



# 쌍축선의 비대칭 타 토크를 고려한 최대 허용 보상각 추정에 관한 타당성 검토 연구

유영준<sup>1,†</sup>·강민우<sup>2</sup>·이승민<sup>3</sup>

울산대학교 공과대학 조선해양공학부<sup>1</sup>

울산대학교 일반대학원 조선및해양공학과<sup>2</sup>

(주)HD현대중공업 조선사업본부 기장설계부<sup>3</sup>

## A Feasibility Study on the Maximum Allowable Compensation Angle Considering Asymmetric Rudder Torque of Twin-Screw Ships

Youngjun You<sup>1,†</sup>·Minwoo Kang<sup>2</sup>·Seungmin Lee<sup>3</sup>

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan<sup>1</sup>

Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, University of Ulsan<sup>2</sup>

Machinery Outfitting Design Department, Shipbuilding Division, HD Hyundai<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In most twin-screw ships, rudders are typically synchronized for ease of rudder design and steering gear capacity decision. However, asymmetric rudder torque was observed during 35° turning tests of a 174K LNGC. Consequently, it was necessary for us to carry out feasibility study to improve turning performance, particularly in relation to the development of an intelligent navigation system. This paper aims to evaluate the maximum allowable compensation angle by considering asymmetric rudder torque. First, a mathematical model for predicting the maneuvering behavior of the 174K LNGC was developed and verified. Second, the empirical formula for rudder torque calculation, as suggested by the IACS, was modified to account for asymmetric inflow speed at the rudders. Third, maximum allowable compensation angles were determined according to rudder deflection angles. Finally, the potential effectiveness of the proposed approach was assessed through zigzag simulations considering the suggested concept.

**Keywords** : Maximum allowable compensation angle(최대 허용 보상각), Asymmetric rudder torque(비대칭 타 토크), Twin-screw (쌍축), Intelligent navigation system(지능형 항해 시스템), Maneuvering behavior(조종운동)

### 1. 서론

선박이 대형화됨에 따라 선박의 운항 안전성 및 효율성을 높이기 위하여 두 개의 추진기와 두 개의 타(rudder)를 탑재한 쌍축선이 설계, 건조되고 있다. 주로 174K급 천연가스운반선(LNGC) 및 초대형 컨테이너선 등 쌍축 상선에 관한 연구가 이루어져 왔으나( Kim et al., 2014; Kim et al., 2007), 상선에서는 조타기(steering gear)와 타 설계 및 제어의 편의성 때문에 동일한 값으로 제어하는 것이 일반적이다( You et al., 2017; You et al., 2018). 다만, 쌍축 선박의 추진기, 타 고장 시 조종성능 또는 운항 안전성에 대한 평가가 필요한 경우( You, 2018; Li et al., 2024), 횡동요 감쇠에 좌, 우현 타를

이용하는 경우( Zhao et al., 2019), 아-접안을 위하여 좌, 우현 추진기, 타를 이용하는 경우( Lee and Kim, 2023) 등 제한된 경우에 좌, 우현의 타를 개별 제어하기도 한다.

하지만, 실제 선박의 조종운동 시 좌, 우현 타에 작용하는 유체력은 선박의 편류각(drift angle), (각)속도, 추진기 유동 등의 영향을 받아 같지 않다. Muscari et al. (2017)은 전산유체역학(CFD)을 통해 쌍축 선박의 추진기-타 거동의 비대칭성을 분석한 바 있으며, 비대칭성을 고려한 쌍축 선박의 조종성능 추정 결과를 모형시험 결과와 비교, 검증한 바 있다. Liu and Chang (2012)과 Chang and Kong (2019)은 쌍축 선박에 작용하는 타력의 비대칭성을 보상하기 위한 좌, 우 타의 동기화된 제어기법을 제안한 바 있다.

최근 대형 조선소와 쌍축 선박의 운항 안전성 및 효율성 향상에 관한 기술 검토를 진행하면서, 좌, 우현 타에 작용하는 유체력의 비대칭성을 고려한 지능형 항해 시스템 개발 가능성을 인지하였다. 174K급 쌍축 천연가스운반선의 시운전 과정에서 좌, 우현 타 토오크의 비대칭성을 관찰하였으며, Fig. 1에서 보는 것처럼 전산유체역학을 이용하여 타에 작용하는 압력의 비대칭성을 확인하기도 했다. 시운전 중 타 토오크 지시기를 관찰했을 때, 좌, 우현 35° 선회 시 선회 반경의 바깥쪽에 위치한 타에 더 적은 타 토오크가 계측되며, 안쪽에 위치한 타에 더 큰 토오크가 계측되는 경향성을 확인할 수 있었다. 만약, 조종운동의 방향에 따라 타 토오크가 적게 작용하는 타를 추가로 제어하면, 선박에 작용하는 선회력이 향상되거나, 다중화될 수 있다고 판단하였다. 이는 플랩 타를 설치한 선박에서, 타 제어를 통해서 생성되는 타력에서 플랩 제어를 통해 추가적인 타력을 생성함으로써 선회력을 향상시키거나, 다양한 크기의 선회력 조합을 통해 조타 행위가 용이해지는 것과 유사하다. 이와 같은 초기 검토와는 별도로, 해외 선주로부터 쌍축 선박 좌, 우현 타의 비연성 제어를 통해 지능형 항해 시스템의 고도화 요구가 접수되어 관련 연구의 필요성을 재확인하였다.

