

쌍축 추진 LNG선의 단독 추진기 고장 상태에서의 조종성능에 대한 수치적 연구

유영준[†] · 최진우
대우조선해양

A Numerical Study on the Maneuverability of a Twin-Screw LNG Carrier under Single Propeller Failure

Youngjun You[†] · Jinwoo Choi
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., LTD. (DSME)

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.

Recently, ship owners have been requiring the assessment of the maneuverability of a twin-screw ship under machinery failures. In this paper, we are only focused on the propulsion failure among propulsion failure, power supply failure, steering system failure etc. First of all, the mathematical model for the twin-screw 174K LNGC is verified by comparing the simulated results for 35° turning test, 10°/10° zigzag test and 20°/20° zigzag test under normal operating condition and those obtained from free running model tests. And, sea trial results of 216K LNGC under single propeller failure are compared with those of 174K LNGC under identical condition to verify the proposed method to predict maneuverability under single propeller failure. After the straight line maneuver is simulated under the single propeller failure, the speed and equilibrated heading and rudder deflection angles at steady state are predicted. After the IMO maneuvering tests are simulated under the single propeller failure, the results are reviewed to investigate the maneuvering characteristics due to the failure.

Keywords : Twin-screw(쌍축), Maneuverability(조종성능), Machinery failure(기계 고장), Single propeller failure(단독 추진기 고장)

1. 서론

쌍축(twin-screw) 추진 선박은 조종성능이 단축(single-screw) 추진 선박에 비해 우수하여, 운항 안전성 측면에서 보다 안전한 항해가 가능하다고 알려져 있다. 또한 Fuel Oil Consumption (FOC) 측면에서 경제적이기 때문에 건조 비용 보다는 운항 안전성과 Operating expenses(OPEX) 절감을 중요시하는 선주들이 선호하고 있다. 따라서 대형 컨테이너선(container ship)과 LNGC (Liquefied Natural Gas Carrier)를 중심으로 쌍축 추진 선박이 건조되고 있다. 쌍축 추진 선박의 선체, 추진기, 타 설계는 단축 추진 선박의 설계와 유사한 단계를 거쳐 수행된다. 특히 조종성능 관점에서는 거의 동일한 평가 절차를 거쳐 설계되고 있다.

일반적으로 선박의 조종성능 평가는 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO) MSC.137(76)에서 제시하고 있는 규정을 따라 수행되는데, 설계속도에서의 초기선 회시험(initial turning test), 35° 선회시험(turning test), 10°/10°

지그재그시험(zigzag test), 20°/20° 지그재그시험을 수행하여 평가된 시험 값과 IMO 규정을 비교함으로써 설계된 선박의 조종성능을 평가한다. 단축과 쌍축 추진기를 갖는 컨테이너선의 조종성능을 모형시험을 통해 평가하고, 그 특징을 밝히는 연구가 수행된 바 있다 (IMO, 2002; Kim, et al., 2006; 2009).

쌍축 추진 선박의 조종성능을 단축 추진 선박의 조종성능과 동일한 절차를 거쳐 평가해 왔기 때문에, 쌍축 추진 선박만이 갖는 고유한 조종운동의 특성을 설계에 반영할 수 없었다. 최근 기존의 평가 항목뿐 아니라 쌍축 추진 선박의 조종성능을 장비의 고장 관점에서 평가해 달라는 요구가 선주부터 제기되고 있다. 이러한 요구는 해양구조물에서 운용하고 있는 자동위치유지장치(dynamic positioning)의 성능 해석 시 고장 모드(failure mode)를 고려하는 것과 유사하다고 볼 수 있다. 자동위치유지 기능을 갖는 선박의 성능을 극좌표계로 정리한 그림을 통해 수치적으로 표현하고, 요구기준과 비교하는 연구가 수행되기도 하였다 (Hendzik, 2013). 고장 모드까지 고려하여 작성된 자동위치유지 성능차트는 자동위치유지 기능을 갖는 선박의 스트레스 용량산

정이나 운용 기준 설정에 활용되고 있다. 하지만 조종성능 평가 시 어떤 고장모드를 어떻게 고려할 수 있는지에 대한 명확한 절차와 기준이 마련되어 있지 않은 상태이다. 따라서 어떤 고장모드를 어떻게 수치적으로 계산할 수 있는지에 대한 연구가 필요하였다. 대부분의 좌초 사고가 기계적인 고장이 발생한 이후에 바람, 파도, 조류의 영향을 받아 발생한다고 주장하는 연구가 수행된 바 있으며 (Fowler & Sogard, 2000), 선박의 운항 과정에서 조타장치 고장(steering system failure)을 고려하여 가장 위험한 고장 시나리오를 찾는 연구가 수행되기도 하였다 (Mohovic, et al., 2013). 물론 이러한 연구는 쌍축 추진 선박의 조종특성 관점에서 고장모드를 분석한 것은 아니었지만, 어떤 고장모드에 대한 검토가 필요할지 연구의 단초를 제공하고 있다. 최근 쌍축 추진 컨테이너선의 단독 타 고장상태(single rudder failure)가 조종성능에 미치는 영향을 수치적으로 추정하는 방법이 제안되기도 하였다 (You & Kim, 2017). 또한 쌍축 추진 216K LNGC에서 정상 운항상태 및 단독 추진기 고장상태(single propeller failure)에서 시운전을 수행하고, 그 결과를 비교하기도 하였다 (Kim, 2008).

본 연구는 쌍축 추진 선박의 고장모드 중에 단독 추진기 고장이 조종운동에 미치는 영향을 분석하는 연구로써, 검증된 수학적 모델을 기반으로 단독 추진기 고장 상태에서 정상상태에 도달한 선박의 속도, 선수각, 타각을 초기 조건으로 가정하여 표준 조종시험을 수행한 후 대상 선박의 조종운동의 특징을 밝히고자 하였다. 먼저, 선주들이 쌍축 추진 선박으로 선호하는 174K LNGC를 대상으로 연구를 수행하였다. 대상 선박의 조종운동을 시뮬레이션 하는데 필요한 유체력미계수와 타 관련 계수는 경험식을 이용하여 추정하였다 (Kijima, et al., 1990; Fujii & Tsuda, 1961; 1962). 선체 저항 및 추진 관련 계수는 대우조선해양에서 표준선 개발을 위하여 수행했던 LNGC의 모형시험 결과를 이용하였다. 경험식과 모형시험 결과를 기반으로 수행된 정상운항상태 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여, 시뮬레이션 결과와 174K LNGC 자유항주시험을 통해 획득한 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험 결과를 비교하였다. 정상운항상태에서 검증된 수학적모형에서 단독 추진기 고장상태를 고려하기 위하여, 추진기가 회전하지 않고 정지된 상태를 가정하였다. 이에 따라 조종운동방정식을 풀이함에 있어 고장 난 추진기의 분당 회전수(Revolution per minute, RPM)를 0으로 고정하고, 고장 난 추진기 뒤에 위치하는 타에 들어오는 유속은 추진기에 의해 가속되지 않는다고 가정하였다. 이와 같은 가정을 이용한 계산의 타당성을 동종사에서 수행된 216K LNGC의 단독 추진기 고장상태에서의 시운전 결과와 정성적으로 비교하였다 (Kim, 2008). 정상운항상태 및 단독 추진기 고장상태에 대해서 검증된 수학적모형을 이용하여 단독 추진기 고장상태에서 조종성능을 평가하기 위한 계산 절차를 제안하였다. 가장 먼저, 단독 추진기 고장상태에서 선박의 직진운항을 시뮬레이션 하였다. 이 때, 추력불균형으로 인한 선회를 방지하도록 타를 제어하면서 직진 운항에 필요한 선박의 속도, 선수각, 타각을 추정하였다 (Hasegawa & Kouzuki, 1987). 추정된 단독 추진기 고장 상태에서 직진 가능한 속도, 선수각, 타각을 기준으로 초기선회시험, 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험을 시뮬레이션 하고 그

결과를 분석함으로써, 단독 추진기 고장상태가 174K LNGC의 조종성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 대상 선박 및 조종 운동 방정식

본 연구에서는 쌍축 추진기를 갖는 174K LNGC를 대상으로 연구를 수행하였다. Table 1에서는 대상 선박의 선체, 추진기, 타의 주요 제원을 보여주고 있다. LCG는 선체중량부에서부터 무게중심까지 떨어진 거리를 가리킨다.

