31} & \mathbf{M}_{ds32} & \mathbf{M}_{ds33} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{M}_{1D} = -\mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{1d11} & \mathbf{M}_{1d12} & \mathbf{M}_{1d13} \\ \mathbf{M}_{1d21} & \mathbf{M}_{1d22} & \mathbf{M}_{1d23} \\ \mathbf{M}_{1d31} & \mathbf{M}_{1d32} & \mathbf{M}_{1d33} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{M}_{2D} = -\mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{R}(\tilde{\psi}_2) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{2d11} & \mathbf{M}_{2d12} & \mathbf{M}_{2d13} \\ \mathbf{M}_{2d21} & \mathbf{M}_{2d22} & \mathbf{M}_{2d23} \\ \mathbf{M}_{2d31} & \mathbf{M}_{2d32} & \mathbf{M}_{2d33} \end{bmatrix} \quad (37)$$

따라서 전체시스템의 운동특성을 통합적으로 나타내는 상태방정식은 식 (38)과 같이 구해진다.

3. 시뮬레이션

위에서는 모선인 바지선을 비롯하여 두 척의 예선에 대한 운동방정식을 도출하였다. 그리고 이것으로부터 각각의 수식모델과 전체시스템에 대한 상태방정식을 구하였다.

지금부터는 2장의 결과를 바탕으로, 무동력선을 안전하고 신속하게 정해진 위치로 이동시켜 안정적인 상태를 유지하기 위한 제어계를 설계한다. 본 연구에서는 최적제어기법에 따라 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어전략의 유효성을 평가하도록 한다.

먼저 제어대상인 바지선과 예선은 실험용으로 제작한 실험선으로, 크기 등 주요 규격은 Table 1에 나타내었다.

실험선박의 동특성은 기존 연구결과에서의 데이터를 이용한다.⁹⁾ 따라서 식 (39)는 바지선의 관성행렬과 댐핑행렬이며, 예선의 관성행렬과 댐핑행렬은 식 (40)에 나타내었다. 단, 두 예선은 동일한 운동특성을 갖는 것으로 간주한다.

$$M_s = \begin{bmatrix} 35.12 & 0 & 0 \\ 0 & 37.24 & 0 \\ 0 & 0 & 11.32 \end{bmatrix} \quad (39)$$

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

$$M_1(M_2) = \begin{bmatrix} 2.25 & 0 & 0 \\ 0 & 4.15 & 0.065 \\ 0 & 0.065 & 0.56 \end{bmatrix} \quad (40)$$

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

Table 1 Specification of model ships^{10,12)}

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]

전체시스템의 상태방정식인 식 (38)과 기존 연구결과의 정보를 이용하여 시스템행렬을 완성하고, 최적제어이론에 따라 상태피드백 제어식을 아래와 같이 구하였다.

$$K = \begin{bmatrix} 3.52 & -0.01 & 0.00 & 0.29 & -0.0 & -0.0 & 0.01 & -0.0 \\ -0.01 & 3.35 & 0.0 & 0.0 & 0.26 & 0.0 & -0.01 & 0.01 \\ 0.0 & 0.0 & 0.50 & 0.0 & -0.0 & 0.04 & -0.01 & 0.0 \\ 2.53 & -1.33 & -0.04 & -0.01 & 0.0 & 0.0 & 2.89 & -1.40 \\ -0.71 & 1.86 & 0.05 & 0.01 & -0.02 & -0.0 & -0.76 & 1.92 \\ 0.09 & 0.03 & 0.60 & -0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.06 & 0.01 \\ 0.20 & -0.24 & 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.0 & 0.0 \\ -0.27 & 0.30 & -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 \\ -0.03 & 0.03 & -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 \\ -3.81 & -0.83 & -0.02 & 0.01 & 0.01 & 0.0 & -3.78 & -0.82 \\ 0.11 & -0.09 & 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.0 & 0.0 \\ -0.0 & 0.03 & -0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 \\ 0.0 & -0.0 & 0.01 & 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 \\ -0.02 & 5.15 & -0.54 & -0.02 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.0 & 0.0 \\ 0.02 & -0.30 & 0.76 & 0.02 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 \\ 0.44 & 0.07 & -0.02 & 0.99 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.21 & -1.25 & -0.02 & 0.63 & -0.40 & -0.02 \\ -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & -0.68 & 1.87 & 0.02 & -0.22 & 0.73 & 0.02 \\ -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.02 & 0.01 & 0.44 & 0.02 & -0.02 & 0.99 \\ -0.01 & -8.57 & -0.35 & -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 & 0.0 & -0.0 & -0.0 \\ 0.0 & -0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.97 & -1.01 & -0.01 & -0.74 & -0.55 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (41)$$

