

쌍축 추진 선박의 단독 타 고장 상태에서의 조종성능에 대한 수치적 연구

유영준^{1,†} · 김현준²
대우조선해양(주)¹
인하대학교 조선해양공학과²

A Numerical Study on the Maneuverability of a Twin-screw Ship under Single Rudder Failure

Youngjun You^{1,†} · Hyunjun Kim²
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., LTD. (DSME)¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University²

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 twin-screw ships under mechanical failures. Because this kind of assessment has not yet been conducted, it is necessary to study the types of machinery failures that can significantly affect the maneuverability of a ship, and to construct a procedure to simulate the maneuvering behavior under such failures. In this paper, the sole focus is the steering system failure from among the variety of failure types, and the maneuvering behavior of the ship under the single rudder failure is simulated for an investigation of the unique characteristics. First, the mathematical model for the twin-screw container ship is verified by comparing the simulated results for the 35° turning test, 10°/10° zigzag test, and 20°/20° zigzag test under the normal operating condition with those obtained from free running model tests. After the IMO maneuvering tests are additionally simulated under the single rudder failure, the results are reviewed to investigate the maneuvering characteristics that are due to the failure. Further, the 35°/35° zigzag test and the 35° turning test are simulated to additionally investigate the effects of the single rudder failure on the steering and turning abilities.

Keywords : Twin-screw(쌍축), Maneuverability(조종성능), Machinery failure(기계 고장), Single rudder failure(단독 타 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 안전 성과 Operating expenses(OPEX) 절감을 중요시하는 선주들이 선호하고 있다. 따라서 대형 컨테이너선(container ship)과 LNG 선(Liquefied natural gas carrier(LNGC))을 중심으로 쌍축 추진 선박이 건조되고 있다. 쌍축 추진 선박의 선체, 추진기, 타의 설계는 단축 추진 선박의 설계와 유사한 단계를 거쳐 수행된다. 특히 조종성능 관점에서는 거의 동일한 평가 절차를 거쳐 설계되고 있다고 볼 수 있다.

일반적으로 선박의 조종성능 평가는 국제해사기구(IMO) MSC.137(76)에서 제시하고 있는 규정 (IMO, 2002)을 따라 수행 되는데, 설계속도에서의 초기선회시험(initial turning test), 35° 선회시험(Turning test), 10°/10° 지그재그시험(zigzag test), 20°/20° 지그재그시험을 수행하여 평가된 시험값과 IMO 규정을 비교함으로써 설계된 선박의 조종성능을 평가한다. 단축과 쌍축 추진기를 갖는 컨테이너선의 조종성능을 모형시험을 통해 평가하고, 그 특징을 밝히는 연구가 수행된 바 있다 (Kim, et al., 2006; 2009).

쌍축 추진 선박의 조종성능을 기존의 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 용량 산정이나 운용 기준 설정에 활용되고 있다. 하지만 조종성능 평가 시 어떤 고장 모드를 어떻게 고려할 수 있는지에 대한 명확한 절차와 기준이 마련되어 있지 않은 상태이다. 따라서 어떤 고장 모드를 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 있다 (Fowler, et al. 2000). 또, 선박의 운항 과정에서 조타장치 고장(steering system failure)을 고려하여 가장 위험한 고장 시나리오를 찾는 연구를 수행한 바 있다 (Mohovic, et al., 2013). 물론 이러한 연구는 쌍축 추진 선박의 조종특성 관점에서 고장 모드를 분석한 것은 아니었지만, 어떤 고장모드에 대한 검토가 필요할지 연구의 단초를 제공하고 있다. 이를 참고하여 조타장치 고장 상태에서의 조종운동을 시뮬레이션 하는 방안을 연구하고자 하였다.

본 연구는 쌍축 추진 선박의 고장 모드 중에 조타장치 고장이 조종운동에 미치는 영향을 분석하는 연구로써, 단독 타 고장(single rudder failure) 상태에서 선박의 조종성능을 수치적으로 계산하고, 그 특성을 밝히는 것을 목표로 하였다. 먼저, 선주들이 쌍축 추진 선박으로 선호하는 대형 컨테이너선을 대상으로 연구를 수행하였다. 대상 선박의 조종운동을 시뮬레이션하는데 필요한 유체력계수와 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 컨테이너선의 모형시험 결과를 이용하였다. 경험식과 모형시험 결과를 기반으로 수행된 정상상태 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여, 시뮬레이션 결과와 자유항주시험을 통해 획득한 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험 결과를 비교하였다. 정상상태에 대해서 검증된 수학모형을 이용하여 단독 타 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험을 추가적으로 시뮬레이션 하였다. 결과 분석과정에서 단독 타 고장 상태에서 나타난 조종운동의 특성이 선회성능, 변침성능과 연관되어 있음을 유추할 수 있었다. 단독 타 고장상태에서 35°/35° 지그재그시험과 35° 선회시험을 추가적으로 시뮬레이션하여, 단독 타 고장 상태에서 나타난 대상선박의 선회성능, 변침성능의 특징을 분석하였다.

2. 대상 선박 및 조종 운동 방정식

본 연구에서는 쌍축 추진기를 갖는 대형 컨테이너선을 대상으로 연구를 수행하였다. Table 1에서는 대상 선박의 선체, 추진기, 타의 주요 제원을 보여주고 있다. LCG는 선체중량부에서부

터 무게중심까지 떨어진 거리를 가리킨다. RPM은 추진기의 분당 회전수를 가리키며, 좌/우현에 설치된 추진기는 동일한 회전수를 갖고 회전한다. 단독 타 고장상태만을 가정하였기 때문에, 하나의 타 고장에도 불구하고 두 개의 추진기 모두 동일한 회전수로 정상 작동하는 상태를 가정하였다.

