

# 선박의 조종특성을 고려한 운항안전성능의 수치화 방법에 관한 연구

유영준<sup>1,†</sup> · 김세원<sup>1</sup> · 김우진<sup>2</sup>  
대우조선해양(주)<sup>1</sup>  
현대중공업(주)<sup>2</sup>

## A Study on Quantifying Sailing Safety Considering Maneuverability of a Vessel

Youngjun You<sup>1,†</sup> · Sewon Kim<sup>1</sup> · Woojin Kim<sup>2</sup>  
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., LTD. (DSME)<sup>1</sup>  
Hyundai heavy industries Co., LTD. (HHI)<sup>2</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.

Recently, ship owners are requiring an assessment of sailing safety of a ship from an analysis considering maneuverability and environmental loads etc. In this paper, we propose a new approach to assess sailing safety by considering the prescribed parameters. The concept of sailing safety is developed from DP capability analysis and is based on the maneuvering simulations. While the ship is continuously disturbed due to irregular environmental loads during the simulations, it is steered to keep its course along the way points assumed along a straight path. After relative distances between four edges of the ship and allowable safety boundaries are calculated for 3 hours, the minimum values are obtained. The minimum distances are marked on a polar chart and we call this a quantified safe operation judgment chart which indicates quantified sailing safety.

**Keywords** : Sailing safety(운항안전), Maneuverability(조종), Environmental loads(환경하중), Minimum relative distance(최소상대거리), Safe operation judgment chart(운항안전판정차트)

## 1. 서론

한국의 대형 조선소에서 건조되는 대부분의 선박은 정해진 항로를 따라 대양에서 항해하는 컨테이너선(container ship), LNG선(LNGC), 유조선(VLCC) 등의 대형 선박이다. 이와 같은 선박은 운항안전성능 측면에서 복잡한 조종운동이 최소화 된 운항 계획을 갖는 것이 일반적이다. 따라서 설계 속도를 기준으로 침로 변경과 선회, 정지 등의 표준적인 조종성능만을 고려하여 선체, 추진기, 타 설계를 수행해 왔다. 일반적으로 선박의 조종성능 평가는 국제해사기구(IMO) MSC.137(76)에서 제시하고 있는 규정(IMO, 2002)을 따른다. 설계속도에서의 초기선회시험(initial turning test), 35° 선회시험(turning test), 10°/10° 지그재그시험(Zigzag test), 20°/20° 지그재그시험을 수행하여 평가된 시험값과 국제해사기구의 규정을 비교함으로써 설계된 선박의 조종성능을 평가한다. 시뮬레이션, 모형시험, 실선 시운전과 같은 방법

을 이용할 수 있는데 (Kim, et al., 2001; 2006; 2009), 모형시험은 통상적으로 초기 설계가 완료된 이후에 가능하고, 실선 시운전은 선박이 인도되기 직전에 수행될 수 있다. 그렇기 때문에, 초기 설계단계에서부터 조종성능 기준의 만족 여부를 검토하기 위하여 주로 시뮬레이션을 이용하여 설계된 선박의 조종성능을 평가해 왔다. 시뮬레이션에 필요한 유체력미계수를 얻기 위하여 다양한 선박의 구속모형시험 결과를 회귀 분석한 경험식을 이용하기도 했으나, 최근 전산유체역학(computational fluid dynamics)을 이용하여 가상의 구속모형시험을 수행하는 방법이 제안되기도 하였다 (Kijima, et al., 1990; Sung & Park, 2015)

조종성능과 직접적으로 연계되는 타 설계 및 조타장치의 용량 결정은 국제해사기구의 기준을 만족할 수 있는 범위 이내에서 경험식 기반으로 수행된다. 대표적으로 국제선급협회(International Association of Classification Societies)에서 타 면적 및 타 토오크를 추정하는 경험식을 제공하고 있다 (IACS, 1990). 최근 타 면적과 조타장치 용량 결정에 선박의 저항, 조종성능, 타 토오크,

환경하중 등을 종합적으로 고려하여, 수치화된 운항안전성능을 기준으로 타 면적을 결정해달라는 요구가 선주로부터 제기되고 있다. 하지만 수행된 표준 조종시험을 규정과 비교하는 것 이외에 운항안전성을 평가할 수 있는 절차가 없어, 경험적인 요소에 의존하여 타 면적을 결정하고 있다. 수에즈 운하와 같은 제한수로를 통과하는 선박의 운항안전성을 고려하여, 타 설계의 적정성을 평가해 달라는 요구가 있기도 하여 기초 연구가 수행되기도 하였다 (You & Kim, 2016).

본 논문에서는 위와 같은 산업적 요구에 대응하기 위한 기초 연구로서, 조종성능과 환경 하중 등을 고려하여 운항안전성능을 수치화된 지표로 표시하는 방안을 개발하고자 했다. 먼저 선박의 조종운동을 모사하기 위하여, 최근 건조 수요가 많은 쌍축 컨테이너선을 대상 선박으로 연구를 수행하였다. 단, 대상 선박의 조종운동을 시뮬레이션하는데 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 컨테이너선의 모형 시험 결과를 이용하였다. 정상상태 조종운동에 대하여 검증된 수학적모형을 기반으로, 바람과 조류 같은 환경하중을 추가적으로 고려하였다. 풍 하중계수는 경험식을 이용하여 추정하였으며, 풍속 스펙트럼을 이용하여 불규칙한 바람을 생성하였다 (Fujiwara, et al., 2001; Anderson & Løvseth, 1992). 보퍼트넘버(beaufort number)를 기준으로 불규칙한 바람이 선체의 운항안전성능에 미치는 영향을 비교하였다. 조류가 없는 조건, 2 knots 조류가 선수/선미 방향에서 입사하는 조건에 대해서 계산결과를 검토하였다. 조종운동방정식에서 선박과 조류의 속도 및 방향을 고려하여, 동유체력을 추정하였다 (Hwang, 1980).

운항안전성능을 평가하기 위한 시뮬레이션에서 대상선박은 가상의 경로점을 따라 직진하는 상황을 가정하였으며, 불규칙한 바람의 영향에 따라 선박의 선수각과 위치가 얼마나 교란되는지를 기준으로 운항안전성능을 평가하고자 하였다. 또한 조류의 작용 방향에 따른 영향을 제한된 조건에서 비교하고자 하였다. 가상의 경로를 기준으로 횡방향으로 ±0.2Nmile만큼을 선박이 운항하는 경계범위로 가정한 뒤, 선체의 최외곽점이 경계선과 이루는 거리를 계산하였다. 불규칙한 바람이 선체에 작용하고 있기 때문에, 선박이 경로점을 따라 직진으로 이동하기 위해서는 조타 행위가 이루어져야 한다. 여기서는 퍼지제어를 이용하였다 (Hasegawa & Kouzuki, 1987). 앞서 언급한 환경하중이 작용하고, 3시간동안 선박이 경로점을 따라 항해할 때, 대상선박의 최외곽점과 경계선이 유지하는 최소 거리를 극좌표계 도표로 작성하였고, 이를 운항안전판정차트(safe operation judgment chart)로 명명하였다. 이 차트를 기준으로 주어진 운항조건에서 선박의 운항안전성능을 수치화하고, 안전한 항해가 가능한지를 판단하고자 하였다. 작성된 차트는 선박의 교란된 선수각 결과와 궤적을 근거로 타당성을 확인하였다.

