

# Leader Following 시스템 조종성능 개선을 위한 제어계 설계 및 실험적 평가

트란덕권 · 김영복<sup>1</sup> · 김병각<sup>2\*</sup>

부경대학교 대학원 기계시스템공학과 학생, <sup>1</sup>부경대학교 기계시스템공학과 교수, <sup>2</sup>부경대학교 대학원 직원

## Control system design and experimental evaluation for improving maneuvering performance of a leader following system

Duc-Quan TRAN, Young-Bok KIM<sup>1</sup> and Byung-Gak KIM<sup>2\*</sup>

*Student, Department of Mechanical System Engineering, the Graduate School, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

*<sup>1</sup>Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

*<sup>2</sup>Staff, the Graduate School, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

In this study, a motion control problem for the vessel towed by towing ship on the sea is considered. The towed vessel does not have self-control capabilities such that its course stability totally depends on the towing ship. Especially, in the narrow canal, river and congested harbor area, extreme tension is required during the towing operation. The authors, therefore, propose a new control system design method in which the rudder is activated to provide its maneuverability. Based on the leader following system configuration, a nonlinear mathematical model is derived and a backstepping control is designed. By experiment results with nonlinear control framework, the usefulness and effectiveness of the proposed strategy are presented.

Keywords: Towed vessel, Towing ship, Course stability, Backstepping control, Experiment

### 서론

본 연구에서는, 예인하는 선박(예인선)과 예인되는 선박(피예인선)으로 구성된 Leader Following 시스템의 운동제어문제에 대해 고찰하고 있다. 즉, 터그보트로 조종성이 거의 없는 상태의 선박을 로우프로 연결하여 예인하는 경우의 운동제어문제, 특히 피예인선의 조종성능을 개선하기 위한 제어방법에 대해 고찰하고 있다.

선박의 조종성능개선을 통해 운항안정성과 접안안정

성을 확보하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다 (Akasaka and Yamamoto, 1999; Bu et al., 2007; Bui et al., 2010, 2011; Takai and Yoshihisa, 1987). 추진장치 및 러더의 적절한 제어를 통해서만 선박의 조종성능이 확보된다는 것은 누구나 알고 있는 일반적인 사실이며, 이러한 능동적 기능을 활용할 수 없는 경우에는 운항안정성이 보장되기 어렵다는 것을 의미한다. 본 연구에서 다루는 예인시스템이 그 대표적인 예라 할 수 있을 것이

\*Corresponding author: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6197, Fax: +82-51-629-6188

며, 특히 피예인선의 운동특성해석에 관한 연구결과는 다수 보고되어 있다. 예를 들어, Fitriadhy et al. (2013)은 피예인선의 운항특성 및 조종성능을 평가하기 위해 선형모델(linear model)을 구축하고, 파랑 등의 외란에 의한 영향을 평가하는 연구를 수행한 바 있다. 다양한 해상 환경에서 피예인선의 운항안정성과 조종성능을 평가함으로써 최적의 운항전략을 구축하기 위한 운항조건 등의 유용한 정보를 제공하였다고 평가할 수 있다. 그리고 Nam (2020)은 외란영향이 거의 없는 안정적인 조건에서 선형모델이 아닌 비선형 모델(nonlinear model)을 기준으로 피예인선의 동특성을 분석하였다.

이와 같이, 기존연구에서는 피예인선을 예인선에 단지 이끌려가는 수동적인 위치에 두고 있다. 그렇다고 해서 예인선의 이동경로에 완전히 종속되어 운동하지는 않는다. 즉, 아무런 조종기능이 없으므로 안전한 항해를 위해서는 예인선의 이동경로 또한 상당히 제약을 받을 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 피예인선에 최소한의 능동적 기능을 부여함으로써 예인시스템의 운항안정성을 개선하고자 하는데 목표를 둔다. 구체적으로는, 피예인선에 조타기능을 부여하여 그것의 적절한 제어를 통해 조종성능을 개선하고자 하는 것이다.

이러한 목표를 달성하기 위해 Tran et al. (2018, 2019)은 두척의 선박이 로우프로 연결된 예인시스템의 동적 모델을 도출하고 운동특성을 분석·평가하였다. 선형모델 뿐 만 아니라 비선형모델로 표현된 시스템의 동특성을 분석하고, 비선형제어기를 설계하여 시뮬레이션을 통해 제어성능을 평가하였다.

본 연구에서는 예인시스템의 비선형모델을 기반으로 제어기를 설계하고 수조실험을 통해 시뮬레이션 등의 이론적 연구결과의 유효성을 평가하도록 한다.

