

AIS 데이터에 기반한 LNGC의 운항 성능 추정 시뮬레이션 연구

유영준^{1,†} · 김재한² · 서민국³
대우조선해양(주)¹
삼성디스플레이(주)²
선박해양플랜트연구소³

A Study on the Prediction of Sailing Performance for a LNGC based on the AIS Data

Youngjun You^{1,†} · Jaehan Kim² · Min-Guk Seo³
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., LTD. (DSME)¹
Samsung Display²
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO)³

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 order to predict the sailing performance of a LNGC during actual operation, it is necessary to consider not only the information about resistance, maneuverability etc, but also the information such as sea route and sailing scenario etc., comprehensively. In this paper, we propose a new approach to conduct the sailing simulation of a LNGC without full scale measurement data. Latitude, longitude, sea route, speed over ground, time in UTC obtained from AIS data are substituted for the measured data. By combining the model test results, design information, and AIS data, prediction of sailing performance is conducted from the coast of southern Taiwan to the coast of Madagascar. The simulation is verified by comparing the calculated time histories of RPM and power with those of measured RPM and power.

Keywords : Sailing performance(운항성능), Resistance(저항), Maneuverability(조종성능), AIS(선박자동식별장치), RPM(분당회전수), Power(동력)

1. 서론

최근 에너지효율지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI), 에너지효율지표(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI), 에너지효율관리계획(Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP)의 적용에 관한 논의가 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)를 중심으로 이루어지고 있다 (Jung, 2011). 또한, 선박의 시운전 단계에서 환경하중의 영향이 없는 이상적인 운항조건을 기준으로 추정되었던 속도 시운전과 관련하여 바람, 파도, 조류, 수심 등의 환경 조건을 고려할 수 있도록 국제 표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)의 규정이 갱신되기도 하였다 (ISO, 2015). 이와 같은 IMO와 ISO의 움직임은 실제 운항조건을 전제로 선박의 성능을 평가하

는 규정과 절차를 정비함으로써, 실제 운항 시 예상되는 선박의 성능을 객관적인 절차에 의해 추정하겠다는 목적이 있다.

이와 같은 규정의 변화에 대응하기 위하여, 각 연구기관들에서도 실제 운항성능의 추정, 예측, 분석을 시도하는 연구가 수행되고 있다. 전통적으로 선박의 조종성능분야에서는 국제해사기구에서 제시한 표준조종시험의 시뮬레이션, 모형시험, 시운전을 통해 단편적인 성능지표만을 비교하는 연구가 수행되어 왔으며 (IMO, 2002; Kim, et al., 2001; Kim, et al., 2011), 실선 운항 관점에서 바람, 조류, 파도 등의 환경하중이 선박의 조종운동에 미치는 영향을 고려하려는 연구가 최근까지 수행된 바 있다 (Yoon & Rhee, 2001; Seo, et al., 2011; You, et al., 2017). 추진기 설계 분야에서는 실선 운항 시 추진기 성능의 변화를 예측하고, 분석하는 연구가 수행되기도 하였다 (Song, et al., 2005; Choi, et al., 2011).

앞서 언급된 것처럼 몇몇 요소기술 분야에서 실선 성능을 추정하기 위한 연구가 개별적으로 수행된 것처럼, 선박의 실선 성능을 정확하게 추정하고 평가하기 위해서는 선박의 설계정보, 저항, 자항, 내항, 조종성능 등의 요소기술 뿐 아니라 실제 운항 경로, 실제 운항하는 해역의 바람, 파도, 조류 등의 환경 조건에 대한 계측값 등 다양한 정보가 종합적으로 고려되어야 한다. 하지만, 각각의 정보가 조선소 혹은 해운선사에서 지적 재산으로 엄격하게 보호되고 있기 때문에, 실선 성능의 추정 및 평가에 대한 연구가 수행되기 어려운 현실이다. 이와 같은 한계를 극복하기 위하여, 실선계측 데이터를 통계적인 방법을 이용하여 분석하려는 연구가 수행되기도 하였다 (Yoo, et al., 2016; Yoo & Kim, 2016) 이외달리 설계정보, 모형시험 정보만을 이용하되, 선박자동식별장치(Automatic Identification System, AIS) 데이터를 추가적으로 고려하여 실선 성능을 추정하려는 연구가 수행되기도 하였다 (You, et al., 2017)