이것으로부터 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 3~5에 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 선박이 정지위치로부터 이탈해 있다고 가정하고 원래의 위치로 되돌리는 문제를 고려한다. 즉, 바지선의 중심위치와 선수각 좌표 (x_0, y_0, ψ_s) 가 정상상태인 $(0, 0, 0)$ 에서 $(0.5[m], -0.5[m], 10[deg])$ 로 이동하고 회전한 상태에 있다고 설정한다. 이 상태에서부터 원래의 상태 $(0, 0, 0)$ 로 복귀시키는 제어시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 Fig. 3은 설계된 제어기로부터의 계산된 제어신호 $\tau_s = [\tau_{sx}, \tau_{sy}, \tau_{sr}]^T$ 를 나타낸다. 즉, τ_s 는 바지선에 작용하는 서지(surge), 스웨이(sway)방향 힘과 회전운동 제어력을 각각 나타낸다.

이때 제어신호는 τ_s 는 4기의 예선으로부터만 들어져야 하므로 제어력분배를 통해 각 예선의 추진력으로 변환되어야 한다. 모선의 경우를 예로 들면, 제어기로부터 계산된 제어신호는 식 (6)에 따라 예선 추진력으로 제어력분배가 일어나게 된다. 이 결과를 나타낸 것이 Fig. 4이며, 4기의 예선이 만드는 추력을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 F_1, F_2 는 예선 #1, #2에 의한 모선을 끌어당기는 힘을 나타내며, F_3, F_4 는 #3, #4에 의

한 미는 힘을 나타낸다. 특히 #3, #4 예선은 모선인 바지선에 접촉된 상태라 가정하고 있어 당기는 힘은 고려할 수 없다. 이러한 사실을 고려하면 Fig. 4에서와 같이 힘의 방향이 음이라는 것은 미는 힘만으로 모선의 운동제어에 관여하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig. 5는 초기값 응답(Initial Response)을 나타낸 것으로, 실선은 서지방향 위치(x_0), 파선은 스웨이 방향 위치(y_0), 점선은 선수각(ψ_s) 변화를 각각 나타내고 있다.

결과적으로, 위에 기술한 제어력으로 선박을 원래 상태로 신속하게 복귀시키고 있음을 알 수 있다. 그리고 응답특성에서 알 수 있듯이, 목표로 설정된 위치 및 각도를 가능한 벗어나지 않도록 제어를 설계하였다.

장애물이 없다는 조건에서는 과도특성에 대한 제약을 완화시킬 수 있으나, 접안을 목적으로 안벽으로 이동해야 하는 경우에는 오버슈트 현상이 발생하지 않도록 적절하게 제어를 설계해야 한다. 이와 같은 설정 아래 신속성보다는 안전성에

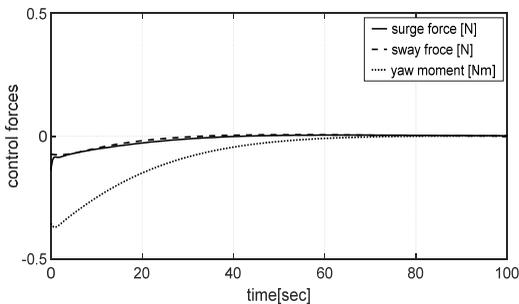


Fig. 3 Control forces made from controller (τ_s)

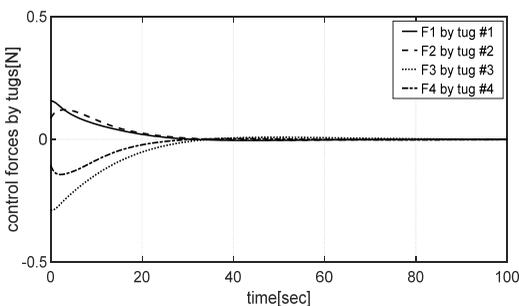


Fig. 4 Control forces made from tugs (F_i)