Table 1 Principal particular of the hull, propeller and rudder of the container ship

Item	Container ship
Length between perpendiculars (L_{pp}) [m]	375.00
Breadth (B) [m]	59.00
Draft (T) [m]	16.00
Block coefficients (C_B) [-]	0.71
LCG from midship [m]	7.00
Design speed [knots]	21.00
Diameter of propellers (D_P) [m]	9.60
Pitch at 0.7R [m]	6.70
Direction of rotation [-]	Inward over the top
RPM (PORT/STBD) [-]	67.6
Rudder area [m^2]	60.0

대상선박의 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 선박의 무게중심을 기준으로 회전하는 각속도를, \dot{r} 은 각속도의 시간변화율을 가리킨다. X, Y, N 은 각각 선체에 작용하는 x 방향, y 방향 힘과 모멘트를 의미한다.

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

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 좌표계를 보여주고 있다. x_g, y_g 는 Global 좌표계를 의미한다. $\delta_{PORT}, \delta_{STBD}$ 는 좌현(PORT)과 우현(STBD)에 설치된 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.

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

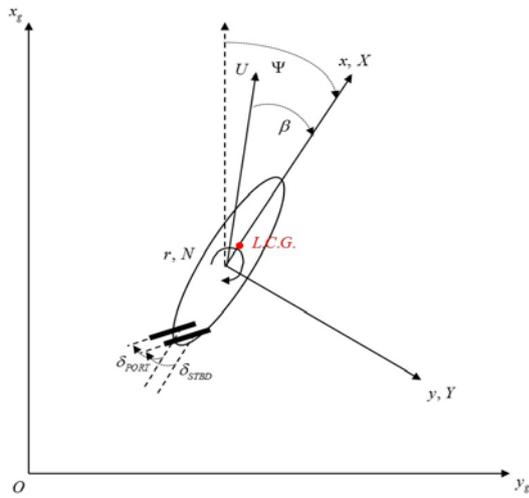


Fig. 1 Coordinate system

식 (3)은 선체에 작용하는 동유체력을 정리한 것이다. 각 유체력계수는 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 & Tsuda 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 값임을 의미한다.

$$X_H = -m_x \dot{u} + (m_y + X_{vr})vr + \frac{1}{2}(\rho L_{PP} T U^2) X_{uu} \cos^2 \beta \quad (3)$$

$$Y_H = -m_y \dot{v} + m_x ur + Y_H(v', r')$$

$$N_H = -J_{ZZ} \dot{r} + N_H(v', r') + x_G Y_H(v', r')$$

여기서,

$$Y_H(v', r') = \frac{1}{2}(\rho L_{PP} T U^2)(Y_v'v' + Y_r'r' + Y_{vv}'v'|v'| + Y_{rr}'r'|r'| + Y_{vr}'v'r' + Y_{vr}'v'r'r')$$

$$N_H(v', r') = \frac{1}{2}(\rho L_{PP}^2 T U^2)(N_v'v' + N_r'r' + N_{vv}'v'|v'| + N_{rr}'r'|r'| + N_{vr}'v'r' + N_{vr}'v'r'r')$$

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

$$N_P = y_P(1-t)\rho n_{PORT}^2 D_P^4 K_T(J_{P, PORT}) - y_P(1-t)\rho n_{STBD}^2 D_P^4 K_T(J_{P, STBD})$$

여기서,

$$J_{P, PORT} = u(1-w_P)/n_{PORT} D_P$$

$$J_{P, STBD} = u(1-w_P)/n_{STBD} D_P$$

$$X_R = -(1-t_R)F_{N, PORT} \sin \delta_{PORT} - (1-t_R)F_{N, STBD} \sin \delta_{STBD} \quad (5)$$

$$Y_R = -(1+a_H)F_{N, PORT} \cos \delta_{PORT} - (1+a_H)F_{N, STBD} \cos \delta_{STBD}$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H)F_{N, PORT} \cos \delta_{PORT} - (x_R + a_H x_H)F_{N, STBD} \cos \delta_{STBD} - y_R(1-t_R)F_{N, PORT} \sin \delta_{PORT} + y_R(1-t_R)F_{N, STBD} \sin \delta_{STBD}$$

여기서,

$$F_{N, PORT} = 0.5 * \rho A_R^2 U_{R, PORT}^2 C_{L, \alpha} \sin \alpha_{R, PORT}$$

$$F_{N, STBD} = 0.5 * \rho A_R^2 U_{R, STBD}^2 C_{L, \alpha} \sin \alpha_{R, STBD}$$

$$C_{L, \alpha} = \frac{6.13 \Lambda}{\Lambda + 2.25}$$

$$\alpha_{R, PORT} = \delta_{PORT} - \gamma(\beta - l_R' r')$$

$$\alpha_{R, STBD} = \delta_{STBD} - \gamma(\beta - l_R' r')$$

식 (3), (4), (5)는 기존 단축 추진 선박의 조종성능을 추정하기 위하여 사용되던 경험식을 그대로 사용하되, 추진기, 타의 경우 좌현과 우현에 설치된 것을 나누어 표현한 것이다. 단독 추진기의 경우 추진기 회전 방향을 고려하여 타에 입사하는 유속을 좌현 선회와 우현선회 시 다르게 고려하기도 한다. 본 연구에서는 이와 같은 효과는 고려하지 않았다. 식 (4)에서, t 는 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 전진비만의 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 은 선체중양부에서부터 타가 떨어진 종 방향 거리를, x_H 는 수평동요에 따른 힘이 작용하는 위치를 의미한다. A_R 은 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 Λ 를 이용하여 추정하는 경험식을 이용하여 획득하였다 (Fujii & Tsuda, 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 수학모형을 이용하여 쌍축 추진 컨테이너선의 조종운동을 시뮬레이션 하고자 하였다.