## 2. 대상 선박 및 조종 운동 방정식

본 연구에서는 대형 컨테이너선을 대상으로 연구를 수행하였

다. Table 1에서는 대상 선박의 선체, 추진기, 타의 주요 제원을 보여주고 있다. 분당회전수(revolution per minute, RPM)는 1분 동안의 추진기 회전수를 가리킨다.

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.

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

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
Design speed [knots]	21.00
Diameter of propellers ( $D_p$ ) [m]	9.60
Pitch at 0.7R [m]	6.70
RPM (PORT/STBD) [-]	67.6
Rudder area [ $m^2$ ]	60.0

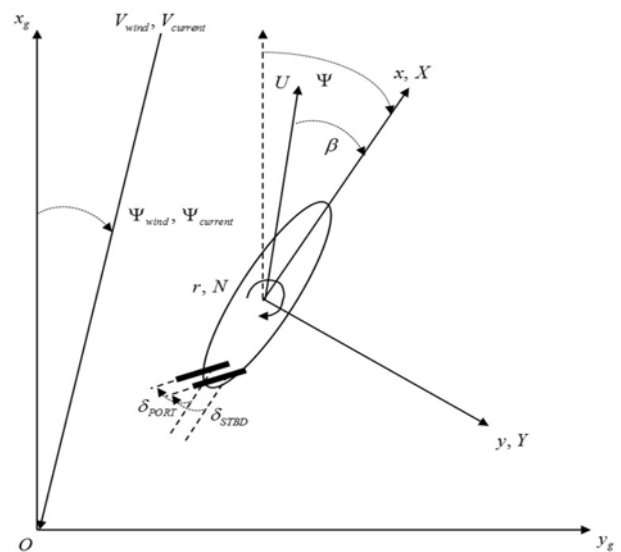


Fig.1 Coordinate system

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 좌표계를 보여주고 있다.  $x_g, y_g$ 는 지구고정좌표계를 의미한다.  $\delta_{PORT}, \delta_{STBD}$ 는 좌현(PORT)과 우현(STBD)에 설치된 타의 타각을 의미한다.  $U$ 는 선박의 속도를 의미한다.  $\psi$ 는 선박의 지구고정좌표계에서의 선수각을 의미하며,  $\beta$ 는 편류각을 의미한다. 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 식 (2)와 같이 정리할 수 있다. 하첨자 H는 선체를 의미하며, P는 추진기, R은 타, W는 바람, C는 조류를 가리킨다. 조류하중은 선체에 작용하는 동유체력을 구할 때 선박과 조류의 속도 및 방향을 고려하여 계산하였다 (Hwang, 1980).  $\psi_{wind}, \psi_{current}$ 는 바람과 조류의 입사각을,  $V_{wind}, V_{current}$ 는 바람과 조류의 속도를 가리킨다.

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

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.  $m_x, m_y$ 는 종방향, 횡방향의 부가질량을 의미한다.  $J_{ZZ}$ 는 부가질량관성모멘트를 가리킨다.  $x_G$ 는 LCG를 가리킨다.  $\rho$ 는 해수의 밀도를 가리키며, '은 무차원화된 값을 의미한다. 식 (3), (4), (5)는 기존 단축 추진 선박의 조종성을 추정하기 위하여 사용되던 경험식을 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 선회궤적 및 지그재그 시계열을 기준으로  $Y_{vrr}', N_{vrr}'$ 을 수정하였다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} Y_H(v', r') &= \frac{1}{2}(\rho L_{PP} T U^2) (Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{vv}' v' |v'| \\ &\quad + Y_{rr}' r' |r'| + Y_{vvr}' v' v' r' + Y_{vrr}' v' r' r') \\ N_H(v', r') &= \frac{1}{2}(\rho L_{PP}^2 T U^2) (N_v' v' + N_r' r' + N_{vv}' v' |v'| \\ &\quad + N_{rr}' r' |r'| + N_{vvr}' v' v' r' + N_{vrr}' v' r' r') \end{aligned} \quad (3)$$

식 (4)에서,  $t$ 은 추력감소계수(thrust reduction coefficient),  $n_{PORT}, n_{STBD}$ 는 각각의 초당회전수(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 좌우동요와 선수 동요가 있는 경우에 대한 유효반류계수를 의미한다.

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

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,

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

식 (5)에서  $F_{N, PORT}, F_{N, STBD}$ 는 각각의 타에서 발생하는 직입력을 가리킨다.  $t_R$ 과  $a_H$ 는 간섭계수를 의미한다. 또한  $x_R$ 은 선체중앙부에서부터 타가 떨어진 종 방향 거리를,  $x_H$ 는 좌우동요에 따른 힘이 작용하는 위치를 의미한다.  $A_R$ 은 타의 면적,  $U_{R, PORT}, U_{R, STBD}$ 는 타에 입사하는 유체의 속도를 가리킨다.  $C_{L, \alpha}$ 은 양력계수의 기울기를 의미하며, 종횡비(aspect ratio)인  $\Lambda$ 를 이용하여 추정하는 경험식을 이용하여 획득하였다 (Fujii, et al., 1961; 1962).  $\alpha_{PORT}, \alpha_{STBD}$ 는 좌현/우현에 설치된 타에 유체가 입사하는 받음각(angle of attack)을 가리킨다.  $\gamma$ 는 정류계수를,  $l_R$ 는 Lever의 길이를 의미하는데, 통상  $2x_R$ 이라고 가정한다.

지금까지 설명한 수학모형을 이용하여 대상선박의 조종운동을 시뮬레이션 하여, 수학모형의 타당성을 검증하였다. 35° 선회시험, 10°/10° 지그재그시험, 20°/20° 지그재그시험의 시뮬레이션 결과와 자유항주 모형시험결과를 비교하였다. Fig. 2는 35° 선회시험에서 선박 궤적을 보여주고 있다. 원은 자유항주 모형시험

시 예측된 선박 궤적을, 실선은 계산된 선박 궤적을 가리킨다. Fig. 3은 10°/10° 지그재그시험과 20°/20° 지그재그시험을 수행하는 동안 선수각의 시계열을 보여주고 있다. 사각형과 원은 자유항주 모형시험 시 예측된 각각의 선수각의 시계열을 가리킨다. 실선과 1점 쇄선은 각각 계산된 선수각의 시계열을 가리킨다. 점선과 파선은 각각 시뮬레이션 시 타각의 시계열을 가리킨다. 계산된 결과가 자유항주 모형시험 결과와 잘 일치할 수 있도록 경험식 적용 및 일부 계수의 수정이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

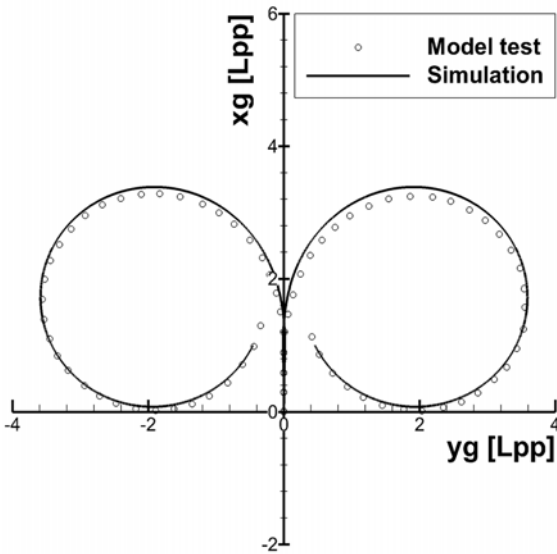


Fig. 2 Trajectories for 35° turning tests of the container ship

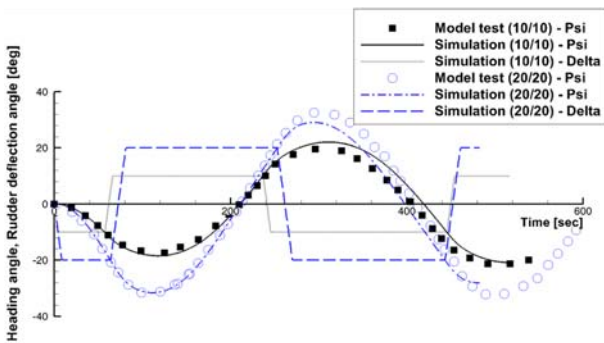


Fig. 3 Time histories of heading angle for 10°/10° zigzag tests and 20°/20° zigzag tests to port side of the container ship

본 연구에서 고려하는 환경하중은 두 가지인데, 바람과 조류이다. 바람은 풍속 스펙트럼으로부터 불규칙한 속도를 갖는 환경하중으로 고려된다. 따라서 조종운동이 계산되는 동안 선체의 직선운동을 교란하는 환경 요소로 고려되었다.