본 연구에서는 비대칭 타 토오크를 고려한 쌍축 선박의 수학적 모델을 적용, 검증한 후, 비대칭 타 토오크를 고려한 최대 허용 보상각 추정을 목표로 하였다. 첫째, 174K급 천연가스운반선의 설계, 모형시험, 전산유체역학 해석 결과를 고려한 수학적 모델을 적용하여 표준 조종시험을 모사, 대형 조선소 내부 시뮬레이션 결과와 비교, 검증하였다. 둘째, 국제선급협회(IACS)에서 조타기 용량 산정을 위하여 제안한 타 토오크 경험식을 검토, 좌, 우현 타의 타 토오크를 추정할 수 있도록 수학적 모델을 수정하였다. 셋째, 선박의 속도, 타각(좌, 우 동일)의 차이가 35° 선회에 미치는 영향을 분석하였다. 넷째, 좌, 우현 타의 개별 제어 시 추가 보상 타각의 개념을 정의하고, 그 크기가 35° 선회 시 선박의 조종운동에 미치는 영향을 분석하고, 타 토오크 시계열을 분석하였다. 마지막으로, 쌍축 선박의 비대칭 타 토오크를 고려한 최대 허용 보상각을 추정, 분석한 후, 이를 고려했을 때 침로 변경 시 반응 속도에 대한 검토를 지그재그 시뮬레이션을 통해 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대상 선박의 조종운동에 관한 수학적 모델의 적용, 검증 및 타 토오크 경험식 수정 방법을

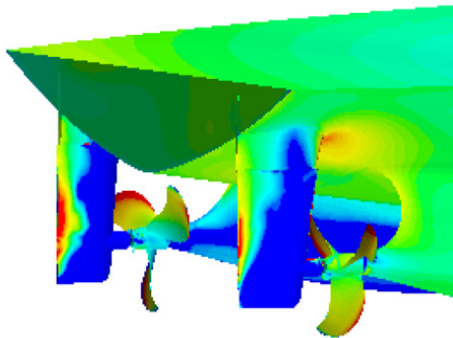


Fig. 1 An example of asymmetric pressure acting on rudders (PORT and STBD) calculated from CFD analysis

기술하였다. 3장에서는 최대 허용 보상각의 개념을 정의한 후, 검증된 수학적 모델을 적용, 보상각 추정을 위한 시뮬레이션 조건을 작성하였다. 4장에서는 선박의 속도, 타각의 크기가 35° 선회에 및 타 토오크에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 정의된 최대 허용 보상각 개념에 따라, 그 값을 추정하였다. 5장에서는 본 연구에서 제시한 결과를 요약, 정리하였다.

## 2. 대상 선박 및 수학적 모형

### 2.1 대상 선박 (174K급 천연가스운반선)

본 연구에서는 174K급 천연가스운반선을 대상 선박으로 연구를 수행하였다. Table 1에서 대상 선박의 선체, 추진기, 타의 주요 제원을 보여주고 있다. (상세한 제원은 대형 조선소의 내부 규정에 따라 비공개 또는 유사한 값으로 표기하였다.)

### 2.2 수학적 모형 (3 DOF 조종운동방정식)

본 연구에서는 174K급 천연가스운반선의 조종운동 시 타 토오크를 추정하는데, 3자유도 조종운동방정식을 기반으로 수학적 모델을 구성하였다. Fig. 2에서는 본 연구에서 사용한 수학적 모형의 축계 정의를 보여주고 있다. 여기서,  $x_g, y_g$ 는 지구고정좌표계 세로축과 가로축을,  $x, y$ 는 NED 기준 선체고정좌표계 선체 길이방향과 폭방향 축을 가리킨다.  $u, v, r$ 는 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw) (각)속도를 가리키며,  $X, Y, N$ 는 각각의 힘과 모멘트를 가리킨다.  $\delta_{PORT}, \delta_{STBD}$ 는 좌, 우현 타 제어각,  $\beta$ 는 편류각,  $\psi$ 는 선수각(heading angle)을 각각 가리킨다.

주어진 수학적 모형은 무게중심을 기준으로 조종운동방정식을 유도했기 때문에, 식 (1)과 같이 표현된다.  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 는 전후동요, 좌우동요, 선수동요 (각)가속도를 가리킨다.  $m$ 은 선박의 질량을,  $I_{zz}$ 는 질량관성모멘트를 가리킨다. 하첨자  $H, P, R$ 은 각각 선체, 추진기, 타에 작용하는 유체력을 가리킨다.

Table 1 Principal particulars of 174K LNGC

| Item                                    | LNGC                      |
|---|---------------------------|
| Length between perpendiculars (Lpp) [m] | 284.0                     |
| Breadth (B) [m]                         | 46.4                      |
| Draft (T) [m]                           | 12.6                      |
| Displacement [m <sup>3</sup> ]          | (approximately) 124,000.0 |
| (Maneuvering) speed [knots]             | 18.5                      |
| Propeller No. [EA]                      | 2                         |
| Propeller diameter [m]                  | 8.5                       |
| Rudder No. [EA]                         | 2                         |
| Rudder area [m <sup>2</sup> ]           | (approximately) 38.0      |

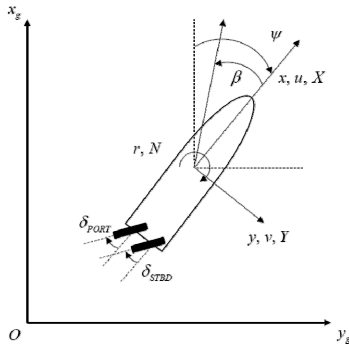


Fig. 2 Coordinates

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X_H + X_P + X_R & (1) \\ m(\dot{v} + ur) &= Y_H + Y_P + Y_R \\ I_{zz}\dot{r} &= N_H + N_P + N_R \end{aligned}$$