본 연구에서는 선박의 설계정보와 모형시험 정보를 기반으로 운항 시뮬레이션을 수행하되, 해운선사로부터 제공받지 못하는 운항경로 및 운항 상태에 관한 정보를 대체할 수 있는 수단으로써 선박자동식별장치를 활용하는 방안을 제시하고자 하였다. 먼저, 대우조선해양에서 건조한 단축 추진 151K LNGC를 대상으로 연구를 수행하였으며, 내부적으로 보유한 모형시험과 설계자료를 통해 대상 선박의 저항, 자항 및 조종성능을 추정할 수 있었다. 선박자동식별장치를 탑재한 모든 선박의 운항 정보는 데이터베이스로 구축되어 있으며, 이 데이터베이스 내에서 각 선박이 국제해사기구에서 부여받은 고유의 일련번호를 이용하여 일정 기간 동안 운항했던 기록을 획득할 수 있었다. 이중 선박의 위, 경도 좌표, 대지속도, 흘수정보가 선택적으로 시뮬레이션에 이용되었다. 설계흘수 및 밸러스트 흘수 조건에서 수행된 저항, 자항 모형시험 결과를 고려하여, 운항흘수에 따라 선형보간법을 이용하여 선박의 저항 및 자항 관련 계수를 추정하였다. 또한, 국제해사기구 표준 조종시험 항목의 시뮬레이션 결과를 자유항주 모형시험 결과에 맞출 수 있도록, 유체력미계수를 수정한 후 비교하였다. 여기서, 조종운동방정식에 사용되는 계수는 경험식을 이용하여 추정되기 때문에, 운항 흘수가 조종성능의 변화에 미치는 영향을 고려할 수 있었다. 조종운동방정식을 일정한 주기로 풀이함으로써, 가속도, 속도, 위치 등의 정보를 업데이트 하였고, 선박자동식별 장치에서 획득한 경로 및 속도를 따라 대상선박이 운항하는 전체 과정을 모사하였다.

추정된 분당회전수(Revolution Per Minute, RPM) 및 동력의 시계열을 계측된 분당회전수 및 동력의 시계열과 비교함으로써, 제안된 추정 방법의 타당성을 정성적으로 검토하였다. 또한, 계측된 분당회전수 및 동력과 추정된 값의 오차를 통계적으로 분석함으로써, 제안된 추정 방법의 한계를 정량적으로 검토하였다. 그 결과 본 연구를 통해 추정된 분당회전수 및 동력의 시계열이 계측결과의 시계열과 정성적으로 유사한 경향성을 보임을 확인하였다. 다만, 정량적인 차이가 환경 하중의 크기 및 방향과 연관되어있음을 확인할 수 있었다. 조종운동방정식을 기반으로 운항시뮬레이션을 수행함으로써 변침 및 운항자에 의한 속도 제어까지 포함한 항해과정을 모사할 수 있었다.

2. 대상 선박 및 조종 운동 방정식

본 연구에서는 단축 추진기를 갖는 151K LNGC를 대상으로 연구를 수행하였다. Table 1에서는 설계흘수와 밸러스트흘수에서 대상 선박의 선체, 추진기, 타의 주요 제원을 보여주고 있다. LCG는 선체중양부에서부터 무게중심까지 떨어진 거리를 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} 는 속도의 시간변화율을 의미한다. r 은 선박의 $L_{pp}/2$ 위치의 선체 중양부를 기준으로 회전하는 각속도를, \dot{r} 은 각속도의 시간변화율을 가리킨다. X, Y, N 은 각각 선체에 작용하는 x 방향, y 방향 힘과 모멘트를 의미한다.