식 (6)에서는 지구고정좌표계 기준으로 입력된 바람의 속도와 방향을 선체에 입사하는 상대속도 및 상대선수각으로 정의하는 수식을 보여주고 있다.  $u_{rwind}$ 는 종방향 상대속도이고,  $v_{rwind}$ 는 횡방향 상대속도를 가리킨다.  $v_{rwind}$ 는 선체에 입사되

는 상대속도를 가리키며,  $\Psi_{rwind}$ 는 선체에 입사되는 상대선수각을 의미한다.

$$\begin{aligned} u_{rwind} &= V_{wind} \cos(\psi_{wind} - \psi) + u & (6) \\ v_{rwind} &= V_{wind} \sin(\psi_{wind} - \psi) + v \\ V_{rwind} &= \sqrt{(u_{rwind})^2 + (v_{rwind})^2} \\ \psi_{rwind} &= \tan^{-1}(v_{rwind}/u_{rwind}) \end{aligned}$$

식 (7)에서  $C_X, C_Y, C_N$ 은 선박의 X, Y, N방향 풍하중계수를 가리킨다.  $A_L$ 는 선박의 수선면 위쪽의 종방향 투영면적을 가리키며,  $A_T$ 는 횡방향 투영면적을 가리킨다.  $\rho_{air}$ 는 공기의 밀도를 가리키며,  $L_{OA}$ 는 선박의 전체길이를 가리킨다.

$$\begin{aligned} X_W &= C_X \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_L \cdot V_{rwind}^2 & (7) \\ Y_W &= C_Y \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_T \cdot V_{rwind}^2 \\ N_W &= C_N \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_T \cdot L_{OA} \cdot V_{rwind}^2 \end{aligned}$$

불규칙한 바람의 속도를 생성하기 위하여, 기존 연구의 풍속 스펙트럼을 이용하였다 (Anderson, et al., 1992). 식 (8)에서  $U_0$ 는 기준이 되는 풍속을 의미하며,  $z$ 는 바람의 기준 높이를 가리키는데 10 m로 가정하였다. 보퍼트넘버 3과 6을 기준으로 풍 하중을 고려하고자 하였는데, 각각 평균 풍속이 8.5 knots와 23.5 knots이다. 식 (8)을 기준으로 두 속도 조건에 대해서 생성된 스펙트럼을 Fig.4에서 보여주고 있다. 실선은 풍속 8.5 knots 조건의 스펙트럼을, 1점 쇄선은 풍속 23.5 knots 조건의 스펙트럼을 가리킨다. 각각의 스펙트럼을 적분하여, 푸리에변환을 거쳐 Fig.5와 같이 불규칙한 바람이 생성될 수 있다. 3시간동안 생성된 바람의 속도를 가리키는데, 각각 풍속 8.5 knots 조건과 23.5 knots 조건에서 생성된 바람의 속도를 가리킨다. 평균풍속을 기준으로 불규칙하게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

식 (7)에서 선체에 작용하는 풍하중을 계산하기 위해서는, 선박의 X, Y, N방향 풍하중계수를 알아야 한다. 경험식을 이용하여 풍하중 계수를 추정하였는데, 기존 경험식의 추정에 필요한 입력값을 Table 2에서 정리하였다 (Fujiwara, et al., 2001). Fig.6에서는 추정된  $C_X, C_Y, C_N$ 를 보여주는데, 실선은  $C_X$ 를, 1점 쇄선은  $C_Y$ , 점선은  $10 \times C_N$ 을 가리킨다. 조류는 식 (2)과 같은 형태로, 선체에 작용하는 동유체력을 계산할 때 상대속도의 개념으로 고려한다 (Hwang, 1980).

$$S_U(f) = 320 \frac{\left(\frac{U_0}{10}\right)^2 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.45}}{\left(1 + \tilde{f}^n\right)^{\frac{5}{3n}}} & (8)$$

여기서,

$$\tilde{f}^n = 172 \left(\frac{z}{10}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{U_0}{10}\right)^{-0.75}$$

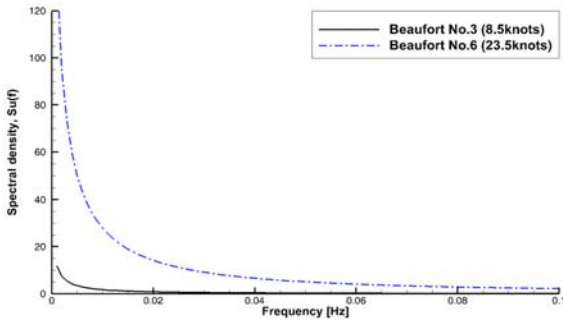


Fig. 4 Spectral density under Beaufort number 3 and 6

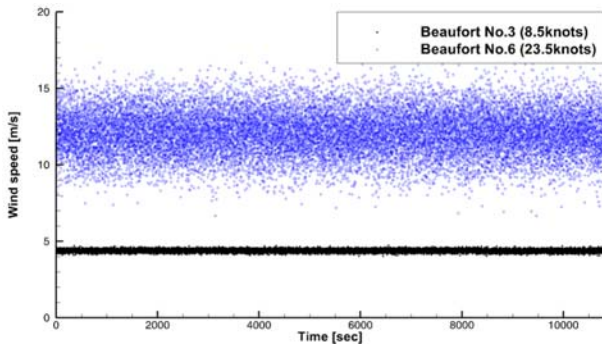


Fig. 5 Generated irregular wind speed under Beaufort number 3 and 6

Table 2 Inputs of the large container ship to predict wind loads

Item	Container ship	
	8.5	23.5
Conditions of wind speed [knots]	8.5	23.5
HBR [m]	43.0	
C [m]	9.75	
HC [m]	24.7	
AOD [ $m^2$ ]	11445	
CBR [m]	14.75	
Front area ( $A_T$ ) [ $m^2$ ]	17338.4	
Side area ( $A_L$ ) [ $m^2$ ]	3114.4	