식(2), (3), (4)는 선체에 작용하는 유체력에 관한 수학모형으로, HD 현대중공업에서 이용하고 있는 컴포넌트형 (또는 모듈형) 모델이다. 여기서, (각)속도 성분을 하첨자로 가지고 있는  $X, Y, N$  계수는 유체력미계수를 가리키며 (Sung et al., 2009; Sung and Park, 2015), '은 무차원화된 값,  $m_x, m_y, J_{zz}$ 는 각각 부가질량 및 부가질량관성모멘트를 가리킨다. HD 현대중공업 내부 절차에 따라, 전산유체역학을 이용하여 추정된 식 (2), (3), (4)의 유체력미계수 일체를 제공받았다 (Sung and Park, 2015).

$$X'_H = X'_{uu}u'^2 - m'_x\dot{u}' + (X'_{vr} + m' + m'_y)v'r' + X'_{vv}v'^2 + X'_{rr}r'^2 \quad (2)$$

$$Y'_H = Y'_vv' - m'_y\dot{v}' + Y'_{vvv}v'^3 + Y'_{vvr}v'^2r' + (Y'_r - m'_r - m'_x)Y'_{rrr}r'^3 + Y'_{vrr}v'r'^2 \quad (3)$$

$$N'_H = N'_vv' - J'_{zz}\dot{r}' + N'_{vvv}v'^3 + N'_{vvr}v'^2r' + N'_{rr}r'^2 + N'_{rrr}r'^3 + N'_{vrr}v'r'^2 \quad (4)$$

식(5), (6), (7)은 추진기에 작용하는 유체력에 관한 수학모형으로, 좌, 우현의 추진기 설치 위치를 고려하여 계산한다 (You, 2018).  $t_d$ 는 추력감소계수,  $K_T$ 는 추진기단독시험에서 얻은 추력계수,  $J$ 는 전진비,  $\rho$ 는 해수 밀도,  $n$ 은 초당회전수,  $D_P$ 는 추진기 직경,  $y_P$ 는 추진기 축계가 선체 중심선에서 떨어진 거리를 각각 가리킨다. 하첨자 PORT, STBD는 각각 좌현과 우현을 가리킨다.

$$X'_P = \frac{(1.0 - t_d)K_T(J_{PORT})\rho n_{PORT}^2 D_P^4}{0.5\rho L_{PP}TU^2} + \frac{(1.0 - t_d)K_T(J_{STBD})\rho n_{STBD}^2 D_P^4}{0.5\rho L_{PP}TU^2} \quad (5)$$

$$Y'_P = 0.0 \quad (6)$$

$$N'_P = y'_P \frac{(1.0 - t_d)K_T(J_{PORT})\rho n_{PORT}^2 D_P^4}{0.5\rho L_{PP}TU^2} - y'_P \frac{(1.0 - t_d)K_T(J_{STBD})\rho n_{STBD}^2 D_P^4}{0.5\rho L_{PP}TU^2} \quad (7)$$

식(8), (9), (10)은 타에 작용하는 유체력에 관한 수학모형으로, 좌, 우현 타 설치 위치를 고려하여 계산한다 (You, 2018).

$$X'_R = \frac{-(1.0 - t_R)F_{N,PORT}\sin\delta_{PORT}}{0.5\rho L_{PP}TU^2} - \frac{(1.0 - t_R)F_{N,STBD}\sin\delta_{STBD}}{0.5\rho L_{PP}TU^2} \quad (8)$$

$$Y'_R = \frac{-(1.0 + a_H)F_{N,PORT}\cos\delta_{PORT}}{0.5\rho L_{PP}TU^2} + \frac{-(1.0 + a_H)F_{N,STBD}\cos\delta_{STBD}}{0.5\rho L_{PP}TU^2} \quad (9)$$

$$N'_R = -x'_R \frac{(1.0 - t_d)K_T(J_{PORT})\rho n_{PORT}^2 D_P^4}{0.5\rho L_{PP}TU^2} - x'_R \frac{(1.0 - t_d)K_T(J_{STBD})\rho n_{STBD}^2 D_P^4}{0.5\rho L_{PP}TU^2} \quad (10)$$

식(11), (12), (13), (14), (15)는 타에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하는데 필요한, 타력의 수직방향성분 ( $F'_N$ ), 타 유입 속도의 유효 입사각( $\alpha_R$ ), 타 유입류의 합속도( $U_R$ ) 등을 가리킨다.  $f_\alpha$ 는 타 직압력 계수의 기울기이다.

$$F'_N = \frac{A_R}{LT} \frac{U_R^2}{U^2} f_\alpha \sin a_R \quad (11)$$

$$a_R = \delta - \gamma_2 \frac{U}{u_R} \beta_R \quad (\text{if } \beta_R > 0) \quad (12)$$

$$a_R = \delta - \gamma_1 \frac{U}{u_R} \beta_R \quad (\text{if } \beta_R < 0)$$

$$U_R^2 = u_R^2 + v_R^2 \quad (13)$$

$$u_R = \epsilon(1 - \omega)u \times \left[ \eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + 8K_T/\pi J^2} - 1 \right) \right\} + (1 - \eta) \right]^{0.5} \quad (14)$$

$$v_R = \gamma_R \cdot (v + r l_R) \quad (15)$$

$$\eta = H_R / D_P \quad (16)$$

### 2.3 타 토오르크 경험식 (국제선급협회)

선박의 타 면적 및 조타기 용량 설계를 위하여 식 (17), (18)에서 보는 것처럼, 국제선급협회에서 개발한 경험식이 널리 이용되어 왔다 (Korean Register, 2019). 본 연구에서도 좌, 우현의 타에 작용하는 비대칭 타 토오르크의 추정 가능성을 확인하기 위하여 해당 수식을 검토하였다.  $T_R$ 은 타 토오르크,  $F_R$ 은 타력,  $r$ 은 타에 작용하는 압력 중심에서 타축까지 떨어진 거리를 가리킨다.  $K_1, K_2, K_3$ 는 선박 및 타 설계정보를 고려하여 수식을 이용하여 계산된 값이며,  $A$ 는 타 면적,  $V$ 는 선박의 운항 속도를 가리킨다 (Korean Register, 2019).

