

## 견인되는 선박의 조종성능 개선에 관한 연구 : 시스템 모델링

트란덕권 · 이동훈 · 김태완 · 김영복<sup>1</sup> · 박환철<sup>2\*</sup>

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

### A study on maneuvering performance improvement of a towed vessel without a power propulsion system: system modeling

Duc-Quan TRAN, Dong-Hun LEE, Tae-Wan KIM, Young-Bok KIM<sup>1</sup> and Hwan-Cheol PARK<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 48547, Korea

<sup>2</sup>First Engineer, Training Ship Kaya, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

In this study, a motion control problem for the vessels towed by tugboats or towing ships on the sea is considered. The towed vessel looks like the barge ship, which is used for many purposes. In these vessels, basically, the power propulsion system is not installed but just towed by a towing vessel such as tugboats with ropes and wires. It means that the motions of towed vessel are basically dependent on the tracking route of towing boat. Therefore, in some cases, undesirable and unpredictable motions may be made by environmental factors such as wave, wind attack and so on. As a result, a collision accident with others may occur during maneuvering situation. Based on these facts, the authors try to encourage the steering performance of the towed vessel by using controllable rudders without any propulsion system. In this study, especially, a controllable vessel with three rudders is considered, and a mathematical model is induced for the future study. The model is described as surge, sway motion and inertia moment by following the general representation method for the surface ship.

KeyWords : Towed vessel, Tugboat, Barge ship, Power propulsion system, Towing vessel, Undesirable and unpredictable motion, Steering performance, Rudder, Mathematical model

#### 서론

제어계측기술발전은 그 적용영역과 대상을 불문하고 활발하게 접목되어 괄목할 만한 성과를 거두고 있다. 특히 해양분야로의 활용도는 점점 높아져 최근에는 선박의 무인자율운항이 가능한 수준에까지 이르렀다. 항

공 및 육상분야에서는 이미 적용되어 실용화단계까지 이른 기술일지라도, 열악한 해양환경 등으로 그 적용범위나 수준이 낮은 것이 사실이다. 이와 같이 아직까지 첨단기술의 적용범위가 해양산업분야에서는 비교적 제한적이다.

예를 들어, 제어기술이 선박운동제어문제에 적용되기

\*Corresponding author: phc1120@hanmail.net, Tel: +82-51-629-6197, Fax: +82-51-629-6188

시작한 것은 1990년대 초반부터이었고, 초기에는 주행 속도변화가 작거나 거의 일정 속도에서의 경로제어문제가 주된 이슈였다. 이후 선박 접안을 위한 연구 등 보다 복잡하고 어려운 연구가 수행되었는데, 예를 들어 이론적 연구로, 다층 피드포워드 뉴럴(neural) 회로망을 사용하여 자동으로 선박을 접안하기 위한 다 변수 뉴럴제어기 설계방법이 제시되었다(Yamato et al., 1990; Zang et al., 1997). 선박운동제어 관련 연구결과 중 가장 대표적인 것으로는 4기의 이지무스 추진장치(azimuth type propeller)를 갖는 선박운동제어시스템 구축에 관한 것이다(Fossen, 2002). 이 연구는 가장 선도적인 연구결과로 평가받고 있으며, 일반 선박 보다는 FPSO, 드릴쉽 등 특수목적선의 자기위치유지시스템(DPS : Dynamic Positioning System)으로 활용되고 있다. 그 외 연구도 이론적 접근방법이 다를 뿐, 주추진장치와 러더(rudder) 조작을 통해 선박운동을 조종하는 방법에 관한 연구결과 등이 대부분이다(Akasaka and Yamamoto, 1999; Bu et al., 2007; Duc, 2001; Kasasbeh et al., 1993; Takai and Yoshida, 1987).

위의 선행연구결과에서는, 외항에서와 같이 항내에서도 경로를 설정하여 설정된 경로를 추종하도록 하는데 제어목표를 두고 있다. 즉, 사이드 스러스터(side thruster) 없이 주추진장치와 러더만의 조작에 의한 연구결과이나, 지능적인 운동제어가 얼마든지 가능한 장비가 개발되어 선박운동제어 성능을 획기적으로 개선할 수 있는 수준에 이르렀다. 그래서, 외항에서 내항으로 접근한 이후에는 보다 정교한 선박운동제어전략이 필요한데, 접안시의 안정성 확보문제를 부분적으로 극복하기 위해 사이드 스러스터만으로 안벽과 평행하게 선박을 이동시켜 접안의 마지막 단계를 완성하고자 하는 시도도 있었다(Bui et al., 2010).

보다 진전된 연구로는, 4기의 터그보트(tugboat)를 원격으로 제어하여 접안하는 방법과(Bui et al., 2011; Bui and Kim, 2011), 사이드 스러스터 외 안벽에 댐퍼형의 가이드 장치 도입하여 터그보트 지원없이도 접안이 가능하도록 하는 연구도 수행되었다(Tran et al., 2014). 이 연구결과는 접안의 최종단계에서 접안작업의 안정성을 극대화하려는 연구결과로 어떠한 접안지원기술을 도입한다 하더라도 반드시 필요한 기술로 평가된다.