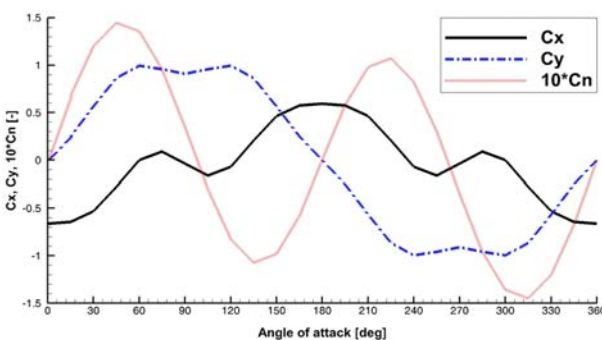


Fig. 6 Wind load coefficients obtained from the empirical formulae

식 (9)에서는 조류가 선체에 입사되는 상대속도를 가리키고 있다. 이 속도를 기준으로 선체에 작용하는 동유체력을 계산하였다.  $v_{current}$ 는 종방향의 상대속도를,  $v_{rcurrent}$ 는 횡방향의 상대속도를 가리킨다.

$$u_{rcurrent} = V_{current} \cos(\psi_{current} - \psi) + u \quad (9)$$

$$v_{rcurrent} = V_{current} \sin(\psi_{current} - \psi) + v$$

대상선박이 경로점을 따라 직선운동을 하기 위하여, 퍼지제어를 적용하였다. 퍼지제어는 PD제어기의 한 종류로, P계인과 D계인을 선박의 명령치로와 현재치로의 차이, 선회각속도를 조합하여 경험적으로 명령타각을 결정하는 방법이다. PD제어기의 계인에 따라 선박의 조종운동 결과에 큰 차이가 있을 수 있는데, 운항자의 제어 습관을 기반으로 명령타각을 결정하는 퍼지제어를 적용함으로써 실제 운항환경을 고려하고자 하였다. 충돌회피 과정에서 선박의 운항계획을 수립하는데 퍼지제어를 적용하기도 하였다 (You & Rhee, 2016).

### 3. 운항안전성능 평가를 위한 시뮬레이션

시추 및 설치를 위해 건조되는 해양구조물의 경우 다양한 환경조건에서도 운용이 가능하도록 자동위치유지장치(dynamic positioning system)를 탑재하는 경우가 있다. 조선소에서는 각각의 해양구조물이 자동위치유지장치를 탑재했을 때, 작업이 가능한 조건을 극좌표계로 표시하는 자동위치유지성능차트(DP capability chart)를 작성한다 (Hendzik, 2013). 작성결과를 기준으로 안전한 운용조건을 검토하며, 쓰러스터의 용량산정이나 운용 기준을 작성하게 된다. 본 연구에서는 위치를 유지하는 해양구조물의 기능적인 목표와 자동항해장치를 이용하여 계획된 경로를 따라가는 선박의 기능적인 특징의 유사점에서부터 운항안전성능의 수치화를 접근하였다. 다만, 자동위치유지성능차트가 보통 환경하중의 방향에 따라 자동위치유지가 가능한 최대 풍속을 가리키는 것과 달리, 운항안전판정차트는 주어진 운항 조건에서 운항안전성능을 수치화 하여 선체 최외곽점과 경계선의 최소 상대거리를 표시한다는 점이 다르다.

Fig. 7은 본 연구에서 운항안전성능을 수치화하기 위하여 수행한 계산의 순서도를 보여주고 있다. 먼저, 시뮬레이션을 수행하기 위하여 선박이 추종해야하는 경로점을 가정하였는데, Fig.8에서 보는 것처럼 대상선박의 현재속도를 기준으로 1분간 이동할 수 있는 거리만큼의 간격으로 직선상에 경로점이 생성되었다. 경로점의 간격은 선박의 안전한 항해를 위해 충돌 상황에서 회피계획을 작성했던 이전의 연구 결과를 참고하였다 (You & Kim, 2016). 선박이 운항하는 환경조건을 결정하게 되는데, 바람의 속도와 방향, 조류의 속도와 방향 등이 결정된다. 불규칙한 바람의 영향에 따라 선박의 선수각과 위치가 얼마나 교란되는지를 기준으로 운항안전성능을 평가하고자 하였다. 조류는 작용 방향에 따른 영향을 제한된 조건에서 비교하고자 하였다.



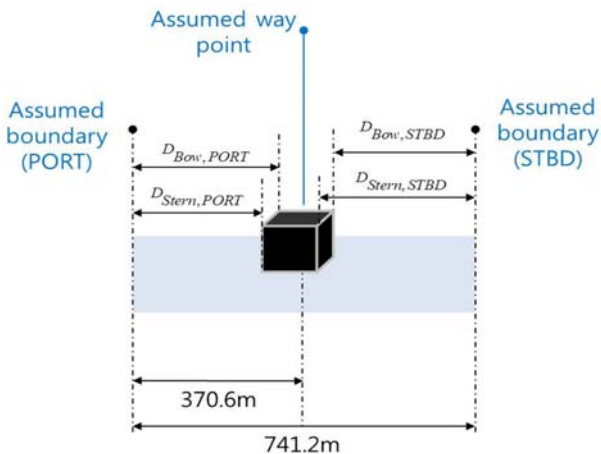


Fig. 9 Concept of four relative distances between ship and boundaries

대상선박이 설계속도인 20.6 knots로 운항하며, 보퍼트넘버 6의 풍 하중이 작용할 때, Fig.10과 같이 선박의 운항안전판정차트를 작성하였다. 실선, 1점 쇄선, 시각형을 갖는 2점 쇄선, 원을 갖는 긴 파선은 각각 선수 우현, 선미 우현, 선수 좌현, 선미 좌현의 최외곽점이 경계선과 이루는 상대거리를 가리킨다. 다이아몬드를 갖는 짧은 파선은 앞서 최외곽점이 가질 수 있는 허용 오차 0.2 Nmile의 2배인 741.2 m를 가리킨다. 예를 들어 선박이 두 경계선의 내부를 좌현방향으로 완전하게 이탈했다고 가정하면, 우현방향 모서리가 우현 쪽 경계선과 이루는 거리는 741.2 m 보다 크게 계산된다. 따라서 이 값은 특정 모서리가 반대편 경계선을 완전하게 이탈했는지 여부를 알 수 있게 해 준다.

선수/선미 방향을 기준으로 좌우 대칭한 형태를 보이고 있다. 선수 및 선미방향에서 바람이 입사하는 경우 좌우방향으로의 교란없이 이상적으로 직진하며, 341.1 m의 상대거리를 유지하고 있다. 반면, 바람이 우현방향에서 입사하는 경우는 선박이 좌측으로 밀린 상태에서 직진을 하기 때문에, 상대적으로 우현의 선수/선미 모서리가 우현방향 경계선과 이루는 최소 상대거리가 커지고, 좌현의 선수/선미 모서리가 좌현방향 경계선과 이루는 최소 상대거리는 작아진다. 좌현의 선수/선미 모서리의 최소상대거리와 우현의 선수/선미 최소상대거리가 각각 거의 동일하게 계산되었는데, 이는 퍼지제어에서 경로점과 선수각의 차이, 선수각속도를 이용하여 제어를 했기 때문에 선박의 선수각이 매우 작은 표류각을 가지고, 직진하고 있기 때문으로 생각된다. Fig. 10에서 계산된 네 모서리는 모든 바람의 입사방향에 대해 0 m보다 큰 값을 보이고 있어, 경로점으로부터 허용된 경계선 이내에서 직진운항이 가능했음을 알 수 있다. 우현방향 모서리의 경우 60°에서 입사하는 바람에 대해 가장 작게 나타났고, 좌현방향 모서리의 경우 300°에서 입사하는 바람에 대해 가장 작게 나타났다. 좌현방향 모서리가 가장 작은 값을 가질 때, 우현방향 모서리는 가장 큰 값을 나타냈다.