Table 1 Principal particular of the hull, propeller and rudder of the LNGC

Item	LNGC
Type [-]	174K CLASS
Length between perpendiculars (L_{pp}) [m]	283.50
Breadth (B) [m]	46.4
Draft (T) [m]	11.7
Block coefficients (C_B) [-]	0.77
LCG from midship [m]	2.75
Design speed [knots]	18.2
Area of each rudder (A_R) [m ²]	40.00
Aspect ratio [-]	about 1.52
Diameter of each propeller [m]	8.3
Pitch at 0.7R [m]	8.7
Trim [-]	Even keel

174K LNGC의 조종운동을 모사하기 위하여, 본 연구에서는 식 (1)과 같은 조종운동방정식을 이용하였다. 여기서 m 은 질량, I_{ZZ} 는 질량관성모멘트를 의미한다. u, v 는 각각 종 방향과 횡 방향 속도를 가리키며, \dot{u}, \dot{v} 은 속도의 시간변화율을 의미한다. r 은 선체고정좌표계의 중심을 기준으로 회전하는 각속도를, \dot{r} 은 각속도의 시간변화율을 가리킨다. 선체고정좌표계의 원점은 $L_{pp}/2, B/2$ 에 위치한다. X, Y, N 은 각각 선체에 작용하는 x 방향, y 방향 힘과 모멘트를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X \\
 m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\
 I_{ZZ} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ru) &= N
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 좌표계를 보여주고 있다. o, x_g, y_g 는 지구고정좌표계 원점 및 종방향, 횡방향 좌표축을 의미한다. $\delta_{PORT}, \delta_{STBD}$ 는 좌현(PORT)과 우현(STBD)에 설치

된 타의 타각을 의미한다. U 는 선박의 속도를 의미한다. ψ 는 선박의 지구고정좌표계에서의 선수각을 의미하며, β 는 편류각을 의미한다. 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 식 (2)와 같이 정리할 수 있다. 하첨자 H는 선체를 의미하며, P는 추진기, R은 타를 가리킨다.

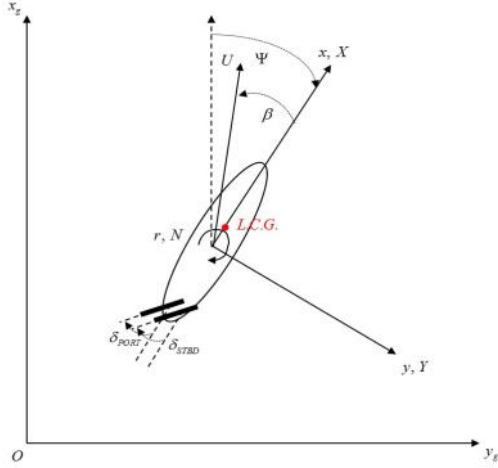


Fig.1 Coordinate system

$$\begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R \\ Y &= Y_H + Y_R \\ N &= N_H + N_P + N_R \end{aligned} \quad (2)$$

식 (3)은 선체에 작용하는 동유체력을 정리한 것이다. 각 유체력미계수는 경험식을 이용하여 추정하였다 (Kijima, et al., 1990). 식 (4)는 추진기가 발생시키는 추력을, 식 (5)는 타가 발생시키는 타력을 추정하는 식을 보여주고 있다. 타 직압력을 구하기 위한 경험식은 전가동타(full spade rudder)에 대해서 제안된 것이며, 전가동타가 설치된 대상선박에 대해서 연구가 수행되었다 (Fujii, et al., 1961; 1962). m_x, m_y 는 종방향, 횡방향의 부가질량을 의미한다. J_{ZZ} 는 부가질량관성모멘트를 가리킨다. x_G 는 Table 1에서 정의한 LCG를 가리킨다. ρ 는 해수의 밀도를 가리키며, '은 무차원화된 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} X_H &= -m_x \dot{u} + (m_y + X_{vr})vr \\ &\quad + \frac{1}{2}(\rho L_{PP} T U^2) X_{uu} \cos^2 \beta \\ Y_H &= -m_y \dot{v} + m_x ur + Y_H(v', r') \\ N_H &= -J_{ZZ} \dot{r} + N_H(v', r') + x_G Y_H(v', r') \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Y_H(v', r') &= \frac{1}{2}(\rho L_{PP} T U^2) (Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{vv}' v'|v'| \\ &\quad + Y_{rr}' r'|r'| + Y_{vr}' v'v'r' + Y_{vr}' v'r'r') \\ N_H(v', r') &= \frac{1}{2}(\rho L_{PP}^2 T U^2) (N_v' v' + N_r' r' + N_{vv}' v'|v'| \\ &\quad + N_{rr}' r'|r'| + N_{vr}' v'v'r' + N_{vr}' v'r'r') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_P &= (1-t)\rho n_{PORT}^2 D_P^4 K_T(J_{P, PORT}) \\ &\quad + (1-t)\rho n_{STBD}^2 D_P^4 K_T(J_{P, STBD}) \\ N_P &= y_P(1-t)\rho n_{PORT}^2 D_P^4 K_T(J_{P, PORT}) \\ &\quad - y_P(1-t)\rho n_{STBD}^2 D_P^4 K_T(J_{P, STBD}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} J_{P, PORT} &= u(1-w_P)/n_{PORT} D_P \\ J_{P, STBD} &= u(1-w_P)/n_{STBD} D_P \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)F_{N, PORT} \sin \delta_{PORT} \\ &\quad - (1-t_R)F_{N, STBD} \sin \delta_{STBD} \\ Y_R &= -(1+a_H)F_{N, PORT} \cos \delta_{PORT} \\ &\quad - (1+a_H)F_{N, STBD} \cos \delta_{STBD} \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_{N, PORT} \cos \delta_{PORT} \\ &\quad - (x_R + a_H x_H)F_{N, STBD} \cos \delta_{STBD} \\ &\quad - y_R(1-t_R)F_{N, PORT} \sin \delta_{PORT} \\ &\quad + y_R(1-t_R)F_{N, STBD} \sin \delta_{STBD} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_{N, PORT} &= 0.5 * \rho A_R^2 U_{R, PORT}^2 C_{L, \alpha} \sin \alpha_{R, PORT} \\ F_{N, STBD} &= 0.5 * \rho A_R^2 U_{R, STBD}^2 C_{L, \alpha} \sin \alpha_{R, STBD} \\ C_{L, \alpha} &= \frac{6.13A}{A + 2.25} \\ \alpha_{R, PORT} &= \delta_{PORT} - \gamma(\beta - l_R' r') \\ \alpha_{R, STBD} &= \delta_{STBD} - \gamma(\beta - l_R' r') \end{aligned}$$