위에서 소개한 다양한 선박운동제어방법 및 기술은

제어대상 선박에 능동적 제어장치를 설치하여 운용하는 것이다. 즉, 독립적인 운동제어시스템을 선박자체에 갖춘 경우이다. 그러나 해상에서는 특수한 목적으로 작업용 장비를 탑재한 무동력 선박(바지선 등)을 이용해야 할 경우가 많다. 예를 들어 조선소에서 대형구조물을 옮겨야 하는 경우에는 바지선 형태의 해상크레인을 이용해야 하며, 터그보트로 해상크레인이 설치된 작업선을 견인해야 한다.

작은 규모로는 모래 등의 화물을 이송하는데 이용되는데, 어느 경우이나 추진장치를 갖지 않고 예인선으로 견인하는 방법을 이용한다. 이와 같이 바지선 자체에는 조종성을 확보하기 위한 어떠한 장치도 갖고 있지 않다. 따라서 예인선이 앞서면서 길잡이 역할을 하더라도, 파도 및 바람 등의 영향으로 바지선의 이동경로를 예인선에 일치시키는 것이 어렵다.

특히 선회성 악화는 말할 것도 없이, Fig. 1과 같이 지나치는 선박이 만들어내는 파도 등은 일순간에 견인되는 선박이 예인선 경로를 벗어나게 하여 타 선박과의 충돌을 유발시키는 등 상당한 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 근본적으로 해결하기 위한 방법에 대해 고찰하고자 한다. 기본적으로 바지선 등은 무동력선이나, 선박 조종성을 개선하기 위해 최소한의 능동적 수단을 도입하기로 한다. 견인을 위한 기술 개발에 관한 연구사례를 굳이 찾는다면, 원치조종 및 설계에 관한 연구결과가 전부라 할 수 있다(Lee et al., 2000; Tran and Kim, 2016).

그래서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 견인되는 선박에 적절한 수의 러더를 설치하여 무동력선의 조종성능을 개선하는 방법에 대해 고찰한다. 즉, 추진장치 없이, 조종성능을 개선하기 위해 러더장치만을 도입한다. 소규모 발전장치, 배터리를 설치하거나, 예인선으로부터 전원을 공급받음으로써 러더장치의 조작과 운용은 얼마든지 가능하다.

이와 같은 사실과 가정보다 동력장치가 없는 선박의 조종성능을 개선하기 위해, 3개의 러더를 설치하고 이를 적절히 조절함으로써 이상적인 리더-팔로우(leader-follower) 개념의 무동력 선박 조종시스템을 구축하고자 한다.

본 연구에서는 우선, 제안하는 시스템의 동적특성을 수식적으로 표현하고, 향후 능동제어시스템구축에 활용하기 위해 필요한 사항 등을 검토하고 평가하도록 한다.

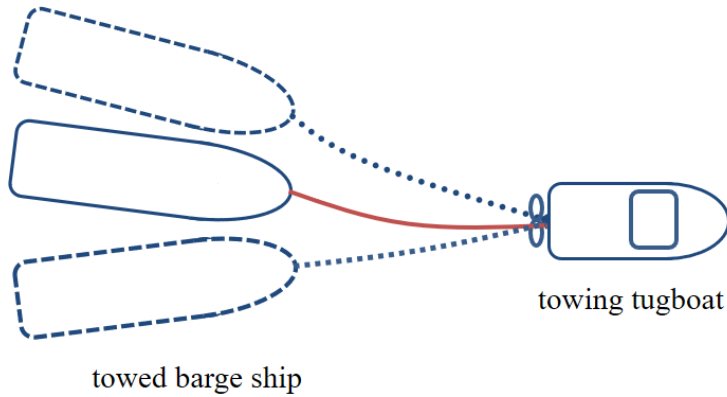


Fig. 1. Description of towed ship motions due to environmental disturbance inputs.

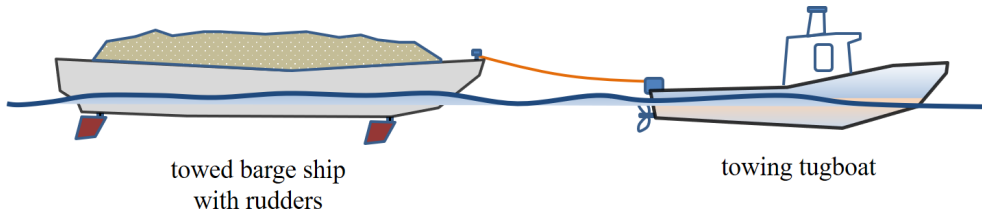


Fig. 2. Schematics of the proposed towed ship motion control system using active rudders.