Table 1 Principal particular of the hull, propeller and rudder of the 151K LNGC

Item	Design	Ballast
Type	151K CLASS LNGC	
Length between perpendiculars (L_{pp}) [m]	277.2	
Breadth (B) [m]	43.4	
Draft (T) [m]	12	9.4
Block coefficients (C_B) [-]	0.75	0.73
LCG from midship [m]	1.00	2.75
Speed [knots]	18.4	19.0
Area of each rudder (A_R) [m ²]	63.48	
Aspect ratio [-]	about 1.90	
Diameter of propeller [m]	8.5	
Pitch at 0.7R [m]	7.4	

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

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 좌표계를 보여주고 있다. o, x_g, y_g 는 지구고정좌표계의 원점, 종방향, 횡방향 축계를 의미한다. δ 는 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.

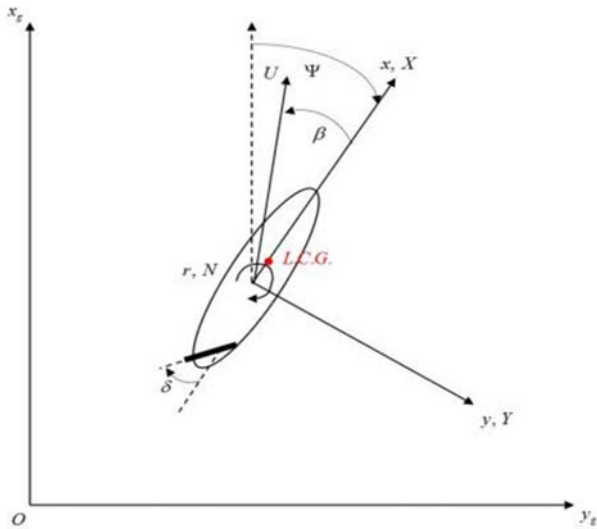


Fig. 1 Coordinate system

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

식 (3)은 선체에 작용하는 동유체력을 정리한 것이다. 각 유체력미계수는 경험식을 이용하여 추정하였다 (Kijima, et al., 1990). 단, 1990년대 초반에 작성된 경험식으로 최근 건조된 선박의 유체력미계수를 정확하게 추정할 수 없어, 대상선박의 선회 궤적 및 지그재그 시계열을 기준으로 X_{vr} , Y_v , N_v , N_{vrr} 계수를 구하는 수식의 기울기 혹은 절편값을 수정하였다. 흘수의 변화에 관계없이 동일하게 수정된 기울기와 절편값을 기준으로 추정된 유체력미계수를 사용했기 때문에, 흘수 변화에 따른 영향을 고려할 수 있다고 가정하였다.

식 (4)는 추진기가 발생시키는 추력을, 식 (5)는 타가 발생시키는 타력을 추정하는 식을 보여주고 있다. 타 직압력을 구하기 위한 경험식은 대상 선박에 설치된 전가동타(full spade rudder)를 고려하여 선택하였다 (Fujii & Tsuda, 1961; 1962). m_x , m_y 는 종방향, 횡방향의 부가질량을 의미한다. J_{ZZ} 는 부가질량관성 모멘트를 가리킨다. x_G 는 Table 1에서 정의한 LCG를 가리킨다. ρ 는 해수의 밀도를 가리키며, '은 무차원화된 값임을 의미한다.

식 (4)에서, t 은 추력감소계수(Thrust reduction coefficient), n 는 각각의 초당회전수(Revolution Per Second, RPS), K_T 는 추력계수(thrust coefficient)를 의미한다. 여기서 K_T 는 J 로 표기된 전진비만의 함수로 가정하였다. 또한, w_p 는 선박의 좌우동요와 선수 동요가 있는 경우에 대한 유효반류계수를 의미한다.

식 (5)에서 F_N 는 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 좌우동요에 따른 힘이 작용하는 위치를 의미한다. A_R 은 타의 면적, U_R 은 타에 입사하는 유체의 속도를 가리킨다. $C_{L,\alpha}$ 은 양력계수의 기울기를 의미하며, 종횡비(aspect ratio)인 Λ 를 이용하여 추정하는 경험식을 이용

하여 획득하였다 (Fujii & Tsuda, 1961; 1962). α 는 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 단축 추진 151K LNGC 조종운동을 모사 하였다.