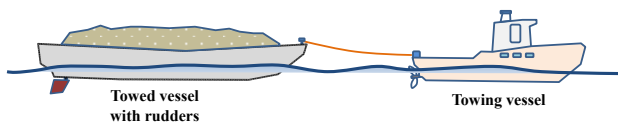


Fig. 1. Schematics of a towing system with active rudders.

### 재료 및 방법

Fig. 1에 나타난 것과 같이, 제어대상 시스템은 피예인

선이 예인선에 선수부가 로우프로 연결되어 예인되며, 독립적인 추진장치 없이 오직 조타장치만으로 선행하는 선박의 이동경로를 추종하는 시스템으로 볼 수 있다. 이때 조타장치로 선미부에 2개의 러더가 설치되어 있고 이것을 능동적으로 제어할 수 있다고 가정한다. 실제 좁은 수로를 통과하는 선박의 경우, 터그보트에 이끌려 가면서 추진장치는 적극적으로 사용하지 못한다 하더라도 조타장치를 활용하면 조종안정성을 확보할 수 있다. 또한 여러척의 터그보트 지원으로 바지선을 이동시키는 문제에도 본 연구에서 도출하는 모델식을 확대 적용할 수 있다. 즉, 예인선에 이끌려가는 피예인선은 추진장치는 없으나 조타장치는 활용할 수 있다는 전제하에 모델링을 수행한다. 그래서 모델링을 위한 예인시스템의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 선박의 조종운동을 표현하기 위한 직교좌표계로, 지구고정좌표계(Earth Fixed Frame) ( $XY$ ) 상에 예인선 중심( $x_1, y_1$ ) 및 피예인선 선체중심( $x_2, y_2$ )을 좌표계 원점에 위치시켜 선체 고정좌표계(Body Fixed Frame)로 나타낸 것이다.

Fig. 2에 나타낸 각 파라미터는 다음과 같이 정의한다.

$(x_0, y_0)$ : 예인선측 로우프로 연결점 좌표

$(x_1, y_1)$ : 예인선 무게중심

$(x_2, y_2)$ : 피예인선 무게중심

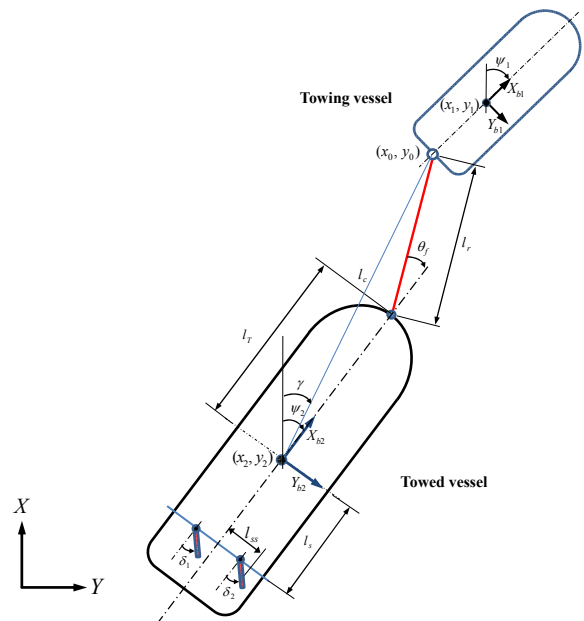


Fig. 2. Coordinate systems for a towing system.

$\psi_2$ : 피에인선의 선수각

$\gamma$ : 좌표( $x_0, y_0$ )와 ( $x_2, y_2$ ) 연결선이  $X$ 축과 이루는 각도

$\delta_i$  ( $i = 1, 2$ ): 러더 회전각

$l_c$ : 예인선측 로우프 연결점 좌표에서 피에인선 무게 중심까지의 거리

$l_r$ : 선박간을 연결하는 로우프 길이

$l_T$ : 피에인선 무게중심에서 선수 로우프 연결점까지의 거리

$l_s$ : 러더 직압력 발생 중심에서 피에인선 무게중심까지의 거리

$l_{ss}$ : 러더 직압력 발생중심에서 피에인선 중심선까지의 수직거리

### 예인선 및 피에인선 모델링

먼저 예인선의 동특성을 표현하는 모델을 구하도록 한다. 본 연구에서는 피에인선에 조종성능을 부여하여 운항안정성을 개선하는 것이 목적이므로 예인선이 제어 대상이 아니다. 즉 예인하는 선박이 임의의 경로로 운항할 경우, 이 경로를 피에인선이 잘 추종하도록 하는 제어계를 설계하는 것이 최종목표이므로 예인선에 대한 제어기는 별도로 설계하지 않는다. 따라서 예인선 모델은 일반적인 수상운동체 모델에 예인에 필요한 외력만 고려하는 다음 식으로 간단히 표현된다(Fossen, 2002).