### 재료 및 방법

#### 제어대상의 포괄적 표현

Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 제어대상선박은 독립적인 추진력을 갖지 않고, 예인선에 선수부가 로우프로 연결되어 예인된다. 여기서, 앞서 기술한 것과 같이 3개의 러더를 선수부 및 선미부 임의의 위치에 적절하게 설치하여 조종성능을 개선하고자 한다. 설치되는 러더수는 적절히 선정하면 되나, 본 연구에서는 기초연구 단계이므로 3개의 러더가 설치된 경우로 한정한다. 그러나 본 연구결과를 러더수를 최적화하는 문제로 확대할 경우, 3개 미만의 러더로도 충분한 조종성능을 개선할 수 있는 방법을 찾을 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는, 견인되는 선박에 3개의 러더가 장착되어 있다고 가정할 경우의 운동특성을 해석하도록 한다.

본 논문에서 고려하는 선박은 Fig. 3과 같이  $XY$  평면에서 서로 대칭이며, 무게 및 회전중심도 좌표중심 근처에 있다고 가정하고, 선박운동방정식을 다음과 같은 일반적인 선형모델로 나타낸다.

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

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

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

그리고  $\eta = [x, y, \psi]^T \in R^3$ 는 지구고정좌표(Earth Fixed Frame)에서의 위치  $(x, y)$ 와 각도  $\psi$ 에 대한 관성위치이다. 또한  $\nu = [u, v, r]^T \in R^3$ 는 선체고정좌표(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.

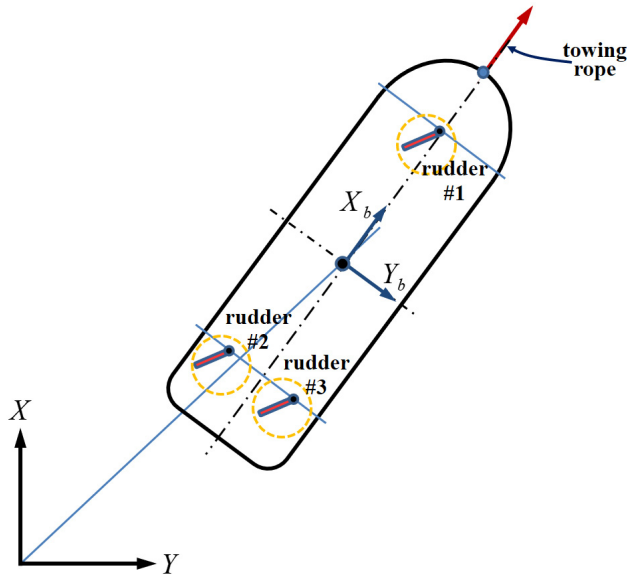


Fig. 3. Controlled vessel description for modeling.

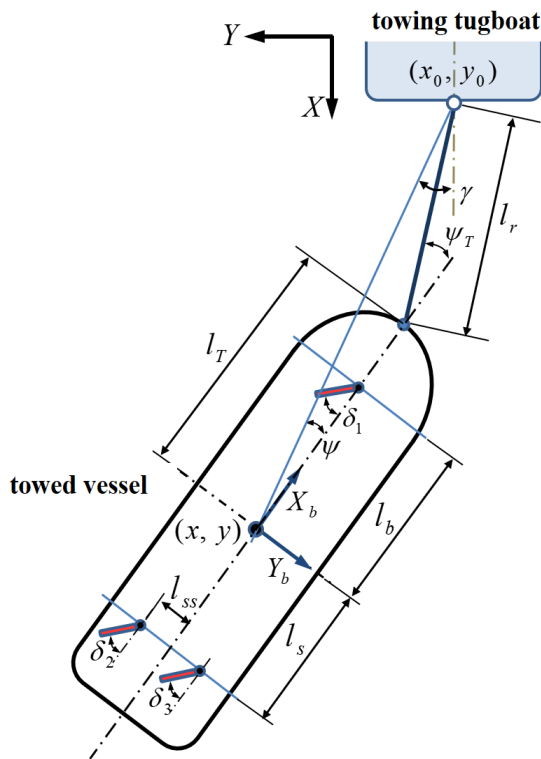


Fig. 4. A transformed controlled vessel description for modeling.

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

위 식에 나타낸 각 파라미터를 다음과 같이 정리한다.

- $m$  : 선체질량
- $I_z$  : 선체의  $z$ 방향 관성모멘트
- $X_u, Y_v, Y_{\dot{v}}, Y_r$  : 부가질량
- $N_v, N_r$  : 부가관성모멘트
- $u, v$  :  $x, y$ 방향 속도성분

Fig. 3에서 제어대상 선박은 선수부에서 선도하는 예인선에 의해 견인되기 때문에 로우프가 연결되는 예인선의 선미부를 목표지점으로 설정하고 이것을 추종하는 형태로 구성할 수 있다. 이것은 Fossen (2001)이 제안한 WOPC(Weather Optimal Positioning Control)로 변환하여 문제를 해결할 수 있다는 것을 의미한다.