$$T_R = F_R \times r \quad (17)$$

$$F_R = 132 K_1 K_2 K_3 A V^2 \quad (18)$$

국제선급협회 타 토오르크 경험식은 타 면적 및 조타기 용량을 설계하기 위하여 작성된 것이기 때문에, 임의의 조종운동 상태에서 좌, 우현 타 유동 특성에 따른 타 토오르크의 비대칭성을 고려할 수 없음을 확인하였다. 이를 수정하기 위하여, 조종운동방정식에서 추정하는 타력( $F_N$ )을 식 (17)의  $F_R$ 과 같다고 가정함으로써, 임의의 조종운동 상태에서 좌, 우현 타에 작용하는 유체력과 타 토오르크를 각각 추정하고자 했다. 이 때, 좌, 우현 타 토오르크에 차이가 반영되는 이유는 좌, 우 타에 작용하는  $\gamma_1, \gamma_2$  성분 때문이다.

### 2.4 수학적 검증

앞에서 기술한 수학적 모델을 적용하여 비대칭 타 토오르크 추정하기 전에, 적용된 수학적 모델 및 코드의 검증을 수행하였다. Fig. 3, 4, 5는 각각 대상 선박의 35° 선회, 10°/10° 지그재그, 20°/20° 지그재그 시뮬레이션 결과를 가리킨다. Table 2는 HD 현대중공업에서 제공한 내부 시뮬레이션 결과와 본 연구를 위해 작성한 코드에서 계산된 결과를 오차율로 표시한 것이다. (HD 현대중공업으로부터 내부 시뮬레이션을 통해 추정했던 35° 선회시험 전진거리, 선회지름의 크기 및 도달시간, 지그재그 시험의 오버슈트값을 전달받았다. 주어진 값을 공개하는데 제한이 있어, 오차율로 정리하였다.) 여기서, 현대중공업 내부 시뮬레이션 결과는 실제 설계, 건조 선박을 대상으로 이미 검증되어 있음을 전제로, 울산대에서 작성한 코드 결과와 현대중공업 코드 결과를 비교, 검증하고자 했다.

조종 시운전 시 초기 속도를 유지하는데 필요한 분당회전수를 계산했고, 설계된 속도-분당회전수 곡선에서의 분당회전수와 1% 이내의 미미한 차이를 보였다. 35° 선회의 경우 전진거리, 선회지름의

크기 및 도달시간 관점에서 미미한 차이가 있음을 확인할 수 있어, 본 연구에서 작성된 수학적 모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 다만, 지그재그 시험의 경우 오차율이 다소 큰 것을 확인할 수 있다. 오버슈트 각의 경우 기준 값의 크기가 작기 때문이며, 실제 오차는 크지 않다고 판단된다. HD 현대중공업에서 제공한 설계정보 및 모형시험 정보를 이용했음에도 오차가 발생하는 것은 일부 미제공된 값을 경험식에서 도출했거나, 수치해석 기법의 차이, 저항 및 추진기 특성을 고려하는데 회귀분석을 사용한 것 등 다른 점이 있기 때문이다.

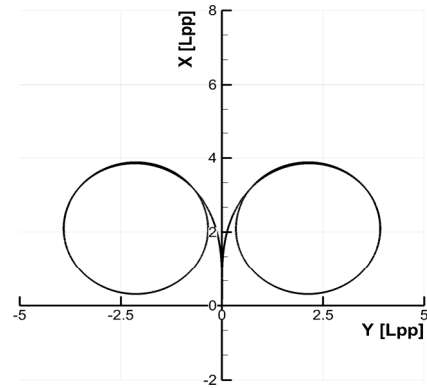


Fig. 3 Trajectories for 35° turning tests of 174K LNGC to port and starboard side

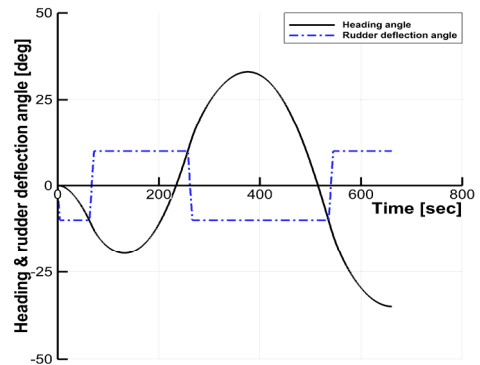


Fig. 4 Time series of heading angle and rudder deflection angle for 10° / 10° zigzag test of 174K LNGC to port side

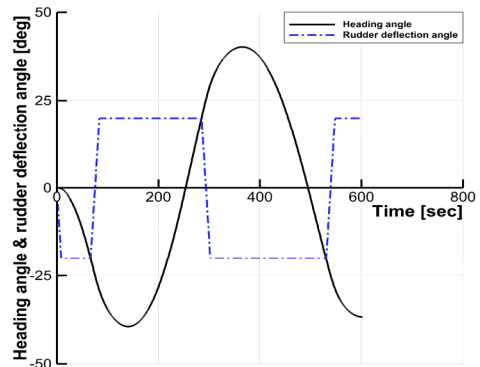


Fig. 5 Time series of heading angle and rudder deflection angle for 20° / 20° zigzag test of 174K LNGC to port side