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 \dot{\boldsymbol{\nu}}_1 + \mathbf{D}_1 \boldsymbol{\nu}_1 &= \boldsymbol{\tau}_1 - \boldsymbol{\tau}_{\text{rope}}, \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 &= \mathbf{R}(\psi_1) \boldsymbol{\nu}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

본 논문에서 고려하는 선박은  $XY$  평면에서 서로 대칭이며, 무게 및 회전중심도 좌표중심 근처에 있다고 가정한다. 위 식 (1)에서  $\mathbf{M}_1 \in R^{3 \times 3}$ 은 관성행렬이고,  $\mathbf{D}_1 \in R^{3 \times 3}$ 는 댐핑행렬로 각각 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= \begin{bmatrix} m_1 - X_{u_1} & 0 & 0 \\ 0 & m_1 - Y_{v_1} & -Y_{r_1} \\ 0 & -N_{v_1} & I_{z_1} - N_{r_1} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D}_1 &= \begin{bmatrix} -X_{u_1} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{v_1} - Y_{r_1} \\ 0 & -N_{v_1} - N_{r_1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

그리고  $\boldsymbol{\eta}_1 = [x_1, y_1, \psi_1]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표에

서의 위치( $x_1, y_1$ )와 각도  $\psi_1$ 에 대한 관성위치이다. 또한  $\boldsymbol{\nu}_1 = [u_1, v_1, r_1]^T \in R^3$ 는 선체고정좌표에서의 서지(surge), 스웨이(sway) 및 요우(yaw)방향 속도를 나타낸다. 그리고  $\mathbf{R}(\psi_1)$ 는 선박좌표를 관성좌표로 변환시키는 변환행렬로 다음 식과 같다.

$$\mathbf{R}(\psi_1) = \begin{bmatrix} \cos\psi_1 & -\sin\psi_1 & 0 \\ \sin\psi_1 & \cos\psi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식 (1)~식 (3)에 나타난 각 파라미터를 다음과 같이 정리한다.

$m_1$ : 예인선박 선체질량

$I_{z_1}$ :  $z$  축 기준 선체 관성모멘트

$X_{u_1}, Y_{v_1}, Y_{r_1}$ : 부가질량

$N_{v_1}, N_{r_1}$ : 부가관성모멘트

$u_1, v_1$ :  $x, y$  방향 속도성분

그리고, 피에인선 중심좌표( $x_2, y_2$ )와 예인선 측에 로우프가 연결되는 지점의 좌표 ( $x_0, y_0$ )와의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_2 &= x_0 + l_c \cos\gamma \\ y_2 &= y_0 + l_c \sin\gamma \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $l_c = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}$  이고, 식 (4)의 미분은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \dot{x}_0 + \dot{l}_c \cos\gamma - l_c \sin\gamma \dot{\gamma} \\ \dot{y}_2 &= \dot{y}_0 + \dot{l}_c \sin\gamma + l_c \cos\gamma \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (1)에 나타난 예인선의 동특성 모델을 참고로 하면  $\boldsymbol{\eta}_2 = [x_2, y_2, \psi_2]^T (\in R^3)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 &= \begin{bmatrix} \cos\gamma - \sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{l}_c \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

이것으로부터 상태벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{p}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} l_c \\ \gamma \\ \psi_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

그러면 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{R}(\gamma)\mathbf{H}(l_c)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{p}}_0 \quad (8)$$

이때

$$\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}(l_c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

가 된다. 이것으로부터 피예인선의 동특성은

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}(\mathbf{x})\boldsymbol{\nu}_2 - \mathbf{T}(\mathbf{x})\mathbf{R}^T(\psi_2)\mathbf{L}\dot{\mathbf{p}}_0 \quad (10)$$

와 같이 표현되고, 이 식에서  $\mathbf{T}(\mathbf{x})$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}^{-1}(l_c)\mathbf{R}^T(\gamma)\mathbf{R}(\psi_2) \quad (11)$$

여기서 표현상의 편의성을 도모하기 위해,  $\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \mathbf{T}$ ,  $\mathbf{H}(l_c) = \mathbf{H}$ 로 정의한다. 따라서 식 (10)은

$$\boldsymbol{\nu}_2 = \mathbf{T}^{-1}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{R}^T(\psi_2)\mathbf{L}\dot{\mathbf{p}}_0 \quad (12)$$

와 같이 변환하여 표현되고, 이것의 미분은 다음식과 같이 계산된다.