이것으로부터 Fig. 3은 Fig. 4와 같이 변환하여 나타낼 수 있게 된다. 그리고, Fig. 4에서 각 파라미터는 다음과 같이 정의한다.

- $(x_0, y_0)$  : 공간고정좌표계
- $(x, y)$  : 선체고정좌표계
- $\psi_T$  : 로우프와 선체중심이 이루는 각
- $\gamma$  : 예인선 중심선과 견인되는 선박 무게중심  $(x, y)$  이 이루는 각
- $\delta_i (i = 1, 2, 3)$  : 러더 회전각
- $l_r$  : 선박간을 연결하는 로우프 길이
- $l_T$  : 견인선박 무게중심에서 선수 로우프 연결부까지의 거리
- $l_b$  : 선수부 #1 러더 직압력 발생 중심에서 견인선박 무게중심까지의 거리
- $l_s$  : 선미부 #2, #3 러더 직압력 발생중심에서 견인선박 무게중심까지의 수직거리
- $l_{ss}$  : 선미부 #2, #3 러더 직압력 발생중심에서 견인선박 중심선까지의 수직거리

#### 러더운동으로 발생하는 힘의 해석

먼저 유속이 존재하는 상황에서, 러더가 운동함에 따라 발생하는 힘은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

러더에서 만들어지는 힘은 크게 두 가지로 구분된다.

즉, 그림에서와 같이, 리더 중심선에 평행하게 작용하는 평행력( $F_{RTi}$ )과, 리더가 회전함으로써 리더 중심선에

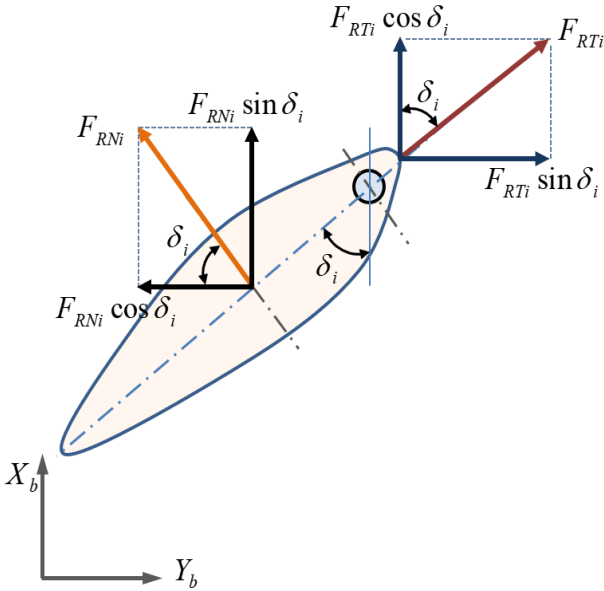


Fig. 5. Generated forces in the rudder due to rudder rotating.

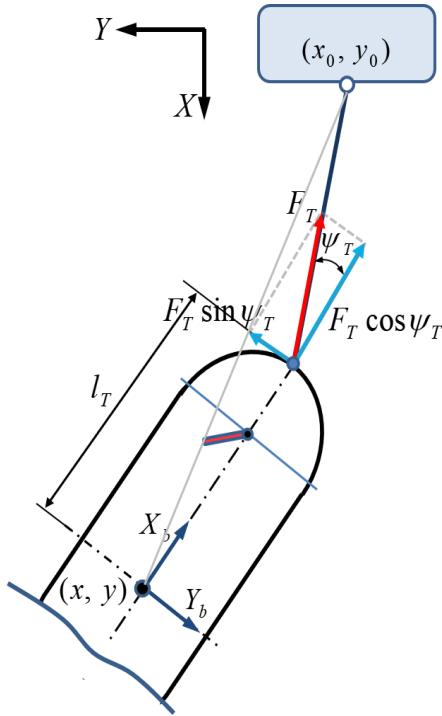


Fig. 6. Towing force vector.

수직으로 작용하는 직압력( $F_{RNi}$ )이다. 일반적으로  $F_{RTi}$ 는  $F_{RNi}$ 에 비해 작은 값으로, 선형화 및 간이하 과정에서 무시할 수 있다. 이 문제는 제어계설계 과정에서 다시 한번 거론하도록 한다.

그리고 Fig. 6은 로우프에 의한 견인력( $F_T$ )이 선박에 작용하는 힘 벡터를 나타내고 있다.

결국 Fig. 4 ~ Fig. 6에 나타난 각 힘 벡터로부터, 견인되는 선박의 서지, 스웨이방향 추력 및 회전모멘트는 아래 식과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$F_{RN1} \sin \delta_1 + F_{RT1} \cos \delta_1 = F_{s1} \quad (4)$$

$$F_{RN2} \sin \delta_2 + F_{RT2} \cos \delta_2 = F_{s2} \quad (5)$$

$$F_{RN3} \sin \delta_3 + F_{RT3} \cos \delta_3 = F_{s3} \quad (6)$$

$$F_T \cos \psi_T = F_{Tx} \quad (7)$$

먼저, 선수부에 설치된 1번 리더와, 선미부 2번 및 3번 리더가 회전운동을 할 때 발생하는 서지방향 추력은 식 (4)~(6)에, 그리고 로우프 견인력 중 서지방향 추력은 식 (7)에 각각 나타내었다.