Table 2 Errors between simulation results (present study) and simulation results (HD hyundai)

| Item             |                                     | Error [%] |
|------------------|-------------------------------------|-----------|
| RPM              | RPM at (maneuvering) speed [-]      | -0.96     |
| 35° turning test | Time at advance [sec]               | -0.67     |
|                  | Advance [Lpp]                       | -0.81     |
|                  | Time at tactical diameter [sec]     | +0.30     |
|                  | Tactical diameter [Lpp]             | -3.88     |
| 10°/10° zigzag   | 1 <sup>st</sup> overshoot angle [°] | -5.71     |
|                  | 2 <sup>nd</sup> overshoot angle [°] | -21.08    |
| 20°/20° zigzag   | 1 <sup>st</sup> overshoot angle [°] | -5.71     |

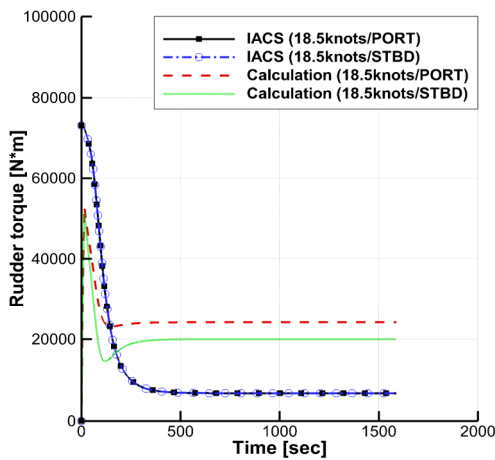


Fig. 6 Time series of rudder torque acting on rudders (PORT and STBD) using IACS empirical formulae and modified approach during 35° turning test to port side

Fig. 6에서는 35° 선회(좌현)를 수행하는 동안 좌, 우현 타에 작용한 타 토크 시계열을 보여주고 있다. 국제선급협회 경험식에서는 타 토크가 선박의 속도를 포함한 설계 정보에 따라 변화하기 때문에 선회를 시작하는 초기 시점에 가장 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다 (Korean Register, 2019). 반면, 수정된 방법을 적용한 경우, 선회가 시작된 이후 빠르게 증가, 정점에 도달했다가, 다시 감소, 수렴하는 경향성을 보였다. 이는 선회 과정에서 계산되는 선박의 (각)속도 시계열의 특징과 유사하다.

하지만, 식 (17), (18)에서 설명했던 것처럼, 수정된 타 토크 경험식을 이용할 경우 좌, 우현의 타에 유입되는 유동 특성을 고려할 수 있기 때문에 Fig. 6에서 보는 것처럼 좌, 우현의 타 토크 비대칭성이 나타남을 확인할 수 있다.

### 3. 최대 허용 보상각 계산 조건

#### 3.1 최대 허용 보상각 정의

지능형 항해 시스템 고도화 관점에서 제안하는 보상각의 정의는 다음과 같다. 일반적으로, 선회를 하는 선박에서 선회지름의 바깥쪽

Table 3 Simulation matrix for investigating maneuvering characteristics according to rudder conditions (synchronized, fixed, and compensated)

|  | Test value                                  |
|--|---|
| Speed [knots]                                      | 5.0, 13.0, 18.5, 21.0                       |
| Rudder deflection angle [°] (synchronized)         | 5, 15, (20), 25, 35                         |
| Rudder deflection angle for PORT [°] (fixed)       | 1, 2, ... , 35                              |
| Rudder deflection angle for STBD [°] (compensated) | +1, +2, ... +n (up to limited rudder angle) |

타에 더 작은 토크가, 안쪽 타에 더 큰 토크가 작용한다. 첫째, 안쪽 타는 기존의 타각을 유지하고, 바깥쪽 타를 더 크게 사용할 때 좌, 우현 타각의 차이를 보상각으로 정의한다. 둘째, 선회 시 정상상태에 도달했을 때 수렴된 타 토크를 기준으로, 바깥쪽 타 토크는 안쪽 타 토크를 초과하지 않는 범위까지 바깥쪽 타를 더 크게 제어할 수 있다. 이때, 보상각의 최대값을 최대 허용 보상각으로 정의한다. 셋째, 최대 타각은 35°를 초과할 수 없으며, 최대 타각(35°)과 고정된 안쪽 타각의 차이를 해당 조건에서 최대 허용 보상각의 제한값으로 가정한다.

### 3.2 계산 조건

검증된 수학모형을 이용하여, 비대칭 타 토크와 관련된 선박의 동특성을 검토한 후 최대 허용 보상각을 찾고자 했다. 이를 위하여, 계산 조건은 Table 3과 같이 정리했다. 선박의 속도는 조종 시운전 속도인 18.5 knots를 기준으로, 5.0 knots, 13.0 knots, 21.0 knots에 대해서 각각 검토한다. 동특성 검토를 위한 선회 시뮬레이션 시, 기준이 되는 타각은 5°, 15°, 25°, 35°를 수행했다. 다만, 최대 허용 보상각 도출 과정을 설명하는 그림은 좌현 타각 20°를 기준으로 작성하였다. 특히, 좌현 타를 고정한 조건에서, 우현 타의 최대 허용 보상각을 찾기 위하여 1°부터 35°까지 검토했다. 다만, 최대 허용 타각의 제한값을 초과할 수는 없어 1도부터 제한값 n°까지 탐색하고자 했다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 타각 별 선회 성능에 대한 검토