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

$$\begin{aligned} Y_H &= -m_y \dot{v} + m_x ur + Y_H(v', r') \\ N_H &= -J_{ZZ} \dot{r} + N_H(v', r') + x_G Y_H(v', r') \end{aligned}$$

여기서,

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

$$X_P = (1 - t) \rho n^2 D_P^4 K_T (J_P) \quad (4)$$

여기서, $J_P = u(1 - w_p)/nD_P$

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_N &= 0.5 * \rho A_R^2 U_R^2 C_L \sin \alpha_R \\ C_{L,\alpha} &= \frac{6.13 \Lambda}{\Lambda + 2.25} \\ \alpha_R &= \delta - \gamma(\beta - l_R' r') \end{aligned} \quad (5)$$

선박자동식별장치에서 획득한 정보를 이용한 선박의 운항 시뮬레이션 수행하기 전에, 사용된 수학적모형을 통해 대상선박의 조종운동을 모사하는 것이 가능한지 확인할 필요가 있었다. 앞에서 설명한 것처럼, 설계흘수와 밸러스트흘수에서 국제해사기구에서 규정하고 있는 표준 조종시험을 맞출 수 있도록, 일부계수의 기울기와 절편값을 수정하였다. 모두 세 가지 시험을 모사하였으며, 각각 35° 선회시험(turning test), 10°/10° 지그재그시험(zigzag test), 20°/20° 지그재그시험이다. 설계흘수와 밸러스트흘수의 계산 및 모형시험 조건은 Table 1에 정리된 흘수, 속도와 같다.

Figs. 2, 3, 4에서는 대상선박의 표준 조종시험을 계산한 결과와 모형시험 결과를 각각 도시하고 있다. Fig.2는 35° 선회시험에서 선박 궤적을 보여주고 있다. 사각형과 원은 각각 설계흘수와 밸러스트흘수에서 자유항주 모형시험 시 예측된 선박 궤적을 가리킨다. 실선과 1점 쇄선은 설계흘수와 밸러스트흘수에서 계산된 선박 궤적을 각각 가리킨다. 자유항주시험 결과 밸러스트흘수의 선회 궤적이 설계흘수의 선회 궤적보다 크게 나타났으며, 계산 결과도 동일한 특성이 잘 반영되도록 수정되었다. 또한 흘수에 따른 궤적의 정량적인 차이도 계산 상 잘 반영된 것으로 보인다.

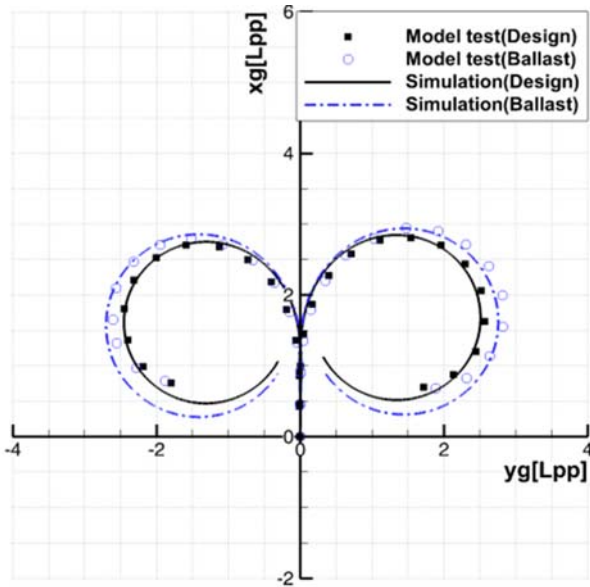


Fig. 2 Trajectories for 35° turning tests of the LNGC with design and ballast draft

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 10°/10° 지그재그시험과 20°/20° 지그재그시험을 수행하는 동안 선수각의 시계열을 보여주고 있다. 사각형과 원은 설계흘수와 밸러스트흘수에서 자유항주 모형시험 시 예측된 선수각을 각각 가리킨다. 실선과 1점 쇄선은 각각 설계흘수, 밸러스트흘수에 대해 계산된 선수각 시계열을 가리킨다. 첫 번째, 두 번째 과도작동각(overshoot angle) 모두 자유항주 모형시험결과와 계산결과에 오차가 있음을 알 수 있다. 다만, 그 오차가 크지 않고, 각각의 선수각 시계열이 변화하는 양상이 자유항주 모형시험 결과와 유사했다. 또한 흘수에 따른 정량적인 차이 또한 자유항주 모형시험결과와 유사한 경향성을 보이고 있다.