그리고, 리더에 의한 스웨이 방향 추력을 식 (8)~(10)에, 로우프 견인력 중 스웨이 방향 추력은 식 (11)에 각각 나타낸다.

$$-F_{RN1} \cos \delta_1 + F_{RT1} \sin \delta_1 = F_{sw1} \quad (8)$$

$$-F_{RN2} \cos \delta_2 + F_{RT2} \sin \delta_2 = F_{sw2} \quad (9)$$

$$-F_{RN3} \cos \delta_3 + F_{RT3} \sin \delta_3 = F_{sw3} \quad (10)$$

$$-F_T \sin \psi_T = -F_{Ty} \quad (11)$$

위 식 (4)~(11)에 나타난 서지 및 스웨이 방향 추력으로부터 유효모멘트는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$(F_{s2} - F_{s3})l_{ss} + F_{sw1}l_b - (F_{sw2} + F_{sw3})l_s - F_{Ty}l_T \quad (12)$$

### 선형화 및 선형모델

본 연구에서는 선형제어이론에 기반하여 제어기를 설계할 것이다. 따라서 제어대상에 대한 모델 또한 선형화 과정을 통해 선형모델로 표현해야 한다.

먼저, Fig. 5에서 평행력  $F_{RTi}$ 는 직압력  $F_{RNi}$ 에 비해

상대적으로 작은 값이므로 무시할 수 있다.

또한 러더 회전각  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 선수각  $\psi$  및 선체중심과 견인 로우프가 이루는 각  $\psi_T$ 가 비교적 작은값이라 가정한다 (즉,  $\sin \delta_i(\psi, \psi_T) \approx \delta_i(\psi, \psi_T)$ ,  $\cos \delta_i(\psi, \psi_T) \approx 1$ )

그리고, 러더 직압력  $F_{RNi}$  ( $i = 1, 2, 3$ )는 일반적으로

$$F_{RNi} = \rho A_R u^2 \frac{\partial C_R}{\partial \delta_i} \quad (13)$$

와 같이 정의된다. 여기서  $\rho$ 는 유체밀도,  $A_R$ 는 러더 단면적,  $C_R$ 는 양력계수를 나타낸다. 만약 유속변화가 작다고 한다면, 위 식은 선형화된 식으로 다시 표현할 수 있게 된다. 단, 식 (13)의 직압력은 Fig. 5와 같이 서지 및 스웨이 방향 힘으로 분해되는데, 러더회전각 범위가 제한적이라는 것을 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{RNi} \sin \delta_i = \alpha_{si} K_{Ri} \frac{\delta_i}{\delta_{imax}} \quad (14)$$

$$F_{RNi} \cos \delta_i = \alpha_{ci} K_{Ri} \frac{\delta_i}{\delta_{imax}} \quad (15)$$

여기서,

$$K_{Ri} = \max(F_{RNi}, \delta_i = \delta_{imax}) \quad (16)$$

식 (16)에서, 상수  $\alpha_{si}$ ,  $\alpha_{ci}$  ( $i = 1, 2, 3$ )는 실험장치를 구성한 후 실험을 통해 동정해야 할 상수값이며,  $K_{Ri}$  ( $i = 1, 2, 3$ )는 러더각을 최대허용각도로 회전할 때 발생하는 최대 직압력을 나타낸다. 여기서 러더각을  $|\delta_i| \leq 45[\text{deg}]$  범위로 제한하게 되면 일반성을 유지하는데 아무런 문제가 없다.

이것으로부터 비선형 특성을 포함한 식 (4)~(12)는 다음 식과 같이 선형화 된다.

$$F_{s1} = \alpha_{s1} K_{R1} \frac{1}{\delta_{1max}} \delta_1 \quad (17)$$

$$F_{s2} = \alpha_{s2} K_{R2} \frac{1}{\delta_{2max}} \delta_2 \quad (18)$$

$$F_{s3} = \alpha_{s3} K_{R3} \frac{1}{\delta_{3max}} \delta_3 \quad (19)$$

$$F_{Tx} = F_T \quad (20)$$

$$F_{sw1} = -\alpha_{c1} K_{R1} \frac{1}{\delta_{1max}} \delta_1 \quad (21)$$

$$F_{sw2} = -\alpha_{c2} K_{R2} \frac{1}{\delta_{2max}} \delta_2 \quad (22)$$

$$F_{sw3} = -\alpha_{c3} K_{R3} \frac{1}{\delta_{3max}} \delta_3 \quad (23)$$

$$F_{Ty} = F_T \psi_T \quad (24)$$

여기서,  $\psi_T$ 의 변화가 충분히 작다면, 견인력 중 스웨이 방향 성분인  $F_{Ty}$  또한 충분히 작은 값이 되어 견인력의 대부분이 서지 방향 성분  $F_{Tx}$ 로 나타나게 된다. 따라서 식 (24) 또한 무시할 수 있게 된다.