3. 대상선박의 표준 조종시험 시뮬레이션

본 연구에서 단독 타 고장 상태에서 선박의 조종성능을 확인하기 전에, 사용된 수학모형을 통한 정상상태에서 조종운동의 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증할 필요가 있었다. 이를 위해 정상운항 상태에서 대상 선박의 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션

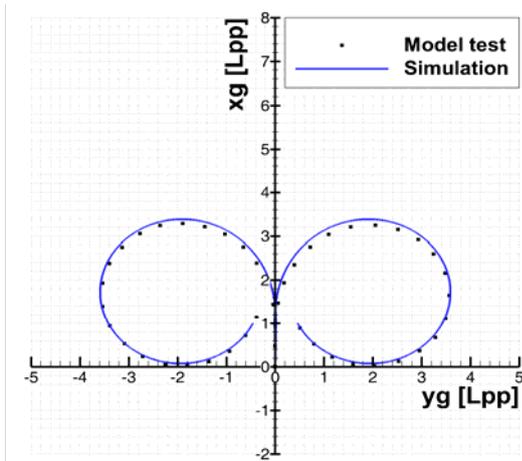


Fig. 2 Trajectories for 35° turning tests of the container ship

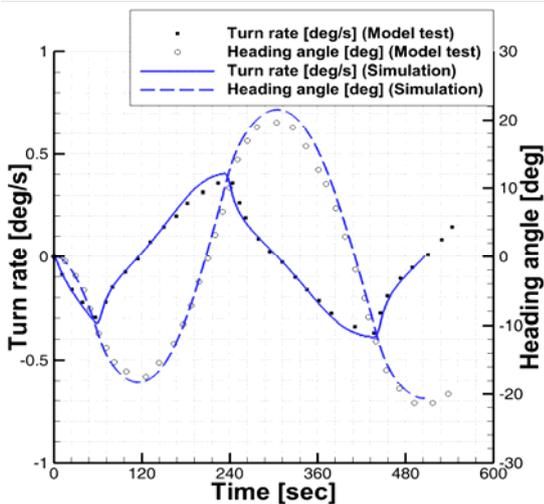


Fig. 3 Time histories of heading angle and turn rate for 10°/10° zigzag tests to port side of the container ship

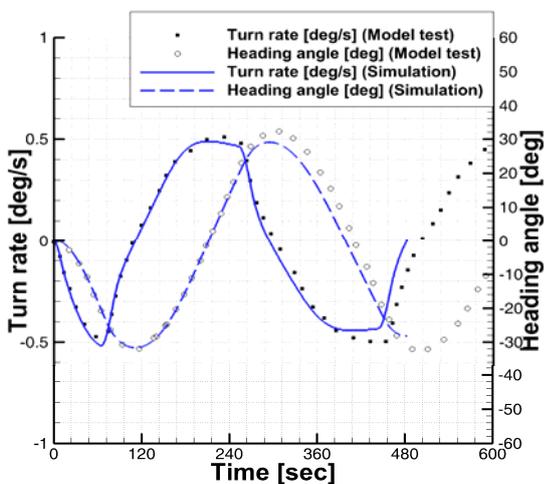


Fig. 4 Time histories of heading angle and turn rate for 20°/20° zigzag tests to port side of the container ship

하였고, 계산된 결과와 자유항주 모형시험 결과를 비교하였다. 모두 세 가지 시험을 모사하였으며, 각각 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험이다. Figs. 2, 3, 4에서는 대상선박의 IMO 표준 조종시험을 계산한 결과와 모형시험 결과를 각각 도시하고 있다. Fig. 2는 35° 선회시험에서 선박 궤적을 보여주고 있다. 검은색 사각형은 자유항주 모형시험 시 계측된 선박 궤적을, 파란색 실선은 계산된 선박 궤적을 가리킨다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 10°/10° 지그재그시험과 20°/20° 지그재그시험을 수행하는 동안 선수각과 선회각속도의 시계열을 보여주고 있다. 검은색 사각형과 검은색 원은 자유항주 모형시험 시 계측된 선수각과 선회각속도를 가리킨다. 파란색 실선과 파란색 파선은 계산된 선수각과 선회각속도를 각각 가리킨다. Figs. 2, 3, 4를 살펴보면 사용된 수학모형으로 계산된 결과가 자유항주 모형시험 결과와 유사함을 확인할 수 있는데, 35° 선회시험 시 선박의 궤적, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험 시 첫 번째, 두 번째 과도작동각(overshoot angle)의 크기와 시계열의 변화 양상이 거의 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 대상선박의 조종운동 시뮬레이션을 위해 사용된 정상상태 수학모형의 타당성을 검증하였다.