Fig. 10에서 운항안전판정차트가 얻어지는 동안의 선박의 중심의 이동궤적과 선수각의 시계열을 각각 Fig.11, Fig.12에서 보

여주고 있다. 각각의 선이 가리키는 값은 바람의 입사 방향을 가리키며, 각 그림에 범례로 작성해 두었다. 다만, Fig. 11에서 짧은 파선은 허용된 경계선을 가리키며, 가상의 경로를 기준으로 횡방향으로 ±0.2 Nmile에 표시되어 있다. Fig. 10에서 얻어진 차트의 형상 특징을 설명했던 것처럼, 우현방향에서 바람이 입사하는 경우 좌현방향으로 치우쳐 직진운항을 하고 있으며, 좌현방향에서 바람이 입사하는 경우 우현방향으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 선수각 또한 바람의 방향에 따라 다르게 나타나는데, 바람의 입사 방향으로 1° 이내의 표류각을 가진 상태로 보인다.

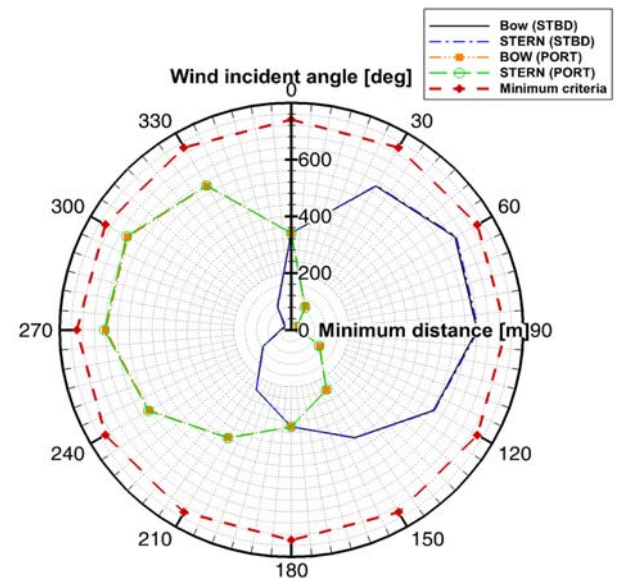


Fig. 10 Safe operation judgment chart of the ship with service speed under 23.5 knots wind and no current

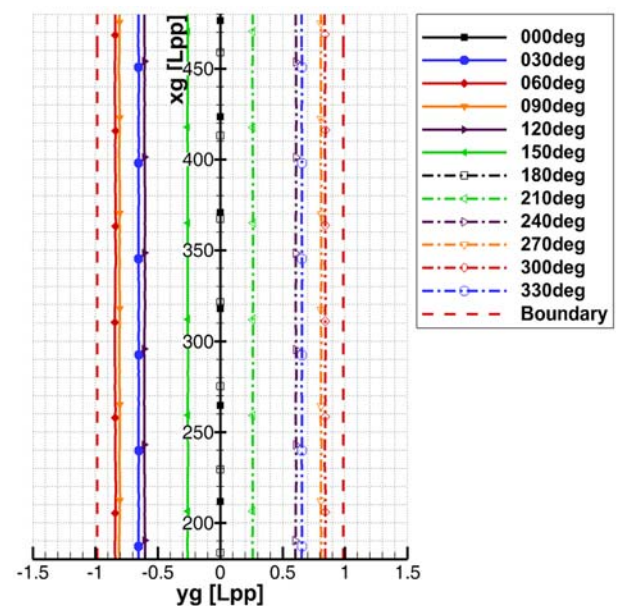


Fig. 11 Trajectories of the ship with service speed under 23.5 knots wind and no current

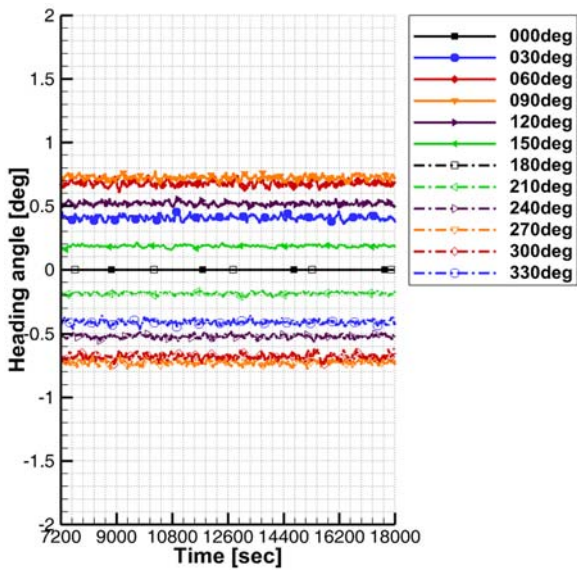


Fig. 12 Time histories of heading angles of the ship with service speed under 23.5 knots wind and no current

#### 4. 운항 조건에 따른 운항안전성능 평가 결과 및 비교

앞서 제안된 운항안전판정차트를 몇 가지 운항조건에 대해 추가적으로 작성한 뒤, 추정된 결과를 비교 분석하고자 하였다. Table 3는 본 연구에서 검토한 운항 조건을 보여주고 있다. 먼저, 선속은 설계속도인 20.6 knots를 기준으로, 보퍼트넘버 3, 6의 대표 속도에 해당되는 23.5, 8.5 knots의 바람에 대해서 운항 안전을 평가하고 그 결과를 검토하고자 했다. 조류는 2.0 knots를 기준으로, 선수/선미 방향에서 입사하는 경우와 조류가 없는 경우로 나누어 비교하였다. 모두 4개의 시험조건에 대해서 비교 계산을 수행하였다. 2번 조건의 경우 운항안전판정차트를 작성하기 위해 기본적으로 Fig. 10에서 작성한 조건이었기 때문에, 1, 3, 4번 조건에 대한 평가 결과를 2번 결과와 비교분석하였다.

Table 3 Simulation matrix considering speed, wind, and current

No.	Speed [knots]	Wind speed [knots]	Current speed [knots]
1	20.6	23.5	2.0
2			0.0
3		8.5	2.0
4			0.0

Fig. 13은 4번 조건에 대해 계산이 수행되었으며, Fig.10보다 낮은 보퍼트넘버 3을 기준으로 운항안전판정차트가 작성된 것이다. Fig. 10에서는 60°, 300°에서 바람이 입사할 때 각각 우현방향과 좌현방향의 모서리가 가장 작은 값을 보였는데, 풍속이 낮

아진 Fig. 13에서도 동일한 경향성을 보였다. 다만, 최소 상대거리가 보퍼트넘버 6에서는 21.09 m 였던 것과 달리, 223.96 m로 증가하였다. 선박이 이상적으로 경로점 위에서 직진운항을 하는 경우, 네 모서리의 최소 상대거리는 341.1 m가 된다. 보퍼트넘버 6의 최소상대거리보다 보퍼트넘버 3의 최소상대거리가 341.1 m에 가까워졌기 때문에, 선박이 환경하중에 의해 더 작게 교란되었음을 의미한다. 즉, 선체에 입사하는 바람의 속도가 낮아지면서 선체가 더 적게 교란된 상태로 직진운동을 한 것이다.