이와 같이 위의 식에서는 비선형 특성이 포함된 일부 파라미터를 선형화를 통해 간이화 하였다. 즉, 선형화과정에서 제어대상의 물리특성이 일부 무시되어 수식으로 표현되지 않게 되었다. 이렇게 무시되거나 정확하게 표현되지 않는 부분을 불확실성으로 고려하여 모델에 반영하기로 한다. 즉, 서지, 스웨이 동특성 및 요우모멘트에 반영하고자 하는 불확실성을  $\Delta\tau(\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3)$ 로 묶어서 나타낸다.

이렇게 하면,  $\tau = \tau_0 u_s + \Delta\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T, \tau_3^T]^T \in R^3$ 는 다음 식으로 정리할 수 있다(여기서  $\tau_0$ 는  $\tau$ 에서 불확실성을 제외한 부분을 의미한다).

$$\begin{aligned} \tau_1 &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{Tx} + \Delta\tau_1 \\ \tau_2 &= F_{sw1} + F_{sw2} + F_{sw3} + F_{Ty} + \Delta\tau_2 \\ \tau_3 &= l_{ss} F_{s2} - l_{ss} F_{s3} + l_b F_{sw1} - l_s F_{sw2} \\ &\quad - l_s F_{sw3} - l_T F_{Ty} + \Delta\tau_3 \end{aligned} \quad (25)$$

이것으로부터 제어대상은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{M} \dot{x}_s &= A_s x_s + B_s u_s + d_s w_s \\ y_s &= C_s x_s + D_s u_s \end{aligned} \quad (26)$$

여기서, 상태  $x_s = [v^T, \eta^T]^T = [u, v, r, x, y, \psi]^T$ , 제어입력  $u_s = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, F_T]^T$ 이며,  $w_s$ 는 외란입력을 나타낸다. 그리고, 식 (26)의 시스템 행렬은 다음과 같이 정의되며,  $C_s, D_s$ 는 실험장치 등의 시스템구성 및 제어계설계 과정에서 결정하면 된다.

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & -Y_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -N_v & I_z - N_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad A_s = \begin{bmatrix} -D & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_v & N_r & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} \tau_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{s1} K_{R1} \frac{1}{\delta_1 \max} & \alpha_{s2} K_{R2} \frac{1}{\delta_2 \max} & \alpha_{s3} K_{R3} \frac{1}{\delta_3 \max} & 1 \\ -\alpha_{c1} K_{R1} \frac{1}{\delta_1 \max} & -\alpha_{c2} K_{R2} \frac{1}{\delta_2 \max} & \alpha_{c3} K_{R3} \frac{1}{\delta_3 \max} & 0 \\ -l_b \alpha_{c1} K_{R1} \frac{1}{\delta_1 \max} & (l_{ss} \alpha_{s2} + l_s \alpha_{c2}) K_{R2} \frac{1}{\delta_2 \max} & (l_s \alpha_{c3} - l_{ss} \alpha_{s3}) K_{R3} \frac{1}{\delta_3 \max} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad d_s = \begin{bmatrix} \Delta\tau \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\tau_1 \\ \Delta\tau_2 \\ \Delta\tau_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

본 연구에서의 제어목표는 리더 조작을 통해 회진각도  $\gamma = 0$  이 되도록 하는데 있다. 따라서 파라미터  $\gamma$  도 제어변수로 포함되어야 한다. 이를 위해서는 식 (1)의 상태변수에 대한 변환이 필요하다. 그래서 여기서 좌표  $(x, y)$ 를 다음과 같이 극좌표 형식으로 표현한다.

$$\begin{aligned} x &= x_0 + l_c \cos\gamma \\ y &= y_0 + l_c \sin\gamma \end{aligned} \quad (28)$$

여기서  $l_c = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  이고, 식 (28)의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 + \dot{l}_c \cos\gamma - l_c \sin\gamma \dot{\gamma} \\ \dot{y} &= \dot{y}_0 + \dot{l}_c \sin\gamma + l_c \cos\gamma \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (29)$$

이것으로부터 식 (1)에서

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \cos\gamma - \sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{l}_c \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 상태벡터를 다음과 같이 정의하자.

$$\dot{p}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} l_c \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} \quad (31)$$

그러면

$$\dot{\eta} = \mathbf{R}(\gamma) \mathbf{H}(l_c) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{L} \dot{p}_0 \quad (32)$$

이고,

$$\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma - \sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}(l_c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