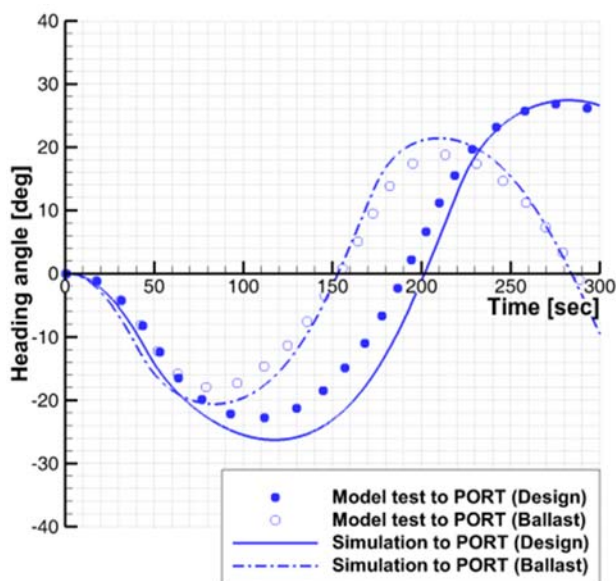


Fig. 3 Time histories of heading angle and turn rate for 10°/10° zigzag tests to port side of the LNGC with design and ballast draft

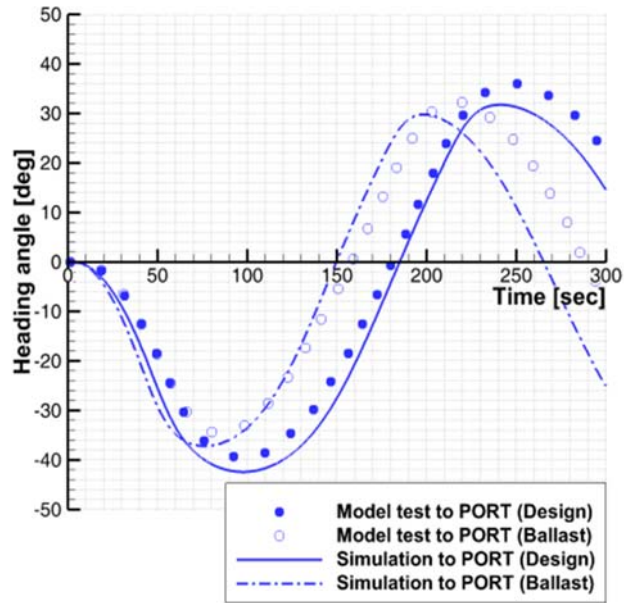


Fig. 4 Time histories of heading angle and turn rate for 20°/20° zigzag tests to port side of the LNGC with design and ballast draft

선회 궤적과 지그재그 시험 시 선수각 시계열에서 계산된 결과가 자유항주 모형시험 결과의 경향성을 잘 따라갈 수 있도록 경험식 적용 및 일부 계수의 수정이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다. 본 수학적모형을 이용하여, 대상 선박의 운항 시뮬레이션을 수행 하였다.

3. AIS 데이터 기반 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 선박자동식별장치 데이터를 기반으로 단축 추진 151K LNGC의 운항 시뮬레이션을 수행하고자 하였다. Table 2에서는 선박자동식별장치를 통해 획득 가능한 정보를 보여주고 있는데, 대상선박이 국제해사기구에서 부여받은 고유번호(IMO number)를 정적데이터에서 획득한 고유번호와 비교하여 대상선박의 정보임을 확인하였다 (Leica Geosystems Inc., 2001). 151K LNGC의 선명은 LNG IMO이며, 고유번호는 9311581이다. 시뮬레이션에 직접적으로 활용되는 정보는 Table 2에 ● 표시를 하였다.