식 (3), (4), (5)는 기존 단축 추진 선박의 조종성능을 추정하기 위하여 사용하던 경험식을 그대로 사용하되, 추진기, 타의 경우 좌현과 우현에 설치된 것을 나누어 표현한 것이다. 단, 단축선 기준으로 추정된 유체력미계수를 쌍축선에 적용할 때 계산 결과의 차이를 보정하기 위하여, 자유항주모형시험 결과에 맞추어 일부 계수를 수정하였다. 여기서는 대상선박의 선회계적 및 지그재그 시계열을 기준으로 $Y_{vrr}', N_{vrr}', N_{vrr}'$ 을 수정하였다. 추진기의 경우 추진기 회전 방향을 고려하여 타에 입사하는 유속을 좌현 선회와 우현선회 시 다르게 고려하기도 하지만, 본 연구에서는 이와 같은 효과는 고려하지 않았다. 식 (4)에서, t 은 추력감소계수(thrust reduction coefficient), n_{PORT}, n_{STBD} 는 각각의 Revolution Per Second(RPS), K_T 는 추력계수(thrust coefficient)를 의미한다. 여기서 K_T 는 $J_{P, PORT}, J_{P, STBD}$ 로 표기된 전진미만의 함수로 가정하였다. y_P, y_R 는 추진기와 타가 선박의 중심축으로부터 횡 방향으로 떨어진 거리를 각각 가리킨다. 또한, w_P 는 선박의 수평동요와 선수 동요가 있는 경우에 대한 유효반류계수를 의미한다. 식 (5)에서 $F_{N, PORT}, F_{N, STBD}$ 는 각각의 타에서 발생하는 직압력을 가리킨다. t_R 과 a_H 는 간섭계수를 의미한다. 또한 x_R 는 선체중양부에서부터 타가 떨어진 종 방향 거리를, x_H 는 수평동요에 따른 힘이 작용하는 위치를 의미한다. A_R 는 타의 면적, $U_{R, PORT}, U_{R, STBD}$ 는 타에 입사하는 유체의 속도를 가리킨다. $C_{L, \alpha}$ 는 양력계수의

기울기를 의미하며, 종횡비(aspect ratio)인 Δ 를 이용하여 추정하는 경험식을 이용하여 획득하였다 (Fujii, et al., 1961; 1962). α_{PORT} , α_{STBD} 는 좌현/우현에 설치된 타에 유체가 입사하는 받음각(angle of attack)을 가리킨다. γ 는 정류계수를, l_R 는 Lever의 길이를 의미하는데, 통상 $2x_R$ 이라고 가정한다. 지금까지 설명한 수학적모형을 이용하여 쌍축 추진 174K LNGC의 조종운동을 시뮬레이션 하고자 하였다.

3. 정상상태 및 단독 추진기 고장상태의 수학적모형 검증

본 연구에서 단독 추진기 고장 상태가 174K LNGC의 조종성능에 미치는 영향을 확인하기 전에, 사용된 수학적모형을 통한 정상운항상태 및 단독 추진기 고장상태에서 조종운동 시뮬레이션의 타당성을 검증할 필요가 있었다. 이를 위해 정상운항상태에서 대상 선박의 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션 하였고, 계산된 결과와 자유항주 모형시험 결과를 비교하였다. 모두 세 가지 시험을 모사하였으며, 각각 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험이며, Fig. 2, 3, 4에서 계산한 결과와 자유항주 모형시험 결과를 각각 도시하고 있다. Fig. 2는 35° 선회시험에서 선박 궤적을 보여주고 있다. 사각형은 자유항주 모형시험 시 계획된 선박 궤적을, 실선은 계산된 선박 궤적을 가리킨다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 10°/10° 지그재그시험과 20°/20° 지그재그시험을 수행하는 동안 선수각과 선회각속도의 시계열을 보여주고 있다. 사각형과 원은 자유항주 모형시험 시 계획된 선수각과 선회각속도를 가리킨다. 실선과 파선은 계산된 선수각과 선회각속도를 각각 가리킨다. Fig. 2, 3, 4를 살펴보면 사용된 수학적모형이 자유항주 모형시험 결과와 잘 일치하도록 구성된 것을 확인할 수 있다. 35° 선회궤적, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험 시 첫 번째, 두 번째 과도작동각(overshoot angle)의 크기와 시계열의 변화 양상이 거의 유사하게 나타났다. 단, 20°/20° 지그재그시험의 경우 선수각 시계열의 두 번째 정점에서 계산결과와 자유항주 모형시험 결과에 차이가 보이지만, 선회 각속도 정점부분에서 발생한 차이가 누적되어 두 번째 과도작동각의 크기 및 시계열에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용된 수학적모형과 계수들을 이용하여 정상운항상태에서 대상 선박의 조종운동을 모사하는 데 문제가 없다고 판단하였고, 본 수학적모형을 기준으로 단독 추진기 고장상태에서 대상 선박의 조종운동을 시뮬레이션 하였다.

정상운항상태에서 운항하는 174K LNGC 조종운동에 대해서 검증된 조종운동방정식을 이용하여 단독 추진기 고장상태를 모사하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 추진기가 회전하지 않고 정지된 상태를 가정했기 때문에, 고장 난 추진기의 분당회전수는 0으로 고정되며, 고장 난 추진기 뒤에 위치하는 유동은 가속되지 않는다고 가정하였다. 예를 들어, 좌현방향에 설치된 추진기가 고장 났을 경우 식 (4)에서 n_{PORT} 이 0이며, 식 (5)

에서 $U_{R, PORT}$ 는 추진기 고장으로 인해 후류가 가속되지 않는다. 동종사에서 쌍축 추진 216K LNGC의 시운전을 통해 단독 추진기 고장상태가 조종성능에 미치는 영향을 비교한 바 있었다 (Kim, 2008). 216K LNGC는 L_{pp} 가 303.0 m, B 는 50.0 m, T 는 12.0 m로 본 연구의 대상선박인 174K LNGC 보다 큰 선박이고, 216K LNGC에 대한 검증된 수학적모형 및 상세정보가 없어, 조종성능 관점에서 엄밀한 계산과 검증은 불가능하다. 다만, 단독 추진기 고장상태에서 174K LNGC에 대해서 수행된 계산결과와 216K LNGC 시운전 결과의 경향성 비교를 통해, 단독 추진기 고장상태를 고려한 쌍축 추진 LNGC 조종운동의 시뮬레이션 방법의 타당성을 검증하고자 했다.

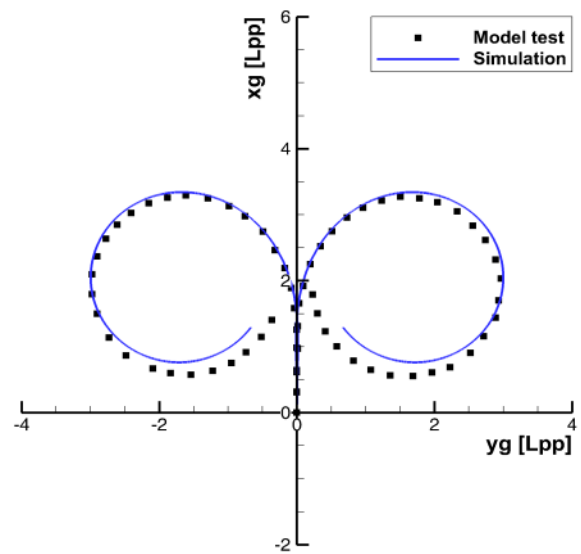


Fig. 2 Trajectories for 35° turning tests of the 174K LNGC obtained from simulation and free running model test

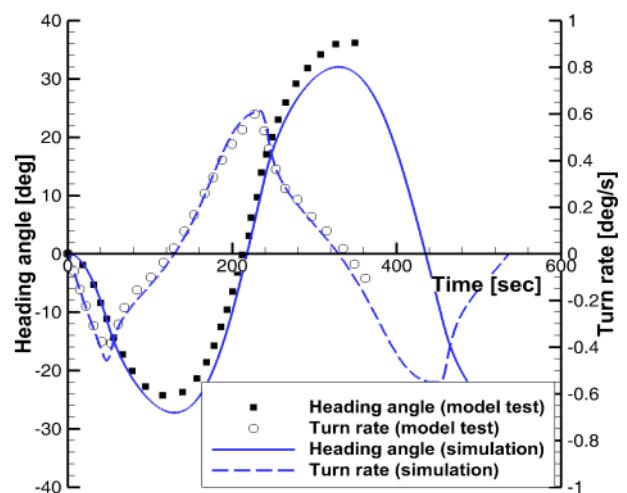


Fig. 3 Time histories of heading angle and turn rate for 10°/10° zigzag tests to port side of the 174K LNGC obtained from simulation and free running model test