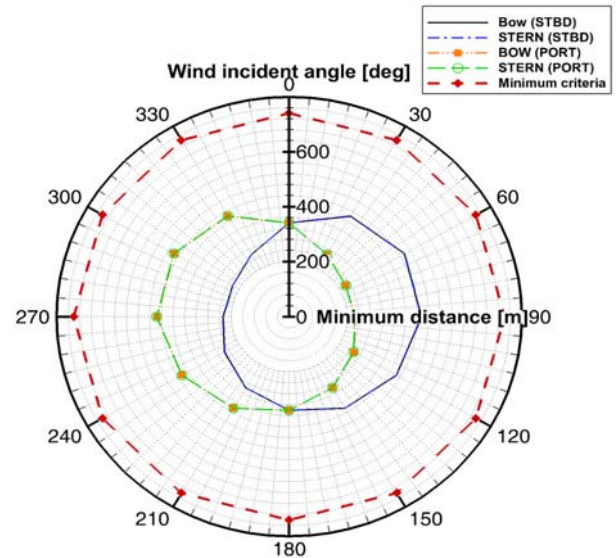


Fig. 13 Safe operation judgment chart of the ship with service speed under 8.5 knots wind and no current

Figs. 10, 11에서 선박 중심의 이동궤적과 선수각의 시계열을 보여준 것처럼, Fig. 14, Fig. 15에서 4번 조건에서 계산된 선박 중심의 이동 궤적과 선수각의 시계열을 각각 보여주고 있다. 선박의 이동 궤적 역시 경로점에서 횡방향으로 0.3 Lpp 이내에서 계산되었으며, 선수각은 0.3° 이내로 매우 작게 나타났다.

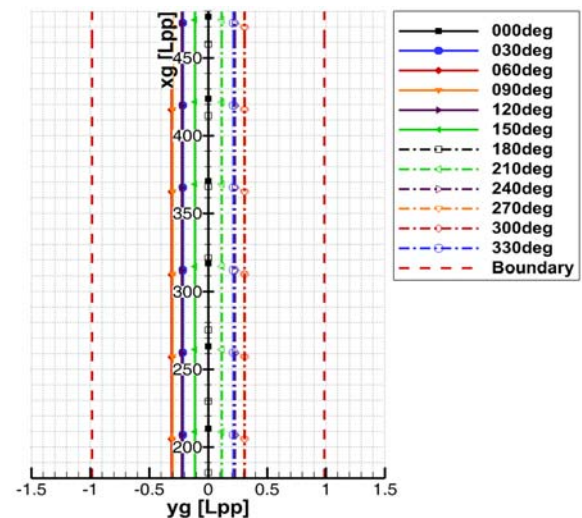


Fig. 14 Trajectories of the ship with service speed under 8.5 knots wind and no current



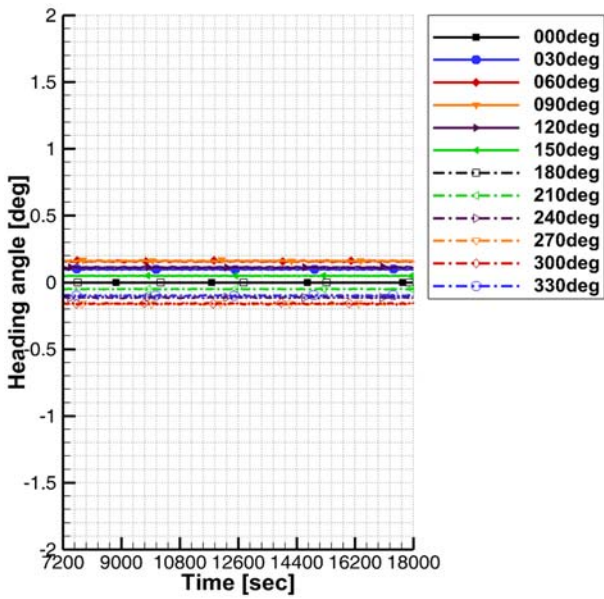


Fig. 15 Time histories of heading angles of the ship with service speed under 8.5 knots wind and no current

Fig. 16은 1번 조건에 대해 계산이 수행되었으며, 앞의 Fig.10과 동일한 보퍼트넘버 6을 기준으로 운항안전판정차트를 작성하되, 선수방향에서 2.0 knots로 입사하는 조류를 고려한 것이다. Fig.16에서도 60°, 300°에서 바람이 입사할 때 각각 우현방향과 좌현방향의 모서리가 가장 작은 값을 보였는데, 최소 상대거리가 2번 조건에 비해 91.15 m 로 증가했다. 이는 조류가 입사함에 따라 선체에 도달하는 유동의 상대속도가 빨라졌고, 타에 입사하는 유동 속도가 커졌기 때문에 타력이 증가하여 선박이 더 작게 교란된 상태에서 조종운동을 했기 때문이라고 추정된다.

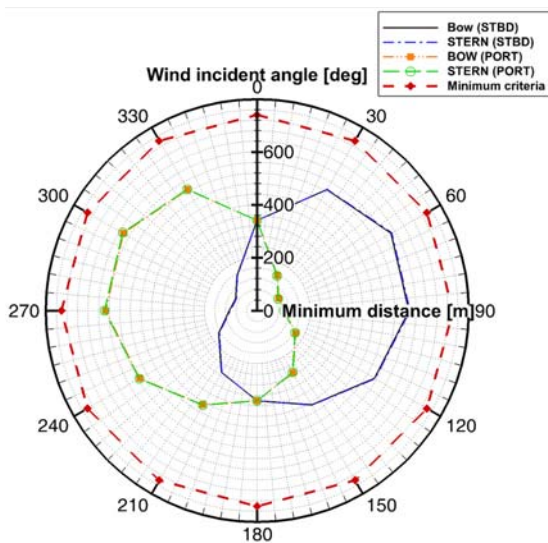


Fig. 16 Safe operation judgment chart of the ship with service speed under 23.5 knots wind and 2.0 knots current from 0°

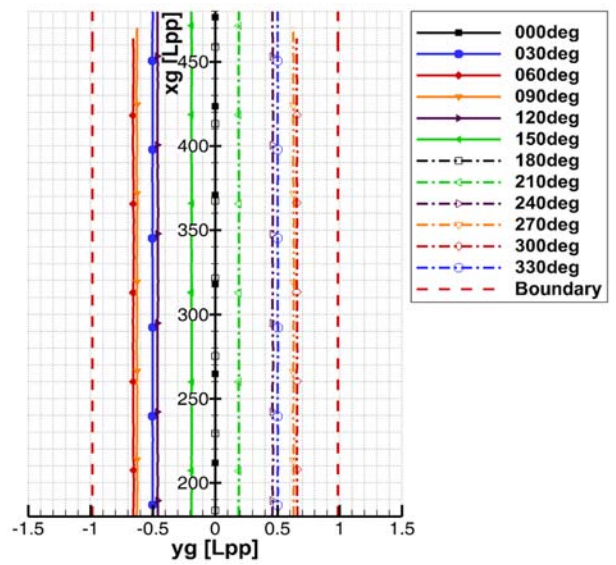


Fig. 17 Trajectories of the ship with service speed under 23.5 knots wind and 2.0 knots current from 0°

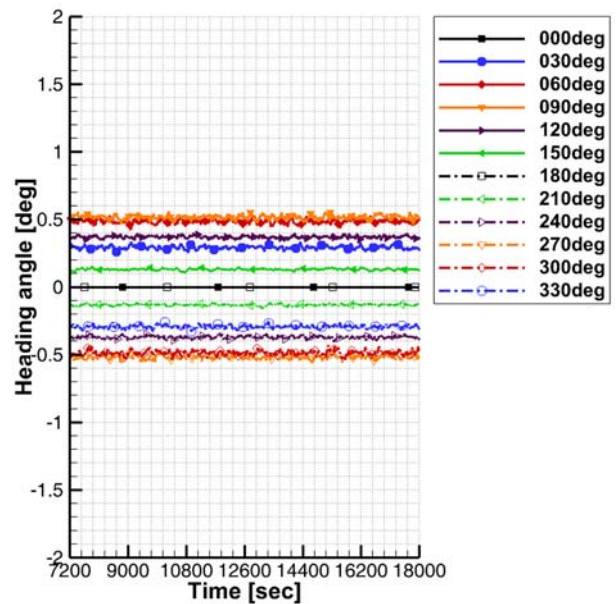


Fig. 18 Time histories of heading angles of the ship with service speed 23.5 knots wind and 2.0 knots current from 0°

Fig. 17, Fig. 18에서 1번 조건에서 계산된 선박 중심의 이동 궤적과 선수각의 시계열을 각각 보여주고 있다. 선박의 이동 궤적 역시 경로점에서 횡방향으로 0.7 Lpp 이내에서 계산되었으며, 선수각은 0.5° 정도로 나타났다. 운항안전성능 관점에서는 선수방향에서 입사하는 조류가 도움이 된다고 생각할 수 있다.