가 된다. 이것으로부터 식 (32)는

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}(\mathbf{x}) \boldsymbol{\nu} - \mathbf{T}(\mathbf{x}) \mathbf{R}^T(\psi) \mathbf{L} \dot{p}_0 \quad (34)$$

로 되고, 여기서  $T(x)$ 는 다음과 같다.

$$T(x) = H^{-1}(l_c)R^T(\gamma)R(\psi) \quad (35)$$

여기서 표현상의 편의성을 도모하기 위해,  $T(x) = T$ ,  $H(l_c) = H$ ,  $M(v) = M$ ,  $D(v) = D$ 로 정의한다. 따라서 극좌표 형식 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} v &= T^{-1}\dot{x} + R^T(\psi)L\dot{p}_0 \\ \dot{v} &= T^{-1}\ddot{x} + \dot{T}^{-1}\dot{x} + R^T(\psi)L\ddot{p}_0 + \dot{R}^T(\psi)L\dot{p}_0 \end{aligned} \quad (36)$$

따라서 식 (1)의 기본적인 상태방정식은 다음과 같이 상태가 변환된 형식으로 표현할 수 있다.

$$M_x \ddot{x} + D_x \dot{x} = T^{-T}(x)[q(v, x, \dot{p}_0, \ddot{p}_0) + \tau] \quad (37)$$

$$\begin{aligned} M_x &= T^{-T}MT^{-1}, \\ D_x &= T^{-T}DT^{-1}, \\ q(v, x, \dot{p}_0, \ddot{p}_0) &= MR^T(\psi)L\ddot{p}_0 + M\dot{R}^T(\psi)L\dot{p}_0 + DR^T(\psi)L\dot{p}_0 \end{aligned} \quad (38)$$

이것으로부터 상태가 변환되게 되면 기존 상태방정식의 상태  $x_s = [v^T, \eta^T]^T$ 는  $x_s = [\dot{x}^T, \eta^T]^T = [\dot{l}_c, \dot{\gamma}, \dot{\psi}, l_c, \gamma, \psi]^T$ 로 변환하여 나타낼 수 있다.

결국, 지금까지의 모델링과정을 기반으로 제어기를 설계하고 제안한 제어기법의 유효성을 검토해야 한다. 위에서 도출하고 정리한 모델에서, 약간의 선형화 과정과 간이화 절차가 필요할 것이며, 이를 기초로 향후 시뮬레이션 및 실험을 수행할 계획이다.

### 결과 및 고찰

본 연구에서는 추진력을 갖는 선박이 추진력이 없는 무동력 선박을 견인하는 문제에 대해 고찰하였다. 터그보트로 바지선을 견인하는 경우가 가장 일반적인 한 예라 할 수 있는데, 특성상, 두 선박간은 적절한 거리를 유지하면서 로우프 등으로 연결하여 이동한다. 이때 아무런 제어장치가 없는 바지선은 터그보트의 운항상태에

의존하면서도, 파랑 등의 외적요인에 직접적으로 노출된다. 경우에 따라서는 진자가 공중에서 불규칙적으로 평면운동을 하는 것과 같은 현상이 발생하며, 조종성 손실은 물론 지나치는 타 선박과의 충돌위험성도 지극히 높아지게 된다. 이동 중인 상황에서 뿐만 아니라, 목표지점에 도착했다 하더라도, 거의 인력으로 끌고 당기는 작업을 통해서만 작업이 완료된다.

이러한 문제는 무동력선이 갖는 공통적인 사항이나, 화물이송이나 육중한 작업도구 등을 옮겨야 하는

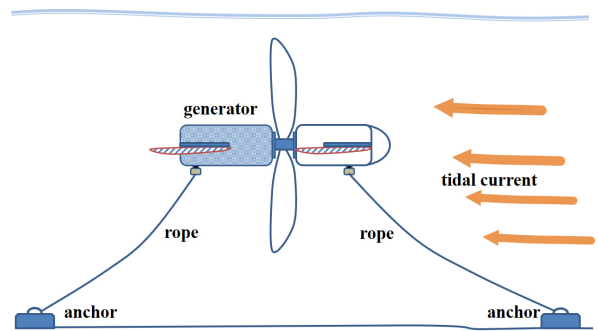


Fig. 7. A tidal current power generator.

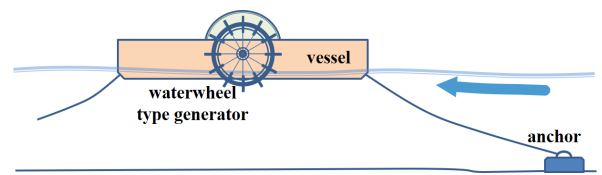


Fig. 8. A vessel type water-power generator installed on the river.