Table 4, 5에서는 선박의 초기 속도, 타각에 따라 전진거리와 선회지름을 계산하였다. (검토를 위하여 Table 3의 동기화 (synchronized) 조건에서 시뮬레이션을 수행했다. 대형 조선소 내부 규정에 조종성 지수를 표기할 수 없어, 조종 시운전 속도에서의 시뮬레이션 값을 기준으로 상대 비율로 표시하였다. 명령 타각이

Table 4 Ratio of predicted advance divided by advance at maneuvering speed with maximum rudder angle of 35°

|            | 35°     | 25°     | 15°     | 5°      |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 21.0 knots | 100.77% | 111.06% | 134.52% | 216.25% |
| 18.5 knots | 100.00% | 110.48% | 134.16% | 216.14% |
| 13.0 knots | 98.30%  | 109.18% | 133.37% | 215.90% |
| 5.0 knots  | 95.80%  | 107.28% | 132.21% | 215.54% |

Table 5 Ratio of predicted tactical diameter divided by tactical diameter at maneuvering speed with maximum rudder angle of 35°

|            | 35°     | 25°     | 15°     | 5°      |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 21.0 knots | 100.06% | 115.65% | 144.00% | 224.95% |
| 18.5 knots | 100.00% | 115.61% | 143.97% | 224.94% |
| 13.0 knots | 99.87%  | 115.53% | 143.92% | 224.92% |
| 5.0 knots  | 99.72%  | 115.42% | 143.85% | 224.88% |

같다면 전진거리와 선회지름의 차이는 미미함을 알 수 있다. 일반적으로 선박의 조종성능 추정에서는 속도에 따라 유체력계수가 변하지 않는다는 가정을 전제로 하기 때문이다. 반면, 명령 타각의 크기가 감소함에 따라 전진거리, 선회지름은 뚜렷하게 증가함을 알 수 있다. 이것은 타에 작용하는 유체력으로 인한 선회 모멘트의 크기는 타각( $\delta_{PORT}$ ,  $\delta_{STBD}$ )에 따라 변화하기 때문이다.

### 4.2 타각 별 수렴 속도에 대한 검토

Table 6에서는 선회지름에 도달했을 때, 선박의 수렴 속도를 보여주고 있다. 선박의 초기속도가 낮으면 수렴된 속도가 더 낮아지는 경향성을 확인할 수 있고, 명령 타각이 작을수록 선박의 수렴 속도는 높아짐을 알 수 있다. 선박의 타 제어에 의한 선회 모멘트의 크기가 작으면, 선회 중 편류각의 크기가 작아지고, 선체에 작용하는 유체력의 크기가 작아지며, 그로인한 속도 저하가 적어지기 때문이다.

### 4.3 조건 별 타 토크 시계열 검토

4.1, 4.2에서 선박의 조종운동 관점에서 좌, 우현 타각 동기화된 상태에서 선회 운동의 경향성을 확인한 바 있다. 검증된 수학모형을

Table 6 Converged speed at tactical diameter

|            | 35°        | 25°        | 15°         | 5°          |
|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 21.0 knots | 6.91 knots | 8.40 knots | 10.52 knots | 14.15 knots |
| 18.5 knots | 6.09 knots | 7.40 knots | 9.26 knots  | 12.47 knots |
| 13.0 knots | 4.28 knots | 5.20 knots | 6.51 knots  | 8.76 knots  |
| 5.0 knots  | 1.64 knots | 2.00 knots | 2.50 knots  | 3.37 knots  |

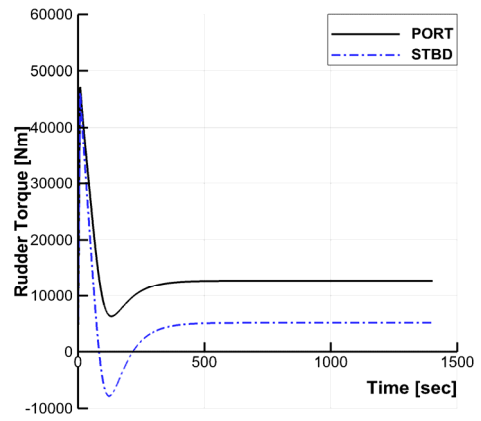


Fig. 7 Time series of rudder torque acting on rudders with 20° (PORT) and 20° (STBD) at 21.0 knots

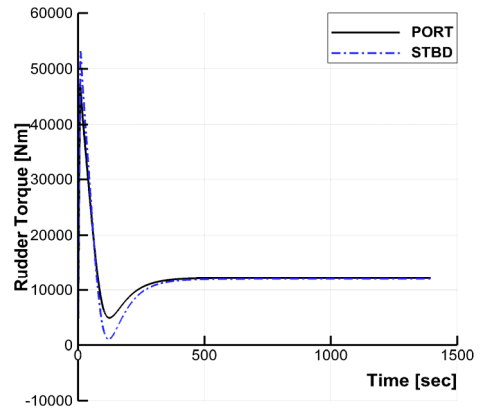


Fig. 8 Time series of rudder torque acting on rudders with 20° (PORT) and 24° (STBD) at 21.0 knots

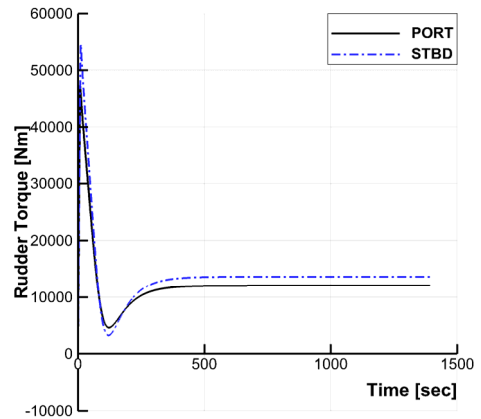


Fig. 9 Time series of rudder torque acting on rudders with 20° (PORT) and 25° (STBD) at 21.0 knots