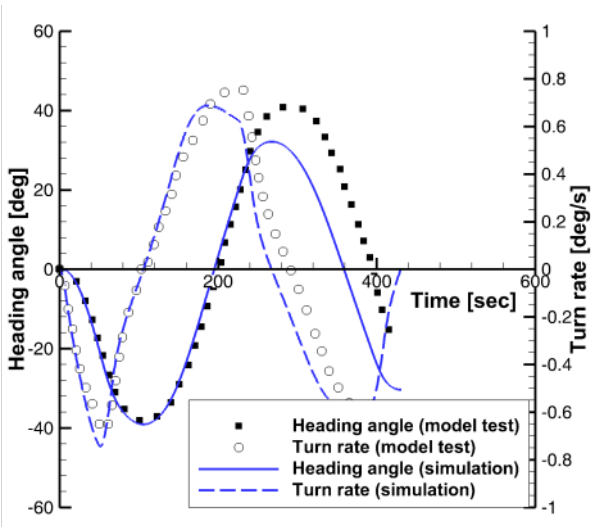


Fig. 4 Time histories of heading angle and turn rate for 20°/20° zigzag tests to port side of the 174K LNGC obtained from simulation and free running model test

216K LNGC에 대해서 동일 설계가 적용된 두 척의 시리즈 호선에 대해서 2차례의 시운전을 수행하고, 그 결과를 비교하였다 (Kim, 2008). 1차 시운전에서는 고장 난 추진기가 윈드밀 상태였고, 2차 시운전에서는 고장 난 추진기가 회전하지 않고 정지된 상태였다. 본 연구에서는 추진기가 완전히 고정되어 회전하지 않는 상태를 가정하였기 때문에, 2차 시험결과를 기준으로 계산 결과의 타당성을 검토하고자 했다. 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험에 각각 계산결과와 시운전 결과를 비교하였다. 216K LNGC의 경우 정상운항상태의 설계속도는 19.6 knots 이었지만, 시운전 시 초기 속도에서 0.5 knots 내외의 오차가 있었다. 단독 추진기 고장상태에서는 설계속도보다 낮은 대략 12.0 knots ~ 12.6 knots 정도의 초기 속도에서 시운전이 수행되었다. 216K LNGC 시운전 조건에 맞추어 174K LNGC의 단독 추진기 고장상태 조종시험을 모사하기 위하여, 초기 속도가 같도록 분당회전수를 추정한 뒤 각각의 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 2에서는 216K LNGC에 대한 2차 시운전 조건에서 단독 추진기 고장상태에서 얻어진 선회전진거리(advance), 선회가로 이동거리(transfer), 선회지름(tactical diameter)과 정상운항상태에서 설계속도 기준으로 얻어진 각 시험 값의 상대비율을 보여주고 있다. 또한 Table 3에서는 동일한 조건에서 수행된 174K LNGC 시뮬레이션 결과의 상대비율을 보여주고 있다. 216K LNGC 시운전 결과에서 좌현 방향 추진기 고장상태에서는 우현 방향의 궤적이, 우현 방향 추진기 고장상태에서는 좌현방향 궤적이 더 크게 도시되었다. 이것은 좌현방향 추진기가 고장 났을 경우, 추력불균형으로 인해 우현방향의 추진기가 선체를 좌현방향으로 회전시키려는 모멘트가 발생하기 때문이다. 따라서 좌현방향 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름이 우현방향 값들에 비해 상대적으로 작아진다. 174K LNGC에 대한 시뮬레이션

결과에서도 각 시험 값의 상대비율의 차이는 작지만, 동일한 경향성을 보이고 있었다.

Fig. 5는 216K LNGC의 시운전 초기 속도에 맞추어 174K LNGC의 분당회전수를 조절한 뒤, 35° 선회시험을 수행했을 때 174K LNGC의 이동 궤적을 도시한 것이다. 실선은 두 개의 추진기가 모두 작동하는 정상운항상태, 1점 쇄선은 우현 측 추진기가 고장 난 상태, 파선은 좌현 측 추진기가 고장 난 상태의 결과를 각각 가리킨다. 정상운항상태 결과에 비해 단독 추진기 고장 상태의 선회 궤적이 초기 출발위치보다 선미방향으로 치우치는 특징이 관찰되었는데, 216K LNGC의 시운전 궤적의 경향성과 동일하다 (Kim, 2008). Table 2, 3에서 정리된 고장 난 추진기의 방향과 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름 크기의 연관성을 확인할 수 있었다. 다만, 각 시험 값의 상대비율의 크기가 174K LNGC에서는 216K LNGC 시운전보다 작다. 동일 조선소에서 건조된 동일 선박에 대한 비교 검토가 아니기 때문에, 정량적인 비교 검증은 불가능하다. 대신 제안된 가정과 시뮬레이션 방법이 단독 추진기 고장상태의 경향성을 구현할 수 있다고 생각된다.

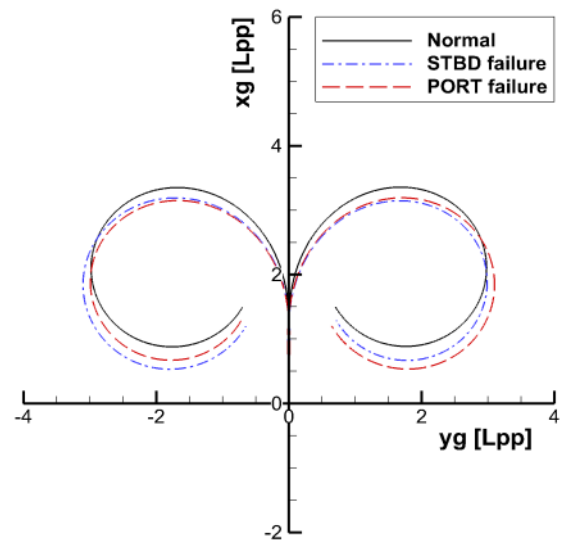


Fig. 5 Trajectories for 35° turning tests of the 174K LNGC under normal operating condition and single propeller failure from initial conditions of 216K LNGC sea trials

Table 2 Comparison between relative ratios of advance, transfer, and tactical diameter of 216K LNGC obtained from sea trials

	216K LNGC sea trials			
	STBD failure		PORT failure	
	PORT	STBD	PORT	STBD
Advance [%]	110.23	94.62	96.59	107.53
Transfer[%]	120.69	117.24	108.62	134.48
Tactical diameter[%]	96.46	110.62	98.23	112.39

Table 3 Comparison between relative ratios of advance, transfer, and tactical diameter of 174K LNGC obtained from simulations

	174K LNGC Simulations			
	STBD failure		PORT failure	
	PORT	STBD	PORT	STBD
Advance [%]	94.75	93.27	93.56	94.61
Transfer[%]	100.17	98.35	98.49	100.08
Tactical diameter[%]	104.10	100.47	100.54	104.06

Table 4는 216K LNGC에 대한 2차 시운전 조건에서 단독 추진기 고장상태에서 얻어진 10°/10° 지그재그 시험의 첫 번째, 두 번째 과도작동각과 정상운항상태에서 설계속도 기준으로 얻어진 시험 값의 상대비율을 보여주고 있다. 또한 174K LNGC에 대해서도 동일한 조건에서 시뮬레이션을 통해 추정된 과도작동각의 상대비율을 보여주고 있다. 216K LNGC 시운전에서는 첫 번째 과도작동각은 정상운항상태보다 크게, 두 번째 과도작동각의 크기는 고장 난 추진기의 방향에 따라 다른 경향성을 보이게 얻어졌다. 시운전 시 획득된 과도작동각의 값이 4.1°~9.5° 정도로 작은 값이기 때문에, 약간의 차이에서도 상대비율의 크기가 매우 큰 것으로 보인다. 다만, 단독 추진기 고장상태에서 선수각의 시계열의 첫 번째, 두 번째 정점에 도달하는 시간이 길어지는 공통적인 특징을 보였다. 단독 추진기 고장상태에서 174K LNGC의 10°/10° 지그재그 시험을 계산했을 때, 고장 난 추진기의 방향에 관계없이 첫 번째, 두 번째 과도작동각의 크기가 모두 작아지는 경향을 보였다.