Fig.19는 3번 조건에 대해 계산이 수행되었으며, Fig.10과 동일한 보퍼트넘버 6을 기준으로 운항안전판정차트를 작성하되, 선미방향에서 2 knots로 입사하는 조류를 고려한 것이다. Fig.19에서는 60°, 90°, 270°, 300°의 경우에는 선박의 일부 혹은 전체가

경계선을 벗어난 것으로 나타났다. 입사각이 30°, 330°인 경우에도 최소 상대거리가 1.02 m로 경계선에 거의 도달한 값을 보이고 있다. 조류가 선미방향에서 입사함에 따라 선체에 도달하는 유동의 상대속도가 느려졌고, 타에 입사하는 유동 속도가 작아져 타력이 감소하여 선박이 더 크게 교란된 상태에서 조종운동을 했기 때문이라고 추정된다.

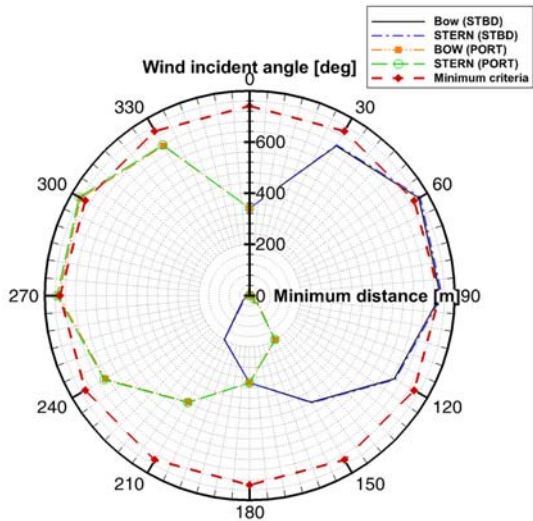


Fig. 19 Safe operation judgment chart of the ship with service speed under 23.5 knots wind and 2.0 knots current from 180°

Fig. 20, Fig. 21에서 3번 조건에서 계산된 선박 중심의 이동 궤적과 선수각의 시계열을 각각 보여주고 있다. 선박 중심의 이동 궤적이 경계점 밖으로 이탈했음을 확인할 수 있으며, 선수각 또한 1.0° 정도로 네 가지 계산 조건 중 가장 크게 나타났다. 운항안전성능 관점에서는 선미방향에서 입사하는 조류가 불리하다고 생각할 수 있다.

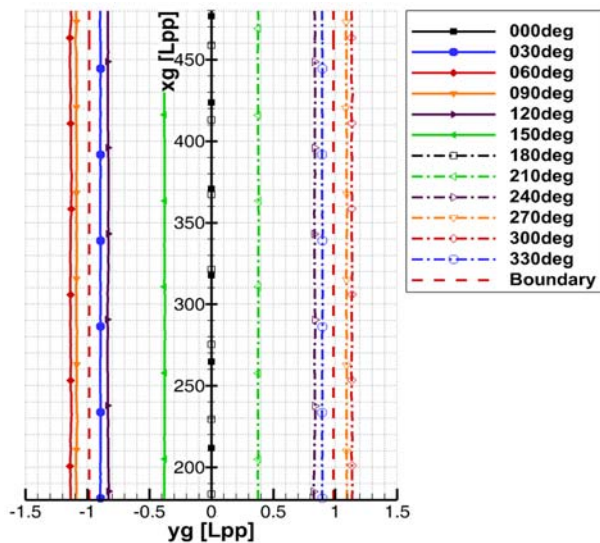


Fig. 20 Trajectories of the ship with service speed under 23.5 knots wind and 2.0 knots current from 180°

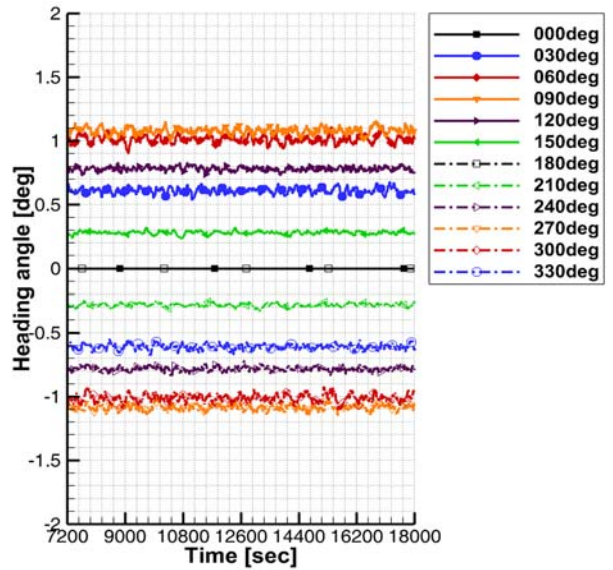


Fig. 21 Time histories of heading angles of the ship with service speed 23.5 knots wind and 2.0 knots current from 180°

Fig. 22는 23.5 knots로 불어오는 바람이 정면에서 입사하는 동일한 조건에서, 조류가 없는 조건, 0°에서 입사되는 조건, 180°에서 입사되는 조건에 대해서 선박의 속도, 타에 입사되는 유속, 분당회전수의 시계열 결과를 도시한 것이다. 각각의 선의 의미는 범례에 정리해 두었는데, U는 선박의 속도, UR은 타에 입사되는 유동의 속도, RPM은 분당회전수를 가리킨다. 앞서 설명한 것처럼 초기 2시간의 계산을 제외한 이후 3시간동안의 계산 결과를 기준으로 분석하였다. 초기 천이구간을 제외했기 때문에, 선박의 속도, 타에 입사되는 유동의 속도, 분당회전수 등이 큰 차이 없이 안정적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

앞에서 설명한 것처럼, 선박의 설계 속도를 유지하기 위하여 분당회전수를 조절하기 때문에, 세 가지 조건에서 모두 선박의 속도는 설계속도인 20.6 knots로 유지되고 있음을 알 수 있다. 분당회전수의 크기와 타에 입사되는 유동의 속도의 크기는 2knots의 조류가 0°에서 입사되는 경우, 조류가 없는 경우, 2knots의 조류가 180°에서 입사되는 경우 순서로 나타났다. 선수방향에서 입사되는 조류는 선박에 부가적인 저항으로 작용하여 운항속도를 감소시키기 때문에, 설계속도를 유지하기 위해서는 더 큰 추력이 필요하다. 따라서 분당회전수가 증가되었고, 그로 인해 타에 입사되는 유동의 속도가 증가되었다. 반대로 선미방향에서 입사되는 조류는 선박의 운항속도를 증가시키는 방향으로 작용되기 때문에, 분당회전수가 감소되고, 타에 입사되는 유속이 감소하였다.