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_2 = \mathbf{T}^{-1}\ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{T}}^{-1}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{R}^T(\psi_2)\mathbf{L}\ddot{\mathbf{p}}_0 + \dot{\mathbf{R}}^T(\psi_2)\mathbf{L}\dot{\mathbf{p}}_0 \quad (13)$$

결국 피예인선에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$\mathbf{M}_x\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}_x\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}^{-T}(\mathbf{x})[\mathbf{q}(\boldsymbol{\nu}_2, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{p}}_0, \ddot{\mathbf{p}}_0) + \boldsymbol{\tau}] \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_x &= \mathbf{T}^{-T}\mathbf{M}_2\mathbf{T}^{-1}, \\ \mathbf{D}_x &= \mathbf{T}^{-T}\mathbf{D}_2\mathbf{T}^{-1}, \\ \mathbf{q}(\boldsymbol{\nu}_2, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{p}}_0, \ddot{\mathbf{p}}_0) &= \mathbf{M}_2\mathbf{R}^T(\psi_2)\mathbf{L}\ddot{\mathbf{p}}_0 \\ &\quad + \mathbf{M}_2\dot{\mathbf{R}}^T(\psi_2)\mathbf{L}\dot{\mathbf{p}}_0 + \mathbf{D}_2\mathbf{R}^T(\psi_2)\mathbf{L}\dot{\mathbf{p}}_0 \end{aligned} \quad (15)$$

### 제어기 설계

예인선 및 피예인선으로 구성된 예인시스템에 대한 모델링 결과를 기반으로 제어기를 설계하도록 한다. 앞서 설명하였듯이 본 연구에서는 예인선 이동경로를 피예인선이 적절히 추종하도록 제어기를 설계한다.

결국 피예인선의 운동을 두 개의 리더조작을 통해 제어하는 문제로 요약된다. 먼저, 피예인선의 운동특성을 표현한 식 (14) 및 식 (15)는 비선형미분방정식이다. 즉 비선형특성이 그대로 포함된 모델이므로 선형화를 하지 않고 비선형제어기를 설계하도록 한다. 따라서 본 연구에서는 backstepping 제어기법에 따라 제어기를 설계한다.

이를 위해 먼저, 목표궤적벡터(reference trajectory vector)를  $\mathbf{x}_d = [l_{cd} \ \gamma_d \ \psi_{2d}]^T \in \mathbb{R}^3$ 라 두고, 오차과라미터  $z_1$ 을 도입하여 다음의 관계식을 정의한다.

$$\begin{aligned} z_1 &= \mathbf{x} - \mathbf{x}_d \\ z_2 &= \dot{\mathbf{x}} - \dot{\boldsymbol{\alpha}} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $\boldsymbol{\alpha}$ 는 안정화벡터이며, 그 외 제어기를 설계하는 상세한 과정(Tran et al., 2019)은 생략한다. 결국 폐루프시스템이 안정하기 위해서는 다음의 조건

$$\dot{V}_2 = -z_1^T K_{P2} \Lambda z_1 - z_2^T K_{D2} z_2 < 0 \quad (17)$$

을 만족하는 이득  $\Lambda$ ,  $K_{P2}$ ,  $K_{D2}$ 를 결정하면 backstepping 제어기 설계가 마무리 된다. 이것으로부터, 피예인선에 대한 비선형제어기는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_2 &= -\mathbf{q} + \mathbf{T}^T[\mathbf{M}_x\dot{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{D}_x\dot{\boldsymbol{\alpha}} \\ &\quad - K_{P2}z_1 - K_{D2}z_2 - \frac{1}{2}z_2^T \mathbf{M}_x z_2] \end{aligned} \quad (18)$$

## 결과 및 고찰

### 실험장치

설계한 제어기를 이용하여 선박의 운동제어실험을 수행한 결과를 소개한다. 실험은 Fig. 3에 나타난 회류수조에서 수행되었다. 그리고 실험에 사용된 회류수조 및 선박제원, 그리고 Fig. 2에 나타난 파라미터 등은 Table 1과 Table 2에 정리하였다. 이때 러더는 가로 0.056 [m], 세로 0.064 [m] 크기의 사각형 구조이다.