토대로, 최대 허용 보상각을 추정하기 위하여 Table 3에 명시된 고정 타각, 보상 타각에 대한 반복 계산을 수행하였다. Fig. 7, 8, 9에서는 21.0 knots에서 수행된 결과를 발췌하였다. 먼저, 타 토크의 시계열은 Fig. 6에서 검토했던 것과 유사한 경향성을 보인다. 다만, Fig. 7의 우현 타 토크가 (-)부호를 갖는 구간이 있는데, 선체,

추진기, 타에서 작용하는 선회 모멘트의 합이 (+)인 조건에서 좌현 선회를 하기 때문에, 일부 구간에서 타 토오크가 (-)부호를 갖더라도 좌현 선회가 가능하다. 또한, 20° 선회 중 좌현의 타 토오크가 우현의 타 토오크에 비해 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 우현 타에 보상값을 더해줌으로써, 선회력 향상을 도모할 수 있다. Fig. 8에서는 4°의 보상 타각을, Fig. 9에서는 5°의 보상 타각을 고려하였다. 4°에서는 우현 타 토오크가 좌현 타 토오크보다 작기 때문에 보상 제한값을 초과하지 않았으나, 5°에서는 보상 제한값을 초과한 것으로 간주할 수 있다.

#### 4.4 최대 허용 보상각 도출 및 효과

Table 3에 기재된 조건에 따라, 최대 허용 보상각 추정 계산을 선박의 속도, 타각에 따라 반복 계산했다. 계산 결과 선박의 초기 속도가 최대 허용 보상각에 미치는 영향은 미미하였기에, 초기 속도 18.5 knots에서만 최대 허용 보상각을 추정, 분석하였다.

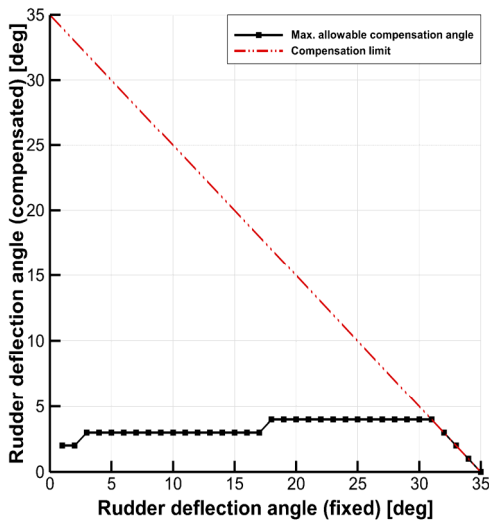


Fig. 10 Maximum allowable compensation angle

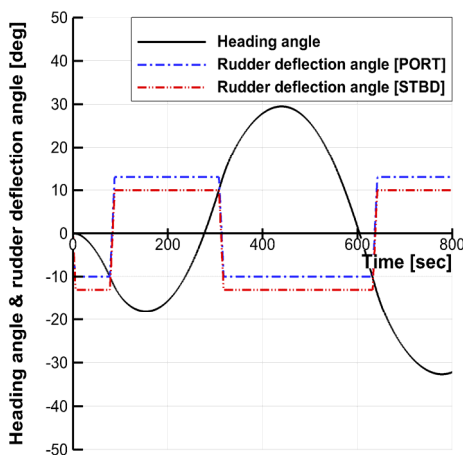


Fig. 11 Time series of heading angle for 10°/10° zigzag test and 10°/compensated angle zigzag test of 174K LNGC

Fig. 10은 좌현 선회 시 고정된 좌현 타각에 따라 우현 타의 최대 허용 보상각을 도출한 것이다. 붉은색 2점 쇄선은 보상각의 제한값이나 타낸 것으로, 35° 선회에서는 최대 타각에 도달하여 우현의 타를 추가로 제어할 수 없기 때문에 0°로 표시된 것이다. 도출된 보상각을 보면, 좌현 타각이 커짐에 따라 미미한 증가를 보이는 것으로 판단되나, 그 크기가 작아 2°와 3° 사이, 17°와 18° 사이에서 증가하는 것처럼 표시된 것이다. 따라서, 지능형 항해 시스템 고도화 관점에서 조종운동의 방향에 따라 타 토오크가 적게 걸리는 방향의 타의 추가 제어에 필요한 최대 허용 보상각을 입력으로 제공하는 것이 가능하다.

Fig. 11에서는 최대 허용 보상각을 고려한 지그재그 시험 시 선수각 시계열을 보여주고 있다. Fig. 10에서 언급된 것처럼, 10°타각에서 최대 허용보상각은 3°이다. Fig. 11에서 좌, 우현 타각 시계열을 살펴보면, 좌현 방향의 조종운동 시 우현 타에 3° 보상각이 고려되었음을 알 수 있고, 우현 방향의 조종운동 시 좌현 타에 3° 보상각이 고려되었음을 알 수 있다. Fig. 4에서 10°/10° 지그재그 시험의 시계열과 비교할 때, 1차 오버슈트 각 도달 시각은 -8.48 %, 2차 오버슈트 각 도달 시각은 -8.58 % 감소했음을 알 수 있다. 따라서, 침로 변경 시 선회력 향상을 통해, 빠른 침로 변경을 기대할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 비대칭 타 토오크를 고려한 쌍축 선박의 조종운동에 관한 수학적모형을 적용, 검증한 후, 비대칭 타 토오크를 고려한 최대 허용 보상각 추정에 관한 타당성 검토 연구를 수행했다. 다음의 세 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 검증된 조종운동방정식을 기준으로 국제선급협회 타 토오크 경험식을 수정, 타력 추정값을 수식에 적용하였다. 이를 통해, 좌, 우현 타 토오크의 비대칭성을 관찰할 수 없는 국제선급협회 경험식의 한계를 벗어나, 해외 선주로부터 제기된 지능형 항해 시스템 고도화에 관한 타당성 검토가 가능했다.