Fig. 6은 216K LNGC의 시운전 조건에 맞추어 174K LNGC의 분당회전수를 조절한 뒤, 10°/10° 지그재그 시험을 수행했을 때 선수각의 시계열을 도시한 것이다. 실선은 정상운항상태, 1점 쇄선은 우현 측 추진기가 고장 난 상태, 파선은 좌현 측 추진기가 고장 난 상태의 결과를 각각 가리킨다. Table 4에서 정리한 것처럼, 단독 추진기 고장상태에서 174K LNGC 선수각 시계열의 첫 번째, 두 번째 정점이 정상운항 상태의 결과에 비해 작아진 것을 확인할 수 있다. 216K LNGC 시운전 결과와 마찬가지로 선수각 시계열의 첫 번째, 두 번째 정점에 도달하는 시간이 길어지고 있음을 확인할 수 있다.

Table 4 Comparison between relative ratios of the 1st and 2nd overshoot angle of 216K LNGC obtained from sea trials and those of 174K LNGC obtained from simulations

	216K sea trials		174K simulations	
	STBD failure	PORT failure	STBD failure	PORT failure
1 st overshoot [%]	185.37	100.00	65.66	65.64
2 nd overshoot [%]	61.19	141.79	86.41	85.43

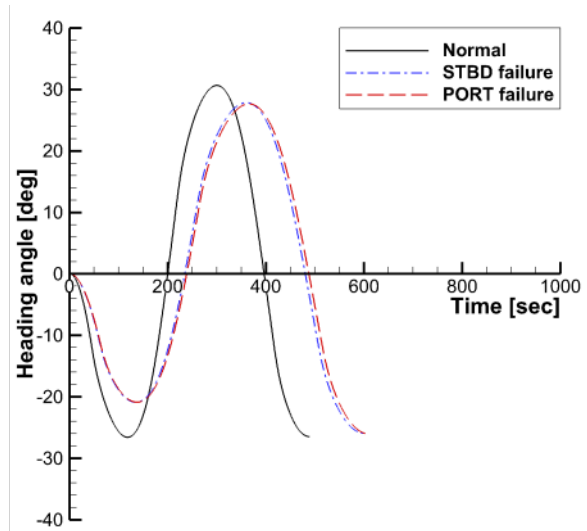


Fig. 6 Time histories of heading angle and turn rate for 10°/10° zigzag tests to port side of the 174K LNGC under normal operating condition and single propeller failure from initial conditions of 216K LNGC sea trials

Table 5는 216K LNGC에 대한 2차 시운전 조건에서 단독 추진기 고장상태에서 얻어진 20°/20° 지그재그 시험의 첫 번째 과도작동각과 정상운항상태에서 설계속도 기준으로 얻어진 시험 값의 상대비율을 보여주고 있다. 또한 174K LNGC에 대해서도 동일한 조건에서 시뮬레이션을 통해 추정된 과도작동각의 상대비율을 보여주고 있다. 216K 시운전에서 20°/20° 지그재그 시험의 첫 번째 과도작동각이 정상운항상태의 시험 값 보다 작게 얻어졌다. 이것은 10°/10° 지그재그 시험 시운전 결과와 정반대의 결과이다. 174K LNGC의 20°/20° 지그재그 시험 시뮬레이션에서는 10°/10° 지그재그 시험 시뮬레이션과 마찬가지로, 정상운항 상태의 첫 번째 과도작동각보다 단독 추진기 고장상태에서 첫 번째 과도작동각이 작아지는 것으로 추정되었다. 추가적으로 216K LNGC의 고장 난 추진기가 윈드밀 상태로 수행된 1차 시운전 시 10°/10° 지그재그, 20°/20° 지그재그에서 얻어진 과도작동각의 크기 역시 정상운항상태의 시험 값에 비해 대체적으로 작아지는 경향성을 보이고 있었다. 따라서 216K LNGC 2차 시운전의 20°/20° 지그재그 첫 번째 과도작동각이 단독 추진기 고장상태에서 정상운항상태보다 작게 얻어진 Table 5의 결과가 타당하며, 제안된 시뮬레이션 방법을 통해 추정된 결과와 일치하는 경향성을 보이고 있다고 생각된다.

Fig. 7은 216K LNGC의 시운전 초기 속도에 맞추어 174K LNGC의 분당회전수를 조절한 뒤, 20°/20° 지그재그 시험을 수행했을 때 선수각의 시계열을 도시한 것이다. 실선은 정상운항상태, 1점 쇄선은 우현 측 추진기가 고장 난 상태, 파선은 좌현 측 추진기가 고장 난 상태의 결과를 각각 가리킨다. Table 5에서 정리한 것처럼, 174K LNGC의 경우 단독 추진기 고장상태에서 선수각 시계열의 첫 번째 정점이 정상운항 상태의 결과에 비해 작아진 것을 확인할 수 있다. 또한, 216K LNGC 시운전 결과와 마

찬가지로 선수각 시계열의 첫 번째 정점에 도달하는 시간이 길어지고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제안된 가정과 시뮬레이션 방법을 이용하여 단독 추진기 고장상태에서 174K LNGC의 조종성능을 추정하는 것이 가능하다고 판단하였다.

Table 5 Comparison between relative ratio of 1st overshoot angle of 216K LNGC and those of 174K LNGC

	216K sea trials		174K simulations	
	STBD failure	PORT failure	STBD failure	PORT failure
1 st overshoot [%]	86.90	78.57	73.87	73.35

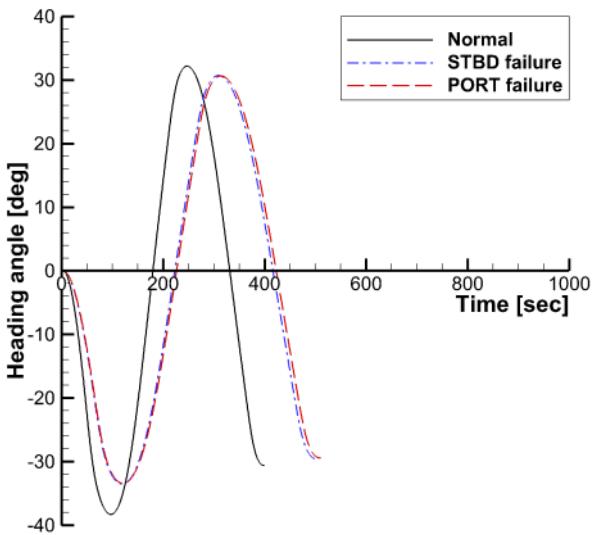


Fig. 7 Time histories of heading angle and turn rate for 20°/20° zigzag tests to port side of the 174K LNGC under normal operating condition and single propeller failure from initial conditions of 216K LNGC sea trials

4. 단독 추진기 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험 시뮬레이션

216K LNGC의 시운전에서는 단독 추진기 고장상태의 조종시험을 설계속도보다 낮은 속도에서 수행하였다. 추진 계통 장비 및 선박의 안전을 위하여 시험 속도를 낮춘 것으로 추정되는데, 최근 선급이 제정한 규정에서는 IMO 규정과 동일한 운항 조건에서 추진기 및 타 고장 시 조종성능을 검증해야 한다 (LR, 2016). 따라서 단독 추진기 고장상태에서도 고장 상태의 운항 특성을 고려하되, IMO 표준조종시험 절차에 맞추어 조종성능을 평가할 필요가 있다.

단독 추진기 고장상태에서 확인이 요구되는 운항 특성은 추진

력 감소로 인한 운항 속도의 감소이다. 추진기 고장으로 추력이 감소된 상태에서, 하나의 추진기로 직진운항 할 수 있는 속도, 선수각, 타각의 평형상태를 추정해야 한다. 단독 추진기 고장상태에서는 추력 불균형으로 인한 선회를 방지하기 위하여 타 제어가 필요하며, 이에 따라 선수각에 교란이 발생할 수 있다. 또한 타 제어 및 선수각 교란으로 인해 저항과 추력 관점에서 예상하는 속도보다 더 낮은 속도에서 운항하게 된다. 이와 같이 단독 추진기 고장상태에서 직진운항이 가능한 초기조건을 기준으로, 단독 추진기 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험 절차에 따라 각 시뮬레이션을 수행해야 한다.