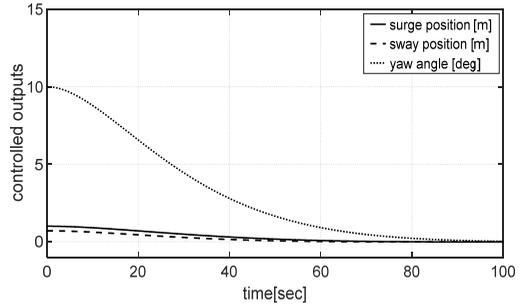


Fig. 5 Controlled outputs (initial responses)

비중을 두어 제어를 설계하였다. 결론적으로 우수한 제어성을 확보할 수 있다는 것을 시뮬레이션으로부터 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 무동력 바지선의 운동제어를 위한 제어전략과 제어계설계 문제에 대해 고찰하였다. 바지선은 추진장치가 없기 때문에 자력이동이 불가능하다. 따라서 예선의 도움으로 이동과 위치 확보가 가능하기 때문에 바지선을 이용하는 작업 과정에는 상당한 제약이 따르게 된다.

특히 항내에서는 장애물 등으로 인해 이동을 위한 제약조건은 더더욱 엄격하지만 아직도 효과적이고 명확한 문제해결 방안이 제시되어 있지 않다. 그래서 본 연구에서는 수동적인 예선의 조종으로 이루어지는 바지선 운동제어문제를 제어 이론에 기반한 지능적인 방법으로 해결하기 위한 제어전략을 제안하였다.

이때 바지선을 이동하기 위해 동원되는 예선은, 일반적인 작업환경을 고려하여 적절히 배치하고, 하나의 바지선과 4척의 예선으로 구성되는 전체 시스템의 운동특성을 하나의 상태방정식으로 표현하였다.

이를 기반으로 최적제어이론에 따라 제어칙을 구하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 신속한 이동보다는 안전성에 중점을 두어 제어를 설계하였다. 이것은 항내라는 특수한 환경을 고려한 것으로 과도한 응답특성으로 인해 안벽 등의 장애물과의 충돌을 회피하기 위한 전략

이다. 결론적으로 설정된 위치로의 안정적인 이동 특성을 확보할 수 있었다.

최근 예선기술은, 육상운송시스템과 마찬가지로, 화석연료 대신 전기식 추진장치를 적극적으로 도입하고 있다. 전기식 예선은 추진장치의 전기화 뿐만 아니라 자율운항이 가능한 기술로 발전하고 있다.¹³⁾ 이러한 기술발전으로 예선의 원격제어도 가능하게 되었다.

따라서 본 연구에서 제안하는 제어전략과 제어 기법의 적용을 통한 바지선 운동제어기술의 획기적인 발전이 기대될 수밖에 없다.

본 연구에서 제안하는 전략은 가장 보편적인 환경과 조건을 고려한 것이다. 바지선의 규모에 따라 동원되는 예선의 크기와 숫자는 달라질 수 있으나, 본 연구에서의 결과를 적절히 활용하게 되면 다양한 경우에서도 기대하는 목표를 충분히 달성할 수 있을 것이라 확신한다.

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

Y. B. Kim; Conceptualization. H. C. Park; Data curation. D. H. Lee; Formal analysis. H. C. Park; Funding acquisition. H. C. Park; Investigation. Y. B. Kim; Methodology. D. H. Lee; Software. Y. B. Kim; Supervision. D. H. Lee; Validation. H. C. Park; 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 Control, Automation and Systems Engineering*, 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. 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. 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/ksps.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/ksps.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 Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 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 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 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. T. I. Fossen, 2002, "Marine Control System -Guidance : Navigation, Rigs and Underwater Vehicle", *Marine Cybernetics*, Trondheim, Norway.
12. 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>)
13. <https://www.porttechnology.org/news/electric-tug-boat-for-port-of-san-diego>, Crowley Maritime Corporation.