4. 단독 타 고장 상태에서 표준 조종시험 시뮬레이션

선박의 운항 중 조타기의 안정적인 운용을 위하여 시운전 중에 다양한 테스트를 권고하고 있다 (IMO, 2013). 어떠한 고장이거나 문제가 발생하는 경우에도 조타기의 고장을 방지할 수 있도록 하겠다는 것인데, 그럼에도 불구하고 선박 운항 중에 조타장치 고장으로 인한 사고는 발생하고 있다. 본 연구에서는 조타장치 고장을 가정하기 위하여 고장난 타가 -35°~35° 사이에 임의의 위치에서 고정된 상태를 가정하였다. 단독 타 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션 하는 과정은 두 개의 추진기가 정상 작동하는 조건에서 기존 표준 조종시험과 동일하지만, 하나의 타가 임의의 각도에 일정하게 고정된 상태에서 테스트가 시작한다는 점만 다르게 계산되었다. 본 논문에서 가정한 수학모형의 특성상 좌현과 우현에 설치된 타의 각도가 같을 경우 각각의 타가 조종운동에 미치는 영향이 대칭하게 나타나기 때문에, 좌현 방향의 타가 고정되는 경우를 기준으로 모든 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 좌현 방향의 타가 고정된 조건에서 초기선회시험, 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험을 시뮬레이션 하였고, 정상운항 상태의 계산 결과와 비교하였다.

Table 2에서는 단독 타 고장 상태에서 초기선회시험 시뮬레이션을 수행하여 추정된 초기진출거리(initial track reach)와 정상운항 상태에서 추정된 초기진출거리의 상대비율을 정리하였으며, Fig. 5에서는 이때 얻어진 선박의 궤적을 각각 도시하고 있다. 검은색 실선은 정상운항 상태에서의 결과이며, 파란색 사각형을 갖는 1점 쇄선은 단독 타 고장 상태에서 고장 난 타가 -5°로 고정된 경우, 붉은색 원을 갖는 파선은 0°에서 고정된 경우, 녹색 역

삼각형을 갖는 점선은 5°에서 고정된 경우를 가리킨다. 식 (5)에서 선체 중심에서 좌/우현 방향으로 설치된 각각의 타에서 발생한 모멘트가 고려되는데, 두 개의 타가 다른 각도로 운용될 때 그 영향이 나타나게 된다. 따라서 서로 다른 부호, 같은 크기로 고정된 타 조건에서 좌, 우현 방향의 조종운동 결과가 완전하게 대칭하게 나타나지는 않는다. 다만, 그 영향이 미미하다고 판단된다. 계산결과 -5°로 고정된 타를 갖는 선박의 우현 방향의 초기 진출거리와 5°로 고정된 타를 갖는 선박의 좌현 방향의 초기 진출거리는 거의 유사하게 나타난다. 마찬가지로 -5°로 고정된 타를 갖는 선박의 좌현 방향의 초기 진출거리와 5°로 고정된 타를 갖는 선박의 우현 방향의 초기 진출거리도 거의 유사하게 나타난다. 고정된 타의 각도가 -5°에서 +5°로 증가함에 따라 좌현 방향의 초기 진출거리는 증가하는 경향을, 우현 방향의 초기 진출거리는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 고정 난 타가 중립타각인 0°에 고정되었을 경우에는 좌현과 우현방향의 선회 결과가 정상상태의 결과에 비해 각각 42%, 41% 증가된 초기 진출거리를 갖는 것으로 추정되었다.

Table 2 Relative ratios between the predicted initial track reaches under single rudder failure, and those under the normal operating condition

Fixed angle of uncontrollable rudder	PREDICTION	
	PORT	STBD
-5.0 deg	114%	199%
0.0 deg	142%	141%
5.0 deg	200%	114%

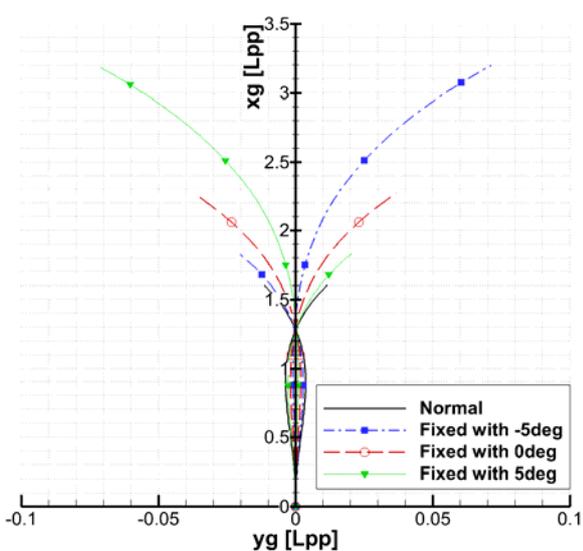


Fig. 5 Predicted trajectories for the initial turning tests of the container ship under single rudder failure

Table 3 Relative ratios between the predicted advances of the container ship under single rudder failure at intervals of 10°, and that under the normal operating condition

Fixed angle of uncontrollable rudder	PREDICTION	
	PORT	STBD
-30.0 deg	100%	403%
-20.0 deg	107%	205%
-10.0 deg	118%	158%
0.0 deg	135%	133%
10.0 deg	161%	117%
20.0 deg	210%	107%
30.0 deg	434%	100%

Table 4 The relative ratios between the predicted transfers of the container ship under the single rudder failure at intervals of 10°, and that under the normal operating condition

Fixed angle of uncontrollable rudder	PREDICTION	
	PORT	STBD
-30.0 deg	106%	396%
-20.0 deg	120%	262%
-10.0 deg	139%	201%
0.0 deg	165%	163%
10.0 deg	204%	137%
20.0 deg	266%	119%
30.0 deg	387%	105%

Table 5 The relative ratios between the predicted tactical diameters of the container ship under the single rudder failure at intervals of 10°, and that under the normal operating condition

Fixed angle of uncontrollable rudder	PREDICTION	
	PORT	STBD
-30.0 deg	105%	330%
-20.0 deg	116%	227%
-10.0 deg	131%	179%
0.0 deg	152%	150%
10.0 deg	182%	130%
20.0 deg	230%	115%
30.0 deg	325%	104%

Tables 3, 4, 5는 단독 타 고장 상태에서 35° 선회시험 시뮬레

이선 결과 추정된 선회전진거리(advance), 선회가로이동거리(transfer), 선회지름(tactical diameter)와 정상운항 상태에서 추정된 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름의 상대 비율을 각각 정리하였다. Fig. 6 에서는 35° 선회시험 동안 얻어진 선박의 궤적을 도시하고 있으며, Fig. 7에서는 좌현방향으로 35° 선회를 하는 동안 선회각속도의 시계열을 도시하고 있다.