실험은 회류수조에서 수행되는 일반적인 실험과 유사하게, 피에인선을 전방에 설치된 직선운동장치에 로우프르 연결하였다. 직선운동장치에 로우프가 연결된 위치는 Fig. 2에서의 좌표( $x_0, y_0$ )가 된다. 따라서 직선운동장치로 연결지점을 좌우로 이동하는 것은 선행하는 예인선의 이동경로가 변하는 것과 동일하다. 결국 피에인선이 추종해야 할 경로는 좌표( $x_0, y_0$ )를 실시간으로

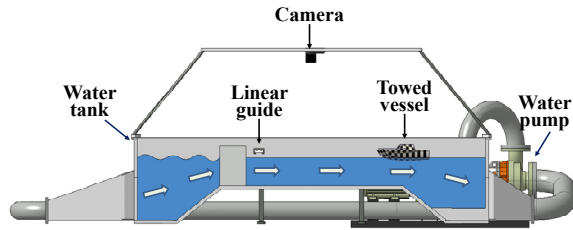


Fig. 3. Circular water channel for experiment.

Table 1. Specification of circular water channel

		Value	Unit
Pump	capacity	0.45	m <sup>3</sup> /s
	length	5.0	m
Tank	width	1.0	m
	depth	0.7	m

Table 2. Specification of model ship and other parameter values appeared in Fig. 1

Parameter or Symbol	Value	Parameter or Symbol	Value	
ship	length	0.75 [m]	$l_r$	1.0 [m]
	breadth	0.3 [m]	$l_T$	1.0 [m]
	weight	4.5 [kgf]	$l_s$	0.7 [m]
	mean draft	0.08 [m]	$l_{ss}$	0.1 [m]

계측함으로써 생성되고, 피에인선의 운동(motion)과 함께 상부에 설치한 카메라로 계측한다.

### 피에인선 동특성 및 제어기 이득

먼저 실험선박의 동특성을 나타내는 파라미터 값, 제어기이득 값은 아래 식 (19) 및 식 (20)과 같다. 선박의 동특성을 나타내는 관성행렬 및 댐핑행렬은 선행연구 및 실험을 통해 동정한 값이다.

$$M_2 = \begin{bmatrix} 13.24 [\text{kg}] & 0 & 0 \\ 0 & 13.52 [\text{kg}] & 0 \\ 0 & 0 & 0.29 [\text{kg m}^2] \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.62 [\text{kg/s}] & 0 & 0 \\ 0 & 1.63 [\text{kg/s}] & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 [\text{kg m}^2/\text{s}] \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1.99 & 0 & 0 \\ 0 & 1.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0.53 \end{bmatrix}, \quad K_{D2} = \begin{bmatrix} 0.96 & 0 & 0 \\ 0 & 0.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix},$$

$$K_{P2} = \begin{bmatrix} 2.17 & 0 & 0 \\ 0 & 2.63 & 0 \\ 0 & 0 & 0.96 \end{bmatrix} \quad (20)$$

### 실험조건 및 방법

위와 같은 준비아래 두 가지 실험을 실시하였다. 이때 유속은 0.7 [m/s], 수심은 0.3 [m]로 일정하게 유지하였고, 예인선 역할을 하는 리니어가이드 장치에 와이어를 연결하여,

(1) 리니어가이드 고정 : 예인선의 진행경로 변경없이 직진하는 경우에 해당

(2) 리니어가이드를 좌우로 왕복운동 : 예인선의 진행경로가 지속적으로 변함

와 같은 조건에서 실험을 진행하였다.

먼저 (1)의 경우는 예인선이 직진하는 대신, 피에인선을 조종하여 예인선과 임의의 위치를 유지하도록 하는 실험이다. 즉 러더제어를 통해 피에인선의 조종성능을 평가하기 위한 것이다.

그리고 (2)의 경우는 선행하는 예인선이 생성하는 경로를 피에인선이 추종하는 실험이다. 이때 상부에 설치된 카메라로 리니어가이드 연결지점과 피에인선의 운동을 계측하였으며, Fig. 4는 수조실험상황을 나타내고 있다.