선박자동식별장치 정보는 2010년 11월 22일 9시부터 2010년 12월 6일 14시 00분 사이의 값을 선택하였다. 다만, 전체 운항 기간에 비해 매우 짧은 주기로 업데이트 되는 선박자동식별장치 정보를 10분 간격으로 출력하여, 시뮬레이션 및 결과 검증에 사용하였다. 대상선박은 해당 기간에 대만 인근 해역에서부터 말라카 해협을 통과한 뒤, 인도양을 거쳐 마다가스카르 근처까지 운항하고 있었다. 시뮬레이션에 이용되는 정보는 동적데이터와 항해데이터 중에 일부인데, 선박의 위치, 시각, 대지속도, 선박의 흘수 등의 정보이다. 직접적으로 이용된 정보를 계산 시작시점과 종료시점에 대해서 Table 3에서 정리하였다.

Table 2 Information provided by the AIS falls into several categories

Type	Data
Static data	<ul style="list-style-type: none"> - IMO number (where available) (●) - Call sign and name - Length and beam - Type of ship - Location of position-fixing antenna on the ship
Dynamic data	<ul style="list-style-type: none"> - Ship's position with accuracy indication and integrity status (●) - Time in UTC (●) - Course over ground - Speed over ground (●) - Heading - Navigational status (e.g., "at anchor", "not under command" manually entered) - Rate of turn (where available)
Voyage related data	<ul style="list-style-type: none"> - Ship's draft (●) - Hazardous cargo (type) - Destination and ETA (at master's discretion)
Safety related message	- As needed

Table 3 Acquired data of the ship for Initial location and final location

Data	Initial	Final
Latitude [deg]	20.73	-25.67
Longitude [deg]	121.20	47.42
Time in UTC [-]	2010.11.22. 09:00	2010.12.06 14:00
Speed over ground [Knots]	16.50	14.40
Ship's draft [m]	9.06	8.85

Fig. 5에서는 대만 인근 해역에서부터 마다가스카르 인근 해역까지 이동하는 경로를 보여주고 있다. 가장 큰 변침은 말라카 해협에 진입할 때와 이탈할 때에 있었으며, 나머지 경로에서는 대부분 직선경로를 유지하였다. 대상선박의 경우 서아프리카에서 천연가스를 적재한 후 미국을 거쳐 아시아로 운반하며, 모든 천연가스를 하역한 후 아시아에서 서아프리카로 이동하는 경로를 가지고 있었다. 따라서 선택된 항해 기간 동안에는 밸러스트 흡수에 가까운 흡수를 유지하고 있었다.

Fig. 6은 선박자동식별장치에서 획득한 정보를 기반으로 대상 선박의 실제 운항기록에 따른 운항 시뮬레이션을 수행하기 위한 계산 과정을 순서도로 표시한 것이다. 먼저, 선박자동식별장치에서 대상선박의 정보를 획득한다. 그중에서 Table 3과 같이 모사하고자하는 구간을 정하는데, 제일 첫 번째 시점의 정보를 초기

값으로, 가장 마지막 시점의 정보를 최종값으로 가정한다. 선박 자동식별장치에서 획득한 위, 경도 좌표는 시뮬레이션 시 대상선박이 추종해야 하는 경로점으로 가정하였으며, 운항했던 선박의 대지속도를 명령속도로 가정하였다.

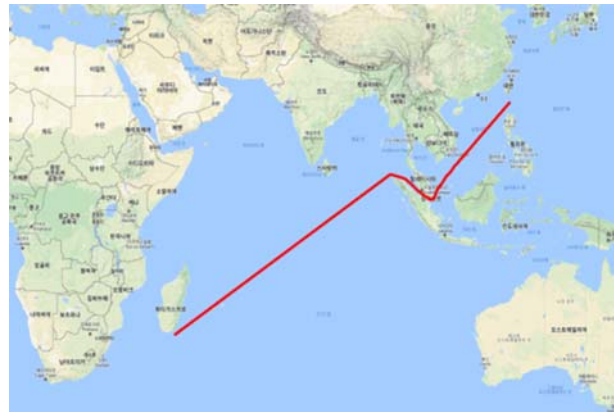


Fig. 5 Sea route of the LNGC from Asia to West Africa to load natural gas