먼저, 단독 추진기 고장 시 정상상태에 도달한 조건을 추정하기 위하여, 설계속도로 직진 운항하던 선박에서 좌현방향 추진기가 정지하는 상황을 가정하였다. 하나의 추진기가 추력을 생성하지 않았을 때, 추력불균형을 방지하기 위한 타 제어를 고려하여 직진 가능한 속도, 선수각, 타각을 추정하였다. Table 6은 174K LNGC의 정상운항상태에서 설계속도로 운항하는 조건과 비교하여, 단독 추진기 고장상태에서 수렴된 운항속도 및 타각을 비교하고 있다. Fig. 8은 계산된 선수각과 타각의 시계열을 보여주고 있다. 단, 추진기 정지로 인한 부가적인 저항요소나 동적 영향은 무시하였다. 실선과 파선은 각각 타각과 선수각을 가리킨다. 두 개의 타는 동기화 된 상태로 정상작동하고 있으며, 퍼지제어를 이용하여 명령치로와 현재치로의 차이 및 선회 각속도를 이용하여 명령 타각을 계산하였다 (Hasegawa & Kouzuki, 1987). Fig. 9에서는 174K LNGC 운항속도의 시계열을 보여주고 있다. 단독 추진기 고장상태에서 두 개의 타는 각각 0.27°로 제어되고, 선수각은 -0.14°, 선박의 속도는 15.17 knots에서 직진 운항하고 있음을 추정할 수 있었다.

본 연구에서는 단독 추진기 고장상태 중에 추진기가 회전하지 않고 완전히 정지된 상태를 가정하였으며, 단독 추진기 고장상태에서 174K LNGC가 정상상태에 도달한 속도, 선수각, 타각을 초기조건으로 조종시험을 시뮬레이션 하였다. 단독 추진기 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션 하는 과정은 기존 표준 조종시험과 동일하지만, 하나의 추진기가 정지된 상태에서 테스트가 시작한다는 점만 다르다. 좌현 방향의 추진기가 정지된 경우를 기준으로 모든 시뮬레이션을 수행하였다. 초기선회시험, 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험을 시뮬레이션 하고, 정상운항상태에서 설계속도인 18.2knots로 운항하는 선박의 조종시험 계산 결과와 비교하였다.

Table 6 Predicted speed and rudder deflection angles of the 174K LNGC under the single propeller failure

Condition	Prediction	
	Speed [knots]	Rudder deflection angles [°]
Normal	18.20	0.00
Propeller stopped	15.17	0.27

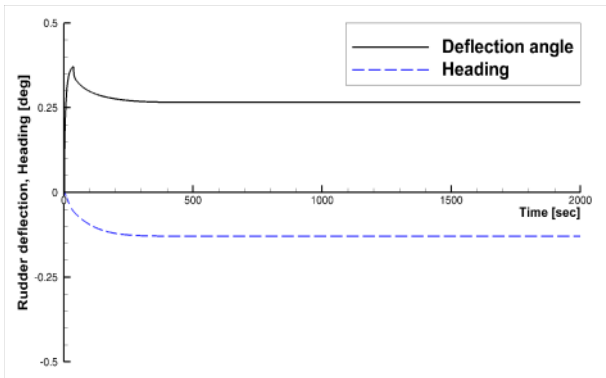


Fig. 8 Time histories of heading angle and rudder deflection angle for straight line maneuver of the 174K LNGC under single propeller failure

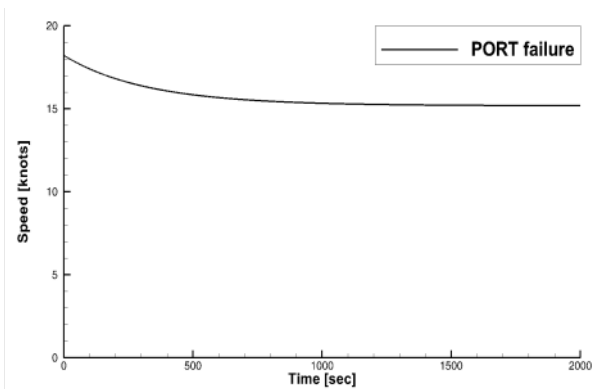


Fig. 9 Time histories of speed for straight line maneuver of the 174K LNGC under single propeller failure

Table 7에서는 단독 추진기 고장 상태에서 초기선회시험 시뮬레이션을 수행하여 추정된 초기진출거리(Initial track reach)와 정상운항 상태에서 추정된 초기진출거리의 상대비율을 정리하였으며, Fig. 10에서는 이때 얻어진 선박의 궤적을 각각 도시하고 있다. 실선은 정상운항 상태에서의 결과이며, 파선은 단독 추진기 고장 상태를 가리킨다. 단독 추진기 고장상태에서 초기진출거리는 정상운항상태에 비해 좌/우현 모두 감소하는 형태로 추정되었으나, 좌현 선회의 결과가 조금 더 작게 나타났다. 좌현의 추진기가 정지한 상태라면, 우현의 추진기에서 발생하는 추력으로 인해 선박을 좌현으로 선회시키려는 추력불균형 모멘트가 발생한다. 따라서 좌현방향으로 더 빠른 시점에 초기 선회가 가능할 것이라고 예상할 수 있으며, Table 7의 상대비율과 Fig. 10의 궤적에서 동일한 경향성을 확인할 수 있다.

Table 7 Relative ratio between the predicted initial track reach of the LNGC under the single propeller failure and that under the normal operating condition

Condition	Initial track reach	
	PORT	STBD
PORT failure [%]	88.91	92.60

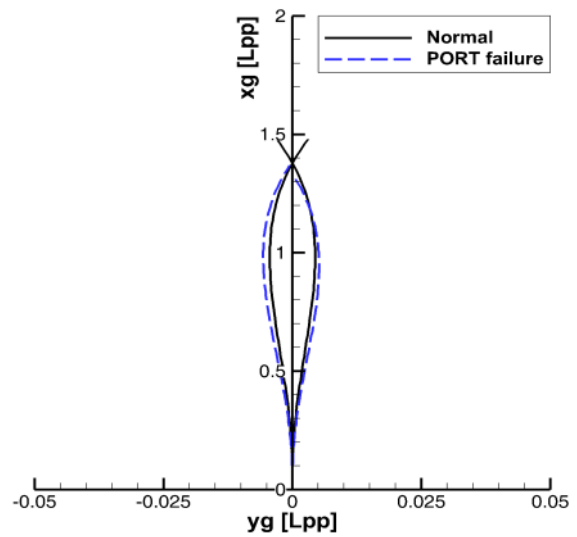


Fig. 10 Predicted trajectories for initial turning tests of the 174K LNGC under single propeller failure

Table 8, 9, 10은 단독 추진기 고장 상태에서 35° 선회시험 시뮬레이션 결과 추정된 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름과 정상운항상태에서 추정된 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름의 상대 비율을 각각 정리한 것이다. Fig. 11에서는 35° 선회시험 동안 추정된 선박의 궤적을 도시하고 있으며, 실선은 정상운항 상태에서의 결과를 파선은 단독 추진기 고장 상태에서 추정된 궤적을 가리킨다. 초기선회시험 결과와 마찬가지로 좌현 추진기가 고장난 상태에서 좌현 방향의 선회전진거리, 선회가로 이동거리, 선회지름의 크기가 더 작게 추정되었다. 좌현 선회궤적은 정상운항상태의 선회 궤적과 거의 동일하게 도시되었으나, 우현 선회 궤적은 216K LNGC 시운전 결과와 마찬가지로 선미방향으로 이동하는 특징을 발견할 수 있다.