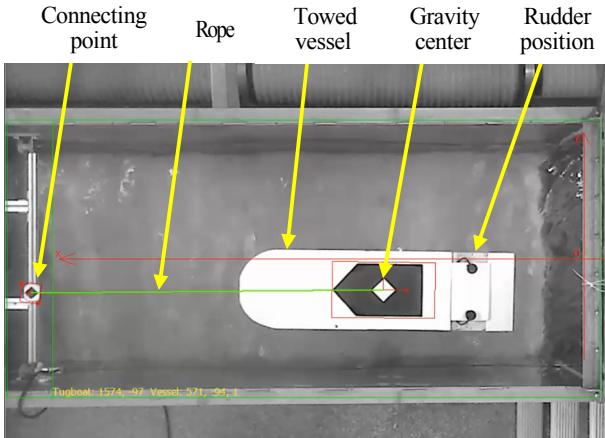
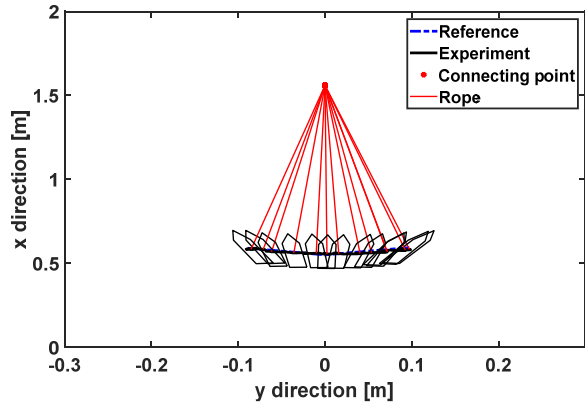


Fig. 4. Photo for presenting experiment progress in the circular water tank.

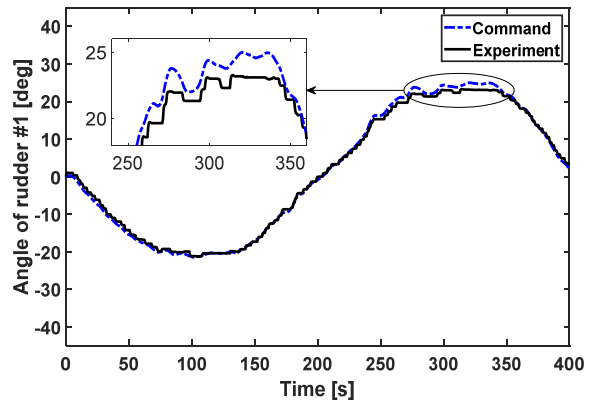
Fig. 5의 (a)는 예인선의 조종성능을 평가하기 위한 실험으로, 선행하는 예인선에서의 로우프 연결지점은 고정해 두었다. 그리고 좌우 스웨이 방향으로 피예인선이 이동해야할 위치를 설정하면 그 위치로 정확하게 이동하도록 하는 실험이다. 그림에서 붉은 실선은 연결용 로우프, 파선은 선박이 이동해야 할 목표위치, 이와 중첩된 실선은 실제 선박중심의 이동위치를 나타내고 있다. 그리고 선박모양의 오각형은 실험선박이 운동하는 실제 모션을 나타내고 있으며, 이것으로부터 선체 요우각도, 중심점 이동위치 등을 쉽게 확인할 수 있다. 결과적으로 설계한 제어기로부터 계산된 제어신호에 의해 피예인선이 설정된 위치로 정확하게 이동한다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5 (b)와 (c)는 선박운동을 제어할 때의 두 개의 러더회전각도를 나타내고 있다. 점선은 러더구동용 액추에이터 제어신호이고 실선은 실제 작동한 러더회전각도이다. 그림으로부터 러더제어성능이 상당히 양호하다는 것을 알 수 있으며, 결과적으로 우수한 선박운동제어성능을 얻을 수 있었다.

다음으로, 예인선의 선수각이 지속적으로 변하는 경우, 피예인선의 경로추종성능을 평가하도록 한다. 이를 위해 로우프가 연결된 리니어가이드를 좌우로 이동시키고, 연결지점과 선박의 선수각, 중심위치 등을 카메라로 계측하여 제어신호를 계산한다. 이때 리니어 가이드는 0.007 [m/s] 속도로 왕복운동시켰다.

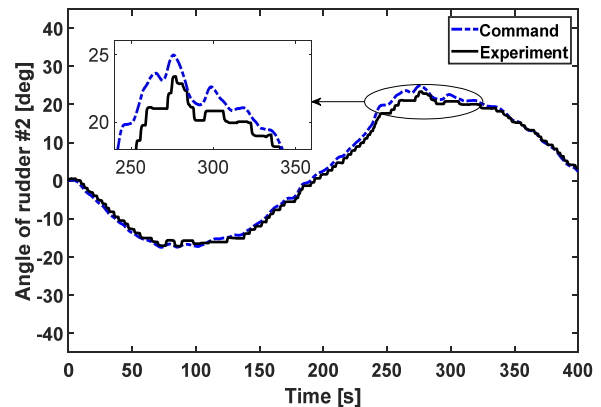
먼저 선박운동제어성능 실험결과를 Fig. 6 (a)에 나타내었다. Fig. 5의 경우와 같이, 상부 파선은 예인선에