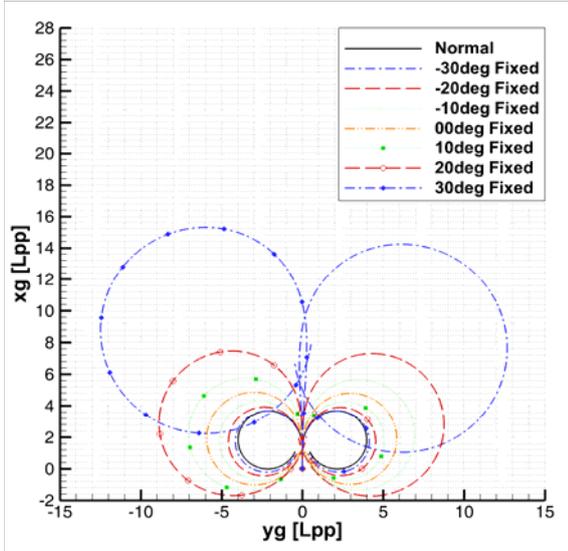


Fig. 6 Predicted trajectories for the 35° turning tests of the container ship under single rudder failure

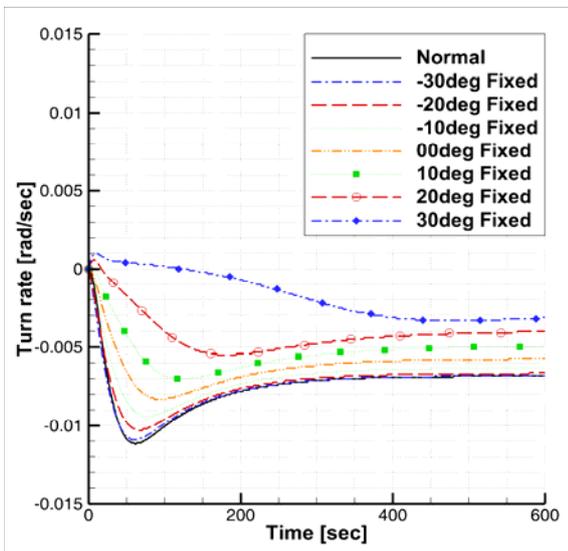


Fig. 7 Predicted time histories of the turn rates for the 35° turning tests of the container ship under single rudder failure (PORT)

Figs. 6, 7에서 검은색 실선은 정상운항 상태에서의 결과이며, 파란색 1점 쇄선은 단독 타 고장 상태에서 고정 난 타가 -30°로 고정된 경우, 붉은색 파선은 -20°로 고정된 경우, 녹색 점선은 -10°로 고정된 경우, 오렌지색 2점 쇄선은 0°로 고정된 경우를 가

리킨다. 녹색 사각형을 갖는 점선은 10°로 고정된 경우, 붉은색 원을 갖는 파선은 20°로 고정된 경우, 파란색 다이아몬드를 갖는 1점 쇄선은 30°로 고정된 경우를 가리킨다. 앞서 설명했던 초기 선회시험 시뮬레이션 결과와 마찬가지로, 고장난 타의 고정된 각도가 -30°에서 +30°로 증가함에 따라 좌현 방향의 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름은 증가하는 경향을, 우현 방향의 결과는 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 6에서 보는 것처럼, 고정된 타각이 -30°일 때 우현방향 선회궤적과 고정된 타각이 30°일 때 좌현방향 선회 궤적이 고정된 타각이 작은 조건에서의 선회궤적에 비해 뚜렷하게 전진방향으로 편향된 것을 알 수 있다. Tables 3, 4, 5에서 표시된 상대 비율을 보아도 더 뚜렷하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 단독 타 고장 상태에서 고정된 타각 선회하려는 반대방향으로 모멘트를 발생시키고 있을 때, 다른 하나의 타만을 이용하여 선박을 선회시킬 수 있는 모멘트를 발생시켜야 한다. 보통 35° 선회를 시작하면 선회각속도가 빠르게 증가하다가 정점에 도달한 뒤, 감소하여 정상상태에 도달하여 일정한 속도와 선회각속도를 유지하는 것이 일반적이다. 정상운항 상태를 포함하여 각각의 단독 타 고장 상태에서 35° 선회시험 동안의 선회각속도를 도시하였다. Fig. 7의 선회 각속도의 시계열을 보면, 고장난 타가 30°로 고정된 경우의 시계열과 다른 조건의 시계열은 뚜렷하게 차이를 알 수 있다. 일반적인 선회와 달리 선회각속도 정점에 도달하는 시간이 상대적으로 길어지고, 정점을 지나 정상상태에 도달하는 경향성이 뚜렷하지 않은 것이 특징이다. 또한 선박이 선회를 시작하는 초기에 선수각 변화가 더 완만한 것을 알 수 있다. 결국 다른 단독 타 고장 조건에 비해 선회전진거리가 선회지름보다 상대적으로 크게 증가하여, 전진방향으로 편향된 궤적을 보임을 알 수 있다. 우현 방향의 선회 각속도 시계열의 경우 본 논문에 삽입되지는 않았지만, 동일한 경향을 보였다.