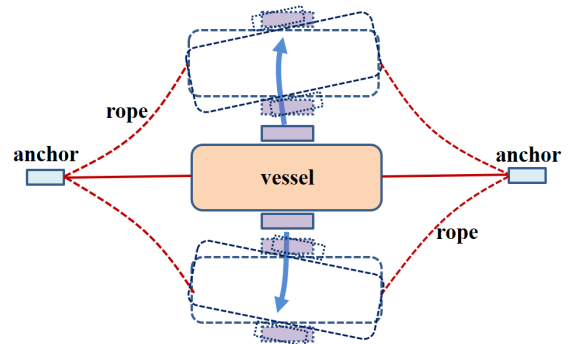


Fig. 9. Considerable vessel motions due to changing of environmental factors.



중대한 역할을 하는 도구로서는 너무 원시적인 수준에 머물러 있다 할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 최소한의 동력을 사용하는 액추에이터를 견인되는 무동력선에 장착하여 위에서 거론된 문제점을 해결함으로써 작업 효율성과 안전성을 개선하고자 하는데 그 목표를 두고 있다.

이를 위해, 로우프로 견인되는 선박의 운동특성 및 러더조종을 통해 발생하는 힘이 선박에 미치는 영향을 분석하여, 그 운동특성을 수식모델로 표현하였다. 러더의 배치위치나 러더 수 등은 제어계 설계과정에서 최적화기법을 이용하여 결정할 수 있고, 결과적으로는 최적화된 모델을 도출할 수 있을 것이다.

본 연구에서 다루는 문제는 굳이 터그보트와 바지선의 작업 상황에 국한되는 것이 아니다. 예를 들어 Fig. 7~Fig. 9에 나타난 것과 같이, 수중 혹은 수상에서 운용되는 발전시스템에도 적용할 수 있다. 그림에 나타난 것과 같이 조력, 유속 및 방향 변화에 따라 발전시스템의 위치나 운동특성이 달라지며 발전효율도 변하게 된다. 따라서 최상의 발전효율을 확보하거나 보수관리를 위해서는 설정된 위치를 유지해야 하고, 경우에 따라서는 인위적으로 적절한 위치로 이동시키기도 해야 한다. 발전시스템은 기본적으로 능동적인 운동제어장치를 갖추지 않고, 로우프 계류방식에 의존하나, 본 연구에서 고려하고 있는 방법으로 핀 및 러더 장치를 도입함으로써 운용 효율성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 실험장치 등의 하드웨어를 구축하여 시뮬레이션과 실험연구를 진행할 것이며, 본 연구에서 추구하는 목표 및 제안하는 방법의 유효성을 평가하도록 할 것이다.

## 사 사

본 연구는, 중소벤처기업부 2018년도 지역특화(주력)산업육성사업(융복합R&D) 지원에 의해 수행되었습니다(과제명 : ICT 융합 스마트 슬라이딩 도킹 시스템 개발, 과제번호 : P0004935).

## 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 35, 934-942. (DOI:10.9746/sicetr1965.35.934)  
 Bu R, Liu Z and Li T. 2007. Non linear sliding mode berthing control of underactuated surface ships. *ICAA 2007*. 1371-1376. (DOI: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. (DOI:10.1007/s12206-011-0215-4)  
 Bui VP and Kim YB. 2011. Development of constrained control allocation for ship berthing by using autonomous tugboats. *International Journal of Control Automation and Systems* 9(6), 1203-1208. (DOI:10.1007/s12555-011-0622-4)  
 Duc LM. 2001. An automatic control system for ship harbour manoeuvres using decoupling control. *Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea. (DOI:10.1109/robot. 2001.932918)  
 Fossen TI. 2002. *Marine Control System-Guidance, Navigation, Rigs and Underwater Vehicle*, Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology.  
 Kasasbeh YA, Pourzanjani MM and Dove MJ. 1993. Automatic berthing of ship, *Proc. of the Institute of Marine Engineers, the 3<sup>rd</sup> International Conference on Maritime Communications and Control*, London, 10-17.  
 Lee DJ, Kim JK and Kim BS. 2000. Design of an automatic winch system for small fishing vessel. *Journal of the Korean Society for Fisheries and Technology* 36(3), 157-165.  
 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 AMD, Ji SW and Kim YB. 2014. A ship berthing system design by cooperating with tugboats and dampers. *Journal of Drive and Control* 11(3), 7-13. (DOI:10.7839/ksfc.2014.11.3.007)  
 Tran AMD and Kim YB. 2016. Dynamic identification and robust control performance evaluation of towing rope under rope length variation. *Journal of the Korean Power System Engineering* 20(2), 58-65. (DOI:10.9726/kspse. 2016.20.2.058)  
 Yamato H, Uetsuki H and Koyama T. 1990. Automatic

berthing by the neural controller, Proc. 9th Ship Control Systems Symposium, USA, 3, 183-201. (DOI:10.1016/s1474-6670(17)35058-9)

Zhang Y, Hearn GE and Sen P, 1997, A multivariable neural controller for automatic ship berthing, Journal of IEEE

Control System 17, 31-44. (DOI:10.1109/37.608535)

---

2018. 10. 29 Received

2018. 11. 14 Revised

2018. 11. 16 Accepted