Table 8 Relative ratio between the predicted advance of the 174K LNGC under single propeller failure and that under normal operating condition

Condition	Advance	
	PORT	STBD
ORT failure [%]	97.15	98.56

Table 9 Relative ratio between the predicted transfer of the 174K LNGC under single propeller failure and that under normal operating condition

Condition	Transfer	
	PORT	STBD
PORT failure [%]	99.52	102.82

Table 10 Relative ratio between the predicted tactical diameter of the 174K LNGC under single propeller failure and that under normal operating condition

Condition	Tactical diameter	
	PORT	STBD
PORT failure [%]	99.97	105.50

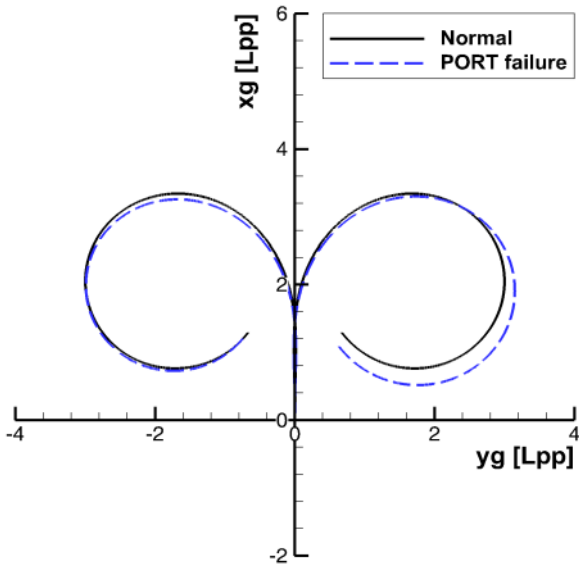


Fig. 11 Predicted trajectories for 35° turning tests of the 174K LNGC under single propeller failure

Table 11은 단독 추진기 고장 상태에서 좌/우현방향의 10°/10° 지그재그시험 결과 얻어진 첫 번째, 두 번째 과도작동각과 정상 운항 상태에서 얻어진 첫 번째, 두 번째 과도작동각의 상대비율을 정리하였으며, Fig. 12, 13에서는 이때 추정된 선박의 선수각과 선회 각속도의 시계열을 각각 도시하고 있다. 단독 추진기 고장상태에 따라 좌/우현의 영향이 다르게 나타날 것이기 때문에, 각각 도시하여 분석하였다. 실선과 파선은 정상운항 상태에서의 선수각 및 선회각속도를 가리킨다. 사각형을 갖는 실선과 원을 갖는 파선은 좌현 방향의 추진기가 정지된 조건에서 선수각과 선회각속도를 가리킨다. 전진 방향에 상관없이 모두 단독 추진기 고장상태에서 첫 번째 과도 작동각의 크기는 정상운항 상태에 비해 감소하였다. 다만, 우현방향의 지그재그시험에서 더 큰 폭으로 감소했음을 알 수 있다. 단독 추진기 고장상태에서 두 번째 과도작동각 크기는 좌현 방향으로 먼저 지그재그 운동을 수행한 경우에 더 감소폭이 큰 것으로 나타났지만, 지그재그 시험의 절차상 두 번째 진행방향은 우현방향임을 감안하면 첫 번째 과도작동각과 같이 우현방향으로 진행하고 있을 때 더 작게 추정되었다. 즉, 정지된 추진기의 설치 방향과 반대방향으로 진행되는 지그재그 운동에서 과도작동각의 크기가 더 작게 나타난다고 생각할 수 있다. 또한 단독 추진기 고장상태에서 좌/우현 방향의 10°/10° 지그재그시험 모두 선회 각속도가 정상운항상태의 선회각속도보다 작음을 알 수 있다.

Table 11 Relative ratio between the predicted 1st and 2nd overshoot angle of the 174K LNGC for 10°/10° zigzag tests under single rudder failure and those under normal operating condition

Condition	Overshoot angle	
	1 st overshoot angle	2 nd overshoot angle
PORT failure (to PORT) [%]	76.13	84.30
PORT failure (to STBD) [%]	67.56	97.04

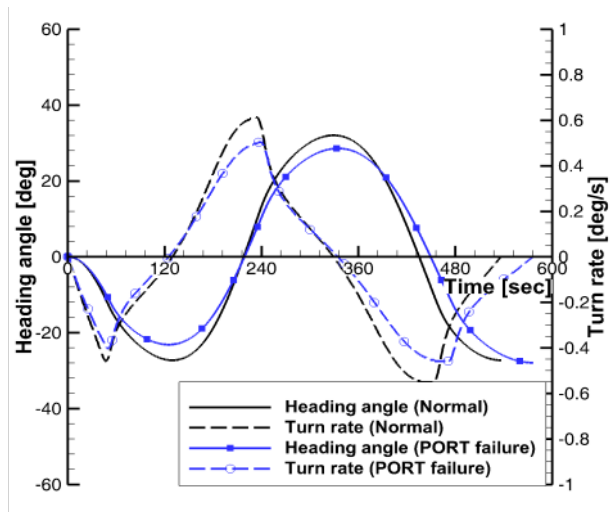


Fig. 12 Time histories of heading angle of the 174K LNGC for 10°/10° zigzag test to port side under single propeller failure

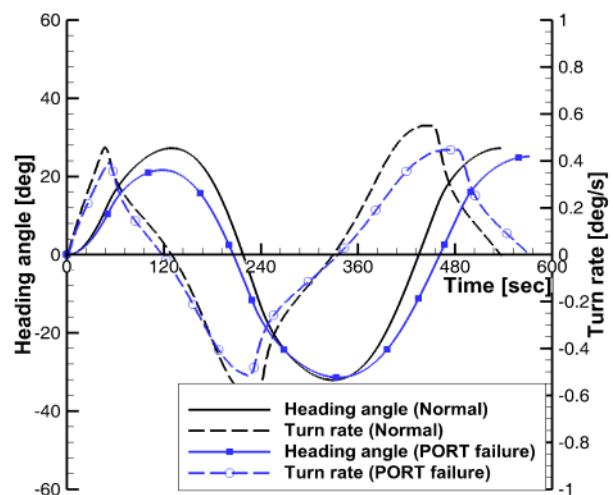


Fig.13 Time histories of heading angle of the 174K LNGC for 10°/10° zigzag test to starboard side under single propeller failure

Table 12는 단독 추진기 고장 상태에서 좌/우현방향의 20°/20°

지그재그시험 결과 얻어진 첫 번째, 두 번째 과도작동각과 정상 운항 상태에서 얻어진 첫 번째, 두 번째 과도작동각의 상대비율을 정리하였으며, Fig. 14, 15에서는 이때 얻어진 선박의 선수각과 선회 각속도의 시계열을 각각 도시하고 있다. 실선과 파선은 정상운항 상태에서의 선수각 및 선회각속도를 가리킨다. 사각형을 갖는 실선과 원을 갖는 파선은 좌현 방향의 추진기가 정지된 조건에서 선수각과 선회각속도를 가리킨다. 앞서 10°/10° 지그재그 시험에 비해 감소비율이 작아지고 있고, 두 번째 과도작동각의 경우 정상운항 상태보다 미미하게나마 커지기도 했다. 하지만, 대체적으로 유사한 경향성을 확인할 수 있었다. 초기 전진 방향에 상관없이 모두 첫 번째 과도작동각의 크기는 정상운항 상태에 비해 감소하였고, 우현방향의 지그재그시험에서 더 큰 폭으로 감소했음을 알 수 있다. 두 번째 과도작동각의 크기는 좌현 방향으로 먼저 지그재그 운동을 수행한 경우에는 정상운항 상태보다 감소했고, 반대방향의 경우 정상운항 상태보다 증가하는 결과가 나타났다. 다만, 앞서 말한 것처럼 그 증가 크기는 미미한 정도이다. 단독 추진기 고장상태에서 좌/우현 방향의 20°/20° 지그재그 시험 모두 선회 각속도가 정상운항상태의 선회각속도보다 작음을 알 수 있다.