앞의 단독 타 고장 상태에서 초기선회시험, 35° 선회시험 결과를 통해, 단독 타 고장 상태가 선박의 선회성능에 직접적인 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 단독 타 고장상태가 선회성능에 미치는 영향을 보다 구체적으로 확인하기 위하여, 타각 고정된 각도를 -35°에서 35°까지 1°씩 증가시켜가면서 선회전진거리, 선회가로이동거리, 선회지름의 변화를 확인하였다. Fig. 8은 단독 타 고장상태에서 추정된 선회전진거리와 정상운항 상태에서 추정된 선회전진거리의 상대비율을 보여주고 있다. Fig. 9는 선회가로이동거리의 상대비율을, Fig. 10은 선회지름의 상대비율을 보여주고 있다. 먼저 Tables 3, 4, 5에서 봤던 것처럼, 고정되는 타각의 크기가 커질수록 반대방향으로의 선회 시 궤적이 전진방향으로 편향됨을 확인할 수 있었다. 심지어 고정된 타각의 절대값이 31°인 경우, 타의 방향과 반대방향으로 회전하는 경우의 선회전진거리가 30° 조건에 비해 더 커진 것과 대조적으로, 선회가로이동거리와 선회지름이 30°의 결과에 비해 감소하고 있었다. 따라서 단독 타 고장상태에서 타 고정 각도가 커질수록 전진방향으로의 궤적이 더 편향되었음을 알 수 있다. 또한 좌현 방향의 타각 고정되는 본 연구의 계산 조건에서는 좌현방향의 선회결과에서 더 뚜렷하게 편향성이 나타남을 알 수 있다. Figs. 8, 9, 10

에서는 고정된 타각의 절대값이 31°가 넘어가면 정상 작동하는 다른 하나의 타만을 이용하여 반대방향으로의 선회가 불가능함을 알 수 있다. 즉, 선체를 선회시키는데 필요한 최소한의 모멘트 보다 더 큰 모멘트를 정상 작동하는 하나의 타만을 사용해서 만들지 못하는 것이다. 따라서 대상선박이 단독 타 고장 상태에서 선회가 가능한 고장 난 타의 한계 조건이 |31°|라고 판단할 수 있다.

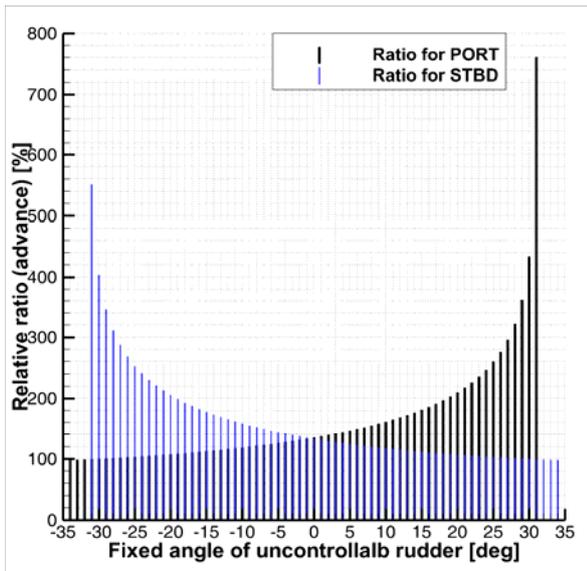


Fig. 8 Relative ratios between the predicted advances under single rudder failure at intervals of 1°, and those under the normal operating condition

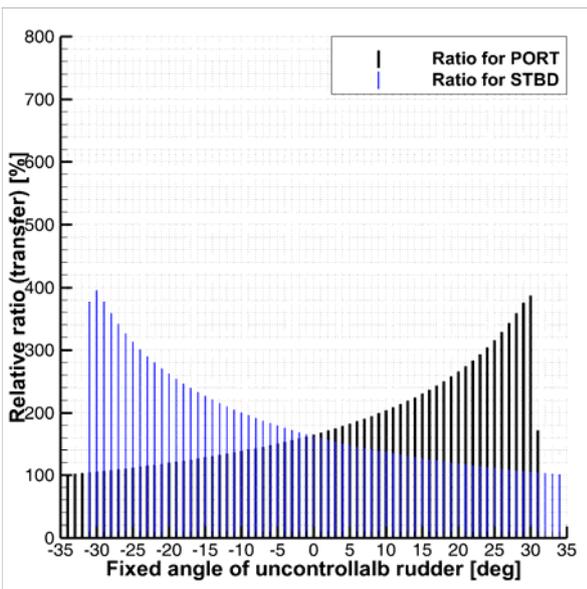


Fig. 9 Relative ratios between the predicted transfers under single rudder failure at intervals of 1°, and those under the normal operating condition

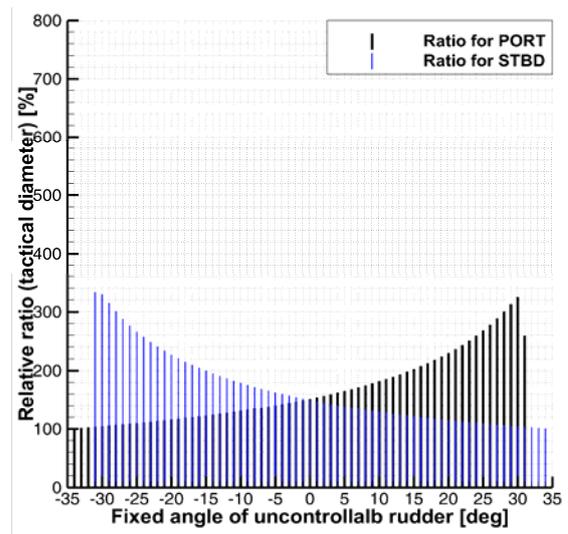


Fig. 10 Relative ratios between the predicted tactical diameters under single rudder failure at intervals of 1°, and those under the normal operating condition