이 결과는 조류의 입사방향에 따라 선박의 교란이 더 크고, 작았음을 추정했던 것과 연계해서 살펴볼 수 있다. 즉, 선수방향에서 조류가 입사하는 경우 타에 입사되는 유속이 증가하여 동일 타각에서 더 큰 힘으로 선박의 제어가 가능하다. 이러한 제어의 용이성은, 선박이 경로점을 따라 이동하는 조종운동에 있어서 더 작은 범위만으로 직진 하는 것을 가능하게 하여, 선체의 최외곽

점과 안전영역의 경계와 최소상대거리가 작게 추정되었다고 생각할 수 있다.

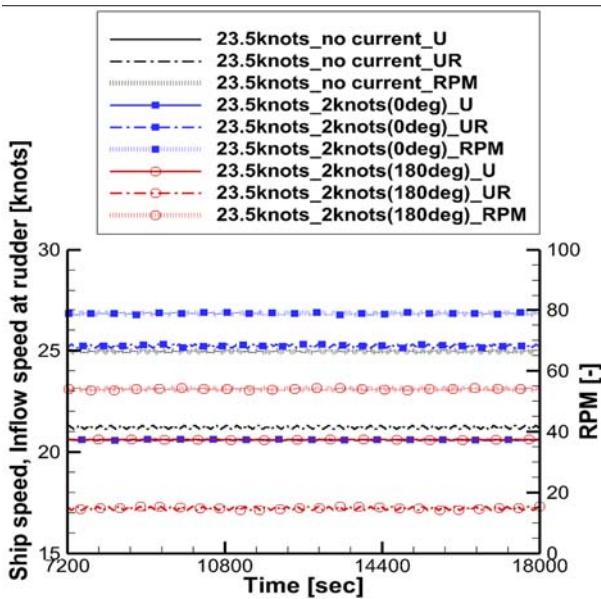


Fig. 22 Time histories of the ship with service speed under 23.5 knots wind from 0° and no current, 2.0 knots current from 0°, and 2.0 knots current from 180°

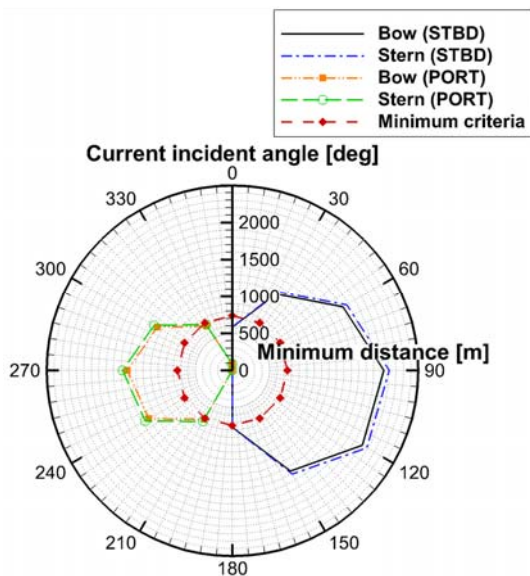


Fig. 23 Safe operation judgment chart of the ship with service speed under 23.5 knots wind from 60° and 2.0 knots current

Fig. 23은 23.5 knots 바람의 방향을 60°로 고정한 상태에서, 조류의 방향을 바꾸어가며 따라서 운항안전판정차트를 작성한 것이다. 각 선의 의미는 이전과 동일하다. 이 경우 조류가 0°와 180°에서 입사되는 조건을 제외한 모든 경우에 선박의 위치가 가성의 안전운항 경계를 벗어남을 알 수 있다. 앞에서 계산한 조

건에서는 조류가 없는 조건이거나 조류가 0°, 180°에서 입사되는 조건이었기 때문에 운항안전판정차트라 좌/우현의 최외곽점의 상대거리 차트가 대칭적으로 작성되었다. 하지만 Fig.23에서는 바람이 60°에서 입사되고 있기 때문에, 우현방향에서 입사되는 조류에 의해 선박이 좌현방향으로 밀려갔을 때 추정된 상대거리의 크기가 좌현방향에서 입사되는 조류에 의해 선박이 우현방향으로 밀려갔을 때 추정된 상대거리의 크기에 비해 크게 계산되었음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 타 면적을 수치화된 운항안전성능 지표를 기반으로 결정하기 위한 산업적 요구에 대응하기 위한 기초연구로서, 대상선박의 조종성능과 환경 하중 등을 고려하여 운항안전성능을 수치화된 지표로 표시하는 방안을 개발하고자 했다. 다음과 같은 두 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 조종시뮬레이션 결과를 분석하여 운항안전성능을 수치화하고, 이를 환경하중의 작용방향에 따라 극좌표계로 표시하는 운항안전판정차트의 개념을 제안하였다. 자동위치유지장치와 자동항해장치가 갖는 기능적인 유사점을 기준으로 성능지표를 수치화하고자 했다. 또한 추정된 성능지표를 선박의 궤적과 선수각의 시계열을 근거로 물리적으로 예상할 수 있는 결과임을 확인하였다.

둘째, 바람과 조류 하중을 고려하여 운항안전판정차트를 비교하였다. 바람의 속도가 낮을 경우 운항안전성능이 향상됨을 알 수 있었고, 선수에서 입사하는 조류의 경우 운항안전성능 관점에서 유리하며, 선미방향에서 입사하는 조류의 경우 운항안전성능에 불리함을 수치적으로 확인하였다.

본 연구는 조종운동방정식의 수학적모형을 기준으로 운항안전성능을 수치화하였기 때문에, 추후 조종운동방정식에서 수학적으로 고려할 수 있는 다양한 인자들이 운항안전성능에 미치는 영향을 평가하는데 적용될 수 있다고 생각된다.

## References

Andersen, O.J. & Løvseth, J., 1992. *The maritime turbulent wind field. measurements and models. Final report for task 4 of the staoil joint industry project.* Trondheim: Norwegian Institute of Science and Technology.

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.

Fujiwara, T. Ueno, M. & Nimura, T., 2001. An

- estimation method of wind forces and moments acting on ships. *Mini Symposium on Prediction of Ship Manoeuvring Performance*, Tokyo, Japan, 18 October 2001, pp.83-92.
- 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.
- Henzik, J., 2013. Evaluating criteria for DP vessels. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 20(4), pp.118-122.
- Hwang, W., 1980. *Application of system identification to ship maneuvering*. Ph.D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- International Association of Classification Societies (IACS), 1990. Requirements concerning STRENGTH OF SHIPS – S10 Rudders, Sole piece and rudder horns. London, UK: International Association of Classification Societies.
- 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, H.S. Park, G.I. & HA, M.G., 2001. Computerized measurement system of ship speed and maneuvering performance in sea trial. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), pp.54-61.
- 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.
- Sung, Y.J. & Park, S.H., 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.
- You, Y. & Kim, W., 2016. A simplified maneuvering performance of a large container ship passing through the suex canal. *4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction (MASHCON)*, Hamburg, Germany, 23-25 May 2016, pp.43-49
- You, Y. & Rhee, K.P., 2016. Development of the collision ratio to infer the time at which to begin a collision avoidance of a ship. *Applied Ocean Research*, 60, pp.164-175.