Table 12 Relative ratio between the predicted 1st and 2nd overshoot angle of the 174K LNGC for 20°/20° zigzag tests under single rudder failure and those under normal operating condition

Condition	Overshoot angle	
	1 st overshoot angle	2 nd overshoot angle
PORT failure (to PORT) [%]	88.99	93.15
PORT failure (to STBD) [%]	85.89	103.43

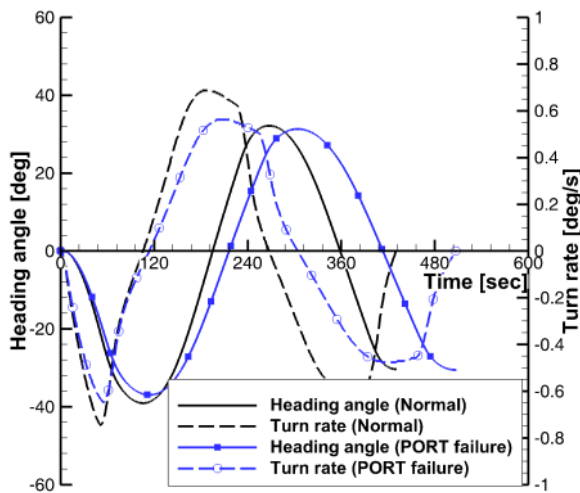


Fig. 14 Time histories of heading angle of the 174K LNGC for 20°/20° zigzag test to port side under single propeller failure

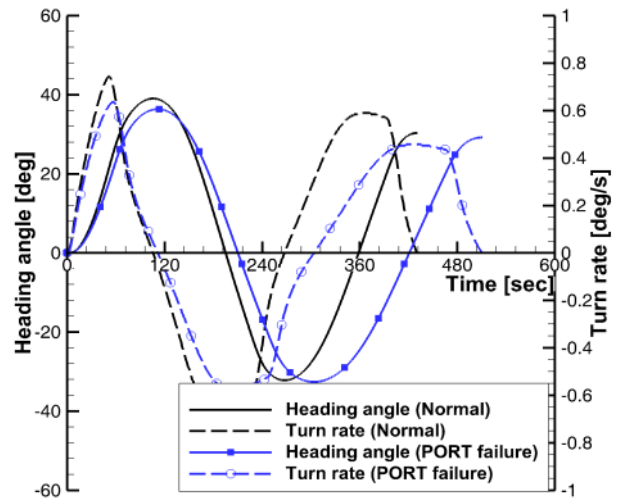


Fig. 15 Time histories of heading angle of the 174K LNGC for 20°/20° zigzag test to starboard side under single propeller failure

5. 결론

본 연구는 쌍축 추진 선박의 고장모드 중에 추진기 고장이 조종운동에 미치는 영향을 분석하는 연구로서, 동일 선종 선박의 시운전 결과와 비교하여 검증된 수학적모형을 기반으로 단독 추진기 고장 상태에서 대상 선박의 조종운동의 특징을 밝히고자 하였다. 이를 위해 기존의 수학적모형을 기반으로 정상운항상태 및 단독 추진기 고장상태에서 선박의 조종운동을 시뮬레이션을 하였다. 대상 선박의 유체력미계수와 타의 양력계수를 경험식을 통해 추정하였고, 추진기 추력계수 및 저항 계수는 모형시험 결과로부터 획득하였다. 정상운항 상태에서 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션하고 자유항주 모형시험 결과와 비교함으로써 수학적모형의 타당성을 검증하였으며, 검증된 수학적모형과 몇 가지 가정을 이용하여 단독 추진기 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 세 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 쌍축 추진 174K LNGC를 대상으로 단독 추진기 고장상태의 조종운동을 모사하는 방안을 제안하였고, 216K LNGC 시운전 결과와 비교하여 정성적으로 비교하였다. 조종운동방정식에서 고장 난 추진기의 분당회전수는 0으로, 타에 입사하는 유속은 추진기 회전이 없어 가속되지 않는다고 가정하였다. 이와 같은 가정을 고려하여 조종운동방정식을 풀이하였고, 그 결과가 동일 선종의 35° 선회시험 및 20°/20° 지그재그 시험 결과와 정성적으로 유사한 경향성을 가짐을 확인하였다. 단, 시운전을 통한 10°/10° 지그재그의 경우 일정한 경향성 확인이 불가능 하였고, 시뮬레이션을 통해 계산된 10°/10° 지그재그 결과에서는 20°/20° 지그재그 시뮬레이션, 시운전 결과와 동일하게 과도작동각이 정상운항 상태에 비해 감소하는 경향성을 확인하였다.

둘째, 정상운항상태 및 단독 추진기 고장상태에 대해서 검증된 수학적모형을 이용하여, 단독 추진기 고장 시 IMO 표준 조종시

험을 수행하는 방안을 제시하였다. 정상운항상태에서 설계속도로 운항할 때 필요한 분당회전수를 기준으로, 단독 추진기 고장 상태에서 직진운항이 가능한 속도, 선수각, 타각을 추정하였다. 추력 불균형으로 인한 선박의 회전을 방지하기 위하여 타를 제어했고, 타각은 0.27° , 선수각은 -0.14° , 속도는 15.17 knots였다.

셋째, 추정된 초기조건을 기준으로 표준 조종시험을 수행하였고, 단독 추진기 고장상태가 174K LNGC의 조종운동에 미치는 영향을 분석하였다. 선박의 선회운동 시 선회 방향에 따라 추력 불균형의 영향이 있음을 확인할 수 있었으며, 정지된 추진기의 방향과 선회 방향에 따라 그 영향이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 지그재그 운동 시에도 정지된 추진기의 방향과 진행 방향에 따라 그 영향이 다르게 나타남을 확인하였다.

References

- Fowler, T.G. & Sogard, E., 2000. Modeling ship transportation risk. *Risk Analysis*, 20(2), pp.225-244.
- Fujii, J. & Tsuda, T., 1961. Experimental researchs on rudder performance (2). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 110, pp.31-42.
- Fujii, J. & Tsuda, T., 1962. Experimental researchs on rudder performance (3). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 111, pp.51-58.
- Hasegawa, K. & Kouzuki, A., 1987. Automatic collision avoidance system for ships using fuzzy control (in Japanese). *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 205: pp.1-10.
- Hendzik, J., 2013. Evaluating criteria for DP vessels. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 20(4), pp.118-122.
- International Maritime Organization (IMO), 2002. *MSC.137(76) Standards for ship manoeuvrability*. London, UK: International Maritime Organization.
- Kijima, K. Nakiri, Y. Tsutsui, Y. & Matsunaga, M., 1990. Prediction method of ship manoeuvrability in deep and shallow water. *MARSIM & ICSM 1990*, Tokyo, Japan, 4-7 June 1990, pp.311-319
- Kim, S.W., 2008. Introduction for single screw maneuverability on twin screw LNG ship. *Special Issue of the Society of Naval Architecture of Korea*, pp. 84-89, September.
- Kim, Y.G. Kim, S.Y. Kim, H.T. Yu, B.S. & Lee, S.W., 2006. Study on the maneuvering characteristics of a container ship with twin skegs. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.15-21.
- Kim, Y.G. Yeo, D.J. Kim, S.Y. Yun, K.H. & Oh, B.I., 2009. Prediction of maneuverability of KCS by CPMC captive model test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.553-561.
- Lloyd's Register (LR), 2016. *Rules and regulations for the classification of ships*. London, UK: Lloyd's Register (LR)
- Mohovic, D. Mohovic, R. & Rudan, I., 2013. Simulation of ship movement after steering system failure to determine the worst case scenario of grounding. *Promet - Traffic & Transportation*, 25(5), pp.457-466.
- You, Y. & Kim, H., 2017. A numerical study on the maneuverability of a twin-screw ship under single rudder failure, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.126-134.