Table 6에서는 단독 타 고장 상태에서 좌현방향의 10°/10° 지그재그시험 결과 얻어진 첫 번째, 두 번째 과도작동각과 정상운항 상태에서 얻어진 첫 번째, 두 번째 과도작동각의 상대비율을 정리하였으며, Fig. 11에서는 이때 얻어진 선박의 선수각의 시계열을 도시하고 있다. Fig. 11에서 검은색 실선은 정상운항 상태에서의 결과이며, 파란색 1점 쇄선은 단독 타 고장 조건에서 고장 난 타의 고정된 각도가 -5°인 경우, 붉은색 파선은 0°인 경우, 녹색 점선은 5°인 경우를 가리킨다. 10°/10° 지그재그시험의 경우 좌현 방향으로 운동을 시작하는 경우만을 정리하였다. 타가 고정되어 있는 방향에 따라서 결과에 뚜렷한 차이가 나타나는데, 종립타각인 0°에서 타가 고정되어 있는 경우 첫 번째, 두 번째 과도작동각의 크기와 각각의 정점에 도달하는 시간이 증가하는 형태로 나타난다. 하지만 -5°로 고정된 경우는 정상상태의 결과에 비해 첫 번째 과도작동각은 494%로 매우 크게, 두 번째 과도작동각은 78%로 미미하게 작아지는 형태로 나타났다. 반대로 +5°에 고정된 경우에는 첫 번째 52%로 작게, 두 번째 과도작동각은 549%로 매우 크게 나타났다. 완전하지는 않지만 고정된 타의 방향에 따라 첫 번째, 두 번째 과도작동각과 각각의 정점에 도달하는 시간의 크기 변화가 대체적으로 반대의 경향성을 가진다고 볼 수 있다.

Table 6 Predicted 1st and 2nd overshoot angles of the container ship for the 10°/10° zigzag tests under single rudder failure

Fixed angle of uncontrollable rudder	PREDICTION	
	1st overshoot	2nd overshoot
-5.0 deg	494%	78%
0.0 deg	146%	233%
5.0 deg	52%	549%

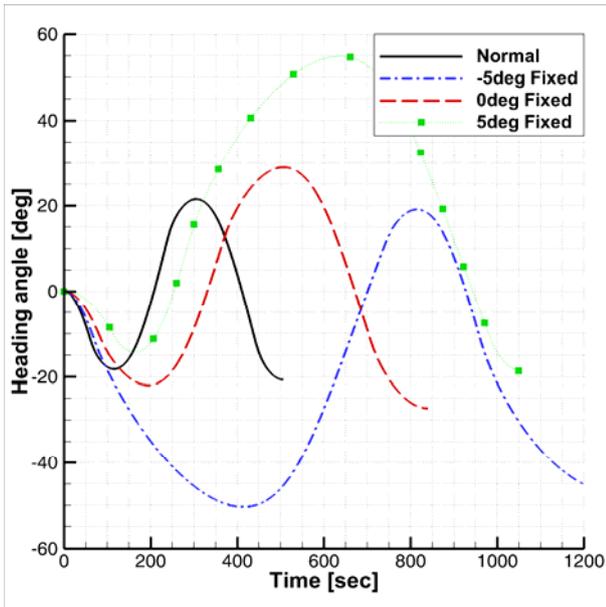


Fig. 11 Time histories of the heading angle of the container ship for the 10°/10° zigzag tests under single rudder failure

Table 7에서는 단독 타 고장 상태에서 좌현방향의 20°/20° 지그재그시험 결과 얻어진 첫 번째 과도작동각과 정상운항 상태에서 얻어진 첫 번째 과도작동각의 상대비율을 정리하였으며, Fig. 12에서는 이때 얻어진 선박의 선수각의 시계열을 도시하고 있다. Fig. 12에서 검은색 실선은 정상운항 상태에서의 결과이며, 파란색 1점 쇄선은 단독 타 고장 조건에서 고장 난 타의 고정된 각도가 -10°인 경우, 붉은색 파선은 0°인 경우, 녹색 점선은 10°인 경우를 가리킨다. 앞선 10°/10° 지그재그시험과 동일하게 좌현 방향으로 운동을 시작하는 경우만을 정리하였다. 첫 번째 과도작동각의 크기와 정점에 도달하는 시간의 크기 변화는 10°/10° 지그재그시험에서 추정된 첫 번째 과도작동각과 동일한 경향성을 보이고 있다.

Table 7 Predicted 1st overshoot angles of the container ship for the 20°/20° zigzag tests under single rudder failure

Fixed angle of uncontrollable rudder	PREDICTION	
	1 st overshoot	
-10.0 deg	268%	
0.0 deg	120%	
10.0 deg	57%	

앞의 단독 타 고장 상태에서 수행된 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험 시뮬레이션을 통해, 단독 타 고장 상태가 변침성능에 직접적인 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 단