둘째, 조종운동의 방향에 따라 고정된 타각 대비 최대 허용 보상각의 크기를 추정하였다. 고정된 타각이 커짐에 따라 2°에서 4°까지 증가하는 경향성을 보였다. 다만, 초기 선속이 최대 허용 보상각에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 평가되었다. 최대 허용 보상각을 지능형 항해 시스템의 입력값으로 추가하는 것이 가능함을 확인했다.

셋째, 좌, 우현 타에 대한 최대 허용 보상각을 고려했을 때, 지그재그 운동을 모사함으로써 반응 시간의 차이를 확인할 수 있었다. 물론, 고정된 타각을 제외하고, 다른 타의 제어각을 증가시켰기 때문에 선회력이 증가했고, 그로 인해 지그재그 거동이 빨라진 것이다. 그러나, 타 토오크 관점에서 기존의 설계 범위 내에서 침로 변경 시 신속성을 높임으로써 지능형 항해 시스템의 기능을 다변화할 수 있다고 판단하였다.

본 연구에서 174K 천연가스운반선 좌, 우현 타에 작용하는 비대칭 타 토오크를 추정, 최대 허용 보상각 개념을 제안하였으나, 선체, 추진기, 타 유동 특성을 조종운동방정식을 이용한 수학적모형으로 단순화한 측면이 있어, 전산유체역학, 모형시험, 또는 시운전을 통한 심화 연구와 검증, 항해-통신 장비와의 연계 등 후속 연구개발이 진행될 예정이다.

## 후 기

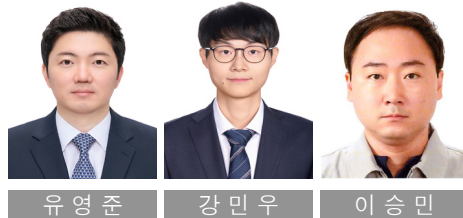
이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00395678). 또한, 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017006, 2025년 산업혁신인재성장지원사업).

### Nomenclature

| Abbreviation | Full meaning  |
|--------------|---|
| CFD          | Computational Fluid Dynamics                          |
| DOF          | Degree of freedom                                     |
| IACS         | International Association of Classification Societies |
| LNGC         | Liquefied natural gas carrier                         |
| NED          | North-East-Down                                       |
| RPM          | Revolution per minute                                 |

### References

- Chang, X. and Kong, B., 2019. Synchro-control of twin-rudder for ships, *4th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering*, Oct. 24–Oct. 26, Hohhot, China.
- Kim, Y., Kim, S., Kim, H., Lee, S., and Yu, B., 2007. Prediction of the maneuverability of a large container ship with twin propellers and twin rudders, *Journal of Marine Science and Technology*, 12, pp.130–138.
- Kim, K., Tilling F., Bathfield, N., and Liljenberg, H., 2014. Hydrodynamic optimization of twin-skeg LNG ships by CFD and model testing, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2), pp.392–405.
- Korean Register (KR), 2019. Rules for the classification of steel ships – Part 4 hull equipment, KR, Busan, Korea.
- Liu, S. and Chang, X., 2012. Synchro-control of twin-rudder with cloud model, *International Journal of Automation and Computing*, 9(1), pp.98–104.
- Li, P., Zou, Y., Cai, Z., Wang, X., and Feng, D., 2024. Analysis of rudder rorce characteristics under different drift angles and propeller faults, *The 34<sup>th</sup> international Ocean and Polar Engineering Conference*, June 2024, Rhodes, Greece.
- Lee, C., and Kim, J., 2023. Trajectory optimization for autonomous berthing of a twin-propeller twin-rudder ship, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 37(3), pp.122–128.
- Muscari, R., Dubbioso, G., Viviani, M., di Mascio, A., 2017. Analysis of the asymmetric behavior of propeller-rudder system of twin screw ships by CFD. *Ocean Engineering*, 143, pp.269–281.
- Sung, Y. and Park, S., 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based on virtual captive model tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), pp.407–417.
- Sung, Y., Ahn, K, and Lee, T., 2009. Development of new empirical formulae for manoeuvring coefficients and application on rudder design. *Proceedings of 10th International Marine Design Conference*, Vol.1, Trondheim, Norway, 26–29 May 2009, pp.382–394.
- You, Y., 2018, A study on the maneuverability of a twin-screw LNGC under machinery failures, *Ocean Engineering*, 155, pp.324–350
- You, Y., Kim, J., Seo, M., 2017, A study on the prediction of sailing performance for a LNGC based on the AIS data, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(4), pp.275–285.
- You, Y., Kim, J., Seo, M., 2018, Prediction of an actual RPM and engine power of an LNGC based on full-scale measurement data, *Ocean Engineering*, 147, pp.496–516.
- Zhao, P., Liang, L., Zhang, S., Ji, M., and Yuan, J., 2019. Simulation analysis of rudder roll stabilization during ship turning motion, *Ocean Engineering*, 189, 106322.



유영준

강민우

이승민