(a) Motion and position keeping response of the towed vessel



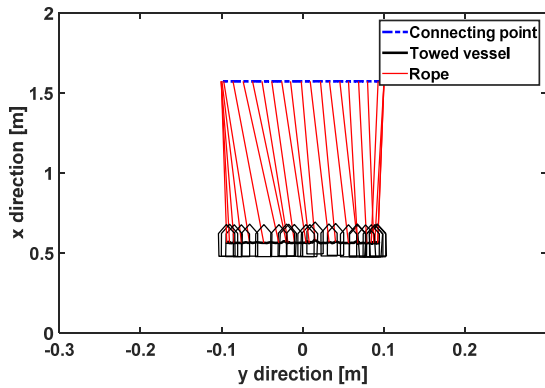
(b) Angle of #1 angle



(c) Angle of #2 rudder

Fig. 5. Motion control results of the towed vessel when the towing vessel moves ahead without heading angle change.

로우프가 연결된 지점의 이동상태를 나타내며, 붉은색 실선은 연결용 로우프, 하부 선박모양의 오각형은 피예



(a) Route tracking performance of the towed vessel with control

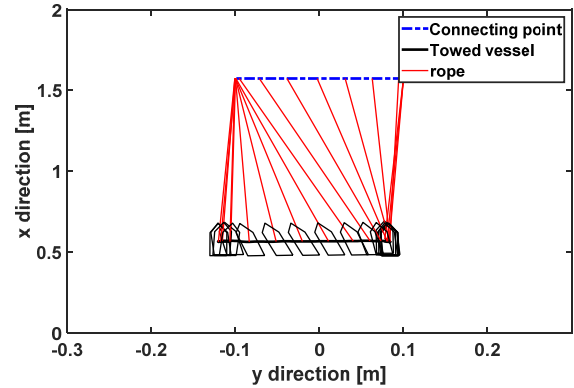
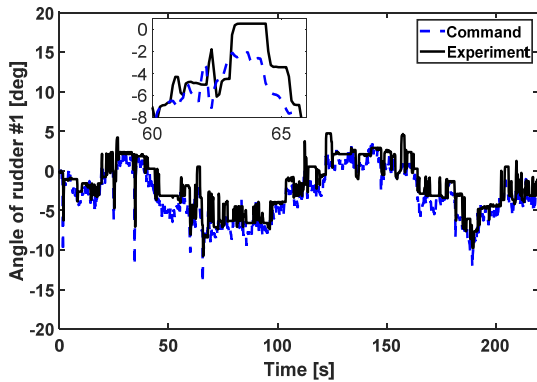


Fig. 7. Route tracking performance the towed vessel without control.



(b) Angle of #1 rudder

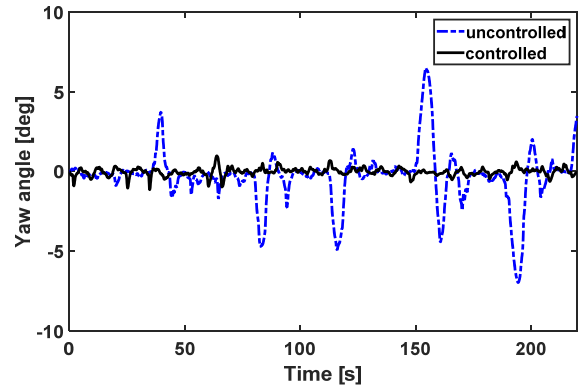
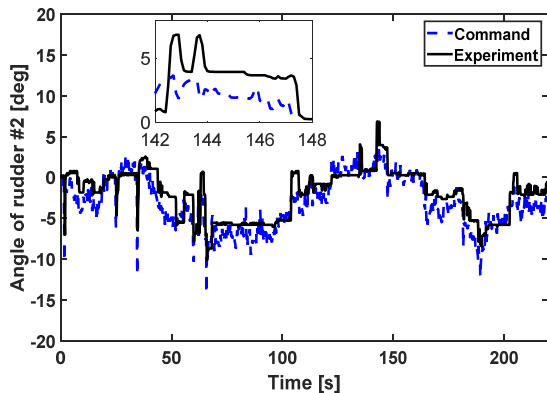


Fig. 8. Yaw motions with and without control.



(c) Angle of #2 rudder

Fig. 6. Motion control results of the towed vessel when the towing vessel moves ahead with heading angle change.

인선의 모션을 나타낸다. 중심에서 출발하여 좌우로 연결점이 이동하면 이것을 추종경로로 하여 피에인선이 적절히 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

그리고 (b), (c)는 이때의 러더회전각도를 나타내고 있다. 파선은 러더액추에이터 제어입력이며 실선은 실제 러더회전각도를 나타내고 있다.

그리고 비교평가를 위해, Fig. 6 (a)와 같은 조건에서 제어를 하지 않은 경우의 예를 Fig. 7에 나타내었다. 러더를 조작하지 않으므로 예인선의 루트와 상관없는 자유로운 통특성을 나타내고 있다.

보다 명확한 비교평가결과는 Fig. 8의 요우모션(요우각도)으로부터 확인할 수 있다. 여기서 실선은 제어를 행한 경우의 요우모션, 즉 Fig. 6 (a)의 경우에 해당하며, 파선은 제어를 수행하지 않은 Fig. 7의 경우를 나타내고 있다.

결과적으로 러더제어를 통해 피에인선의 양호한 운동 제어성능을 확보함으로써 안전한 예인시스템의 구축이 가능하다는 것을 확인하였다.

## 결론

본 연구에서는 터그보트 등의 예인선이 바지선과 같이 추진력을 갖지 않는 선박을 예인하는 시스템의 동특성 분석과 조종성능 개선을 위한 방법에 대해 고찰하였다. 지금까지 수행된 관련 연구결과에서는 피예인선을 단순히 선행하는 예인선박에 이끌려가는 수동적 시스템으로 간주하고, 이것의 동특성을 분석하고 안정적으로 예인하기 위한 방법을 모색하는 것에 그쳤다. 결과적으로 운항안정성을 확보하기 위해서는 특별히 차별성이 있는 대안다운 해결방안이 도출되지는 못하였다. 즉 예인선의 운항방법 및 전략에 대한 제약조건을 찾아내는 것이 연구결과의 전부라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수동적인 위치의 피예인선에 최소한의 능동적 기능을 부여함으로써 선박예인시스템의 안정성을 개선하고자 하였다. 즉, 일반적으로 조종성을 갖지 않는 피예인선에서 러더기능을 사용할 수 있다는 가정아래

- (1) 선박예인시스템의 동특성 분석과 비선형모델 도출
- (2) 비선형시스템에 대한 비선형제어기 설계
- (3) backstepping 제어기법을 적용한 수조실험을 통해 제안하는 기법의 유효성을 실험적으로 검증하였다.

## References

Akasaka N and Yamamoto M. 1999. Design method of ship's track keeping control system and verification by field test. *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers (in Japanese)* 35, 934-942. <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.35.934>.

Bu R, Liu Z and Li T. 2007. Non linear Sliding Mode Berthing control of underactuated surface ships ICAE 2007, 1371-1376. <https://doi.org/10.1109/icca.2007.4376584>.

Bui VP, Jeong JS, Kim YB and Kim DW. 2010. Optimal

control design for automatic ship berthing by using bow and stern thrusters. *Journal of Ocean Engineering and Technology* 24-2, 10-17.

Bui VP, Kawai H, Kim YB and Lee KS. 2011. A ship berthing system design with four tug boats. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25-5, 1257-1264. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0215-4>.

Fitriadhy A, Yasukawa H and Koh KK. 2013. Course stability of a ship towing system in wind. *Ocean Engineering* 64, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.001>.

Fossen TI. 2002. *Marine Control System, Navigation, Rigs and Underwater Vehicle*, Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 5-56.

Nam BW. 2020. Numerical investigation on nonlinear dynamic responses of a towed vessel in calm water. *Journal of Marine Science and Engineering*, 1-14. <https://doi.org/10.3390/jsme8030219>.

Takai T and Yoshihisa H. 1987. An automatic maneuvering system in berthing, *Proc. 8<sup>th</sup> Ship Control System Symposium* 2, 183-201.

Tran DQ, Suh JH and Kim YB. 2019. Leader-following control system design for a towed vessel by tugboat. *Journal of Ocean Engineering and Technology* 33-4, 462-469. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.075>.

Tran DQ, Lee DH, Kim TW, Kim YB and Park HC. 2018. A study on maneuvering performance improvement of a towed vessel without a power propulsion system: system modeling. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology (in Korean)* 54-4, 343-352. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2018.54.4.343>.

2020. 07. 16 Received

2020. 08. 01 Revised

2020. 08. 05 Accepted