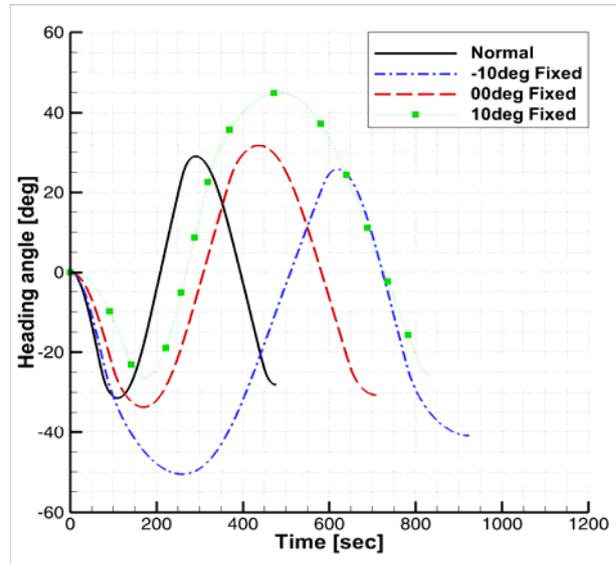


Fig. 12 Time histories of the heading angle of the container ship for the 20°/20° zigzag tests under single rudder failure

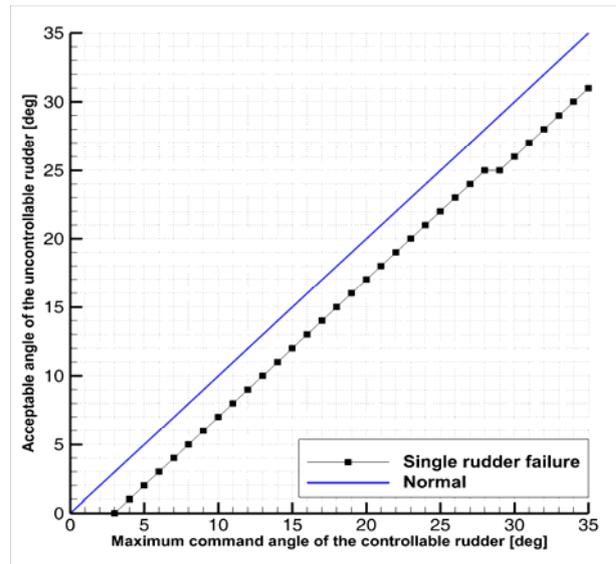


Fig. 13 Acceptable angles of the uncontrollable rudder according to the maximum command angle of the controllable rudder to steer under single rudder failure

독 타 고장상태가 변침성능에 미치는 영향을 보다 구체적으로 확인하기 위하여, 최대 사용 타각이 n°일 때 고정된 각도를 -35°에서 1°씩 증가시켜가면서 n°/n° 지그재그시험을 계산하였다. 그 결과 최대 사용 타각에 따라 조타가 가능한 단독 타 고장상태의 최대 허용 타 고장 각도를 Fig. 13과 같이 찾을 수 있었다. Fig. 13의 가로축은 n°/n° 지그재그시험에서 정상 작동하는 타의 최대 사용각도를 가리키며, 세로축은 지그재그시험이 가능했던 최대 허용 타각을 가리킨다. 즉, 정상 작동하는 타의 최대 사용각도를 기준으로 검은색 사각형이 변침성능을 확보할 수 있는 최대허용타각

이라고 볼 수 있다. 35°/35° 지그재그시험이 가능했던 최대 각도가 31°인 것은 35° 선회시험이 단독 타 고장상태에서 타각의 절대값이 31°이하에서만 좌, 우회 선회가 모두 가능했던 것과 같은 결과임을 알 수 있다. 또한, 최대 사용가능한 타의 각도와 최대허용타각의 크기를 감안하면, 고정된 각도에 비해 최소 3°~4° 이상의 타제어가 가능할 때 자유로운 변침이 가능하다고 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구는 단독 타 고장 상태에서 쌍축 추진 컨테이너선의 조종성능을 수치적으로 계산하고, 그 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 기존의 수학모형을 기반으로 단독 타 고장상태에서 선박의 조종운동을 시뮬레이션을 하였다. 대상 선박의 유체력미계수와 타의 양력계수를 경험식을 통해 추정하였고, 추진기 추력계수 및 선체의 저항 계수는 모형시험 결과로부터 획득하였다. 정상운항 상태에서 IMO 표준 조종시험을 시뮬레이션하고 자유항주 모형시험 결과와 비교함으로써 정상상태에서 수학모형의 타당성을 검증하였으며, 검증된 수학모형을 이용하여 단독 타 고장 상태에서 IMO 표준 조종시험을 포함한 조종운동을 시뮬레이션 하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 두 가지 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 단독 타 고장 상태가 대상선박의 선회성능, 변침성능에 직접적인 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 고정된 타의 방향과 크기에 따라 선회 궤적, 첫 번째, 두 번째 과도작동각과 각각의 정점에 도달하는 시간에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 또한 고정되는 타각의 크기가 커질수록 선회 시 선박의 궤적이 전진방향으로 편향되는 특징도 확인할 수 있었다. 둘째, 대상 선박의 경우 고정된 타가 절대값 31° 이하에서 고정되는 경우에만 좌, 우회로의 선회와 지그재그 조종운동이 가능함을 알 수 있었다. 또한, 만약 고장 난 타가 임의의 각도에서 고정되었을 때, 고정된 각도보다 최소 3°~4° 이상의 타각을 사용할 수 있어야 대상 선박의 자유로운 선회와 조타가 가능하며, 이것이 불가능할 경우 쌍축 추진 선박은 제한적인 선회성능과 변침성능으로 인해 자율운항이 종료되어야 할 것임을 유추할 수 있다.

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.

Hendzik, J., 2013. Evaluating criteria for DP vessels. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 20(4), pp.118-122.

International Maritime Organization (IMO), 2013. *International convention for the safety of life at sea (SOLAS) Ch. V Regulation 26*. Retrieved 6 April 2013.

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, 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.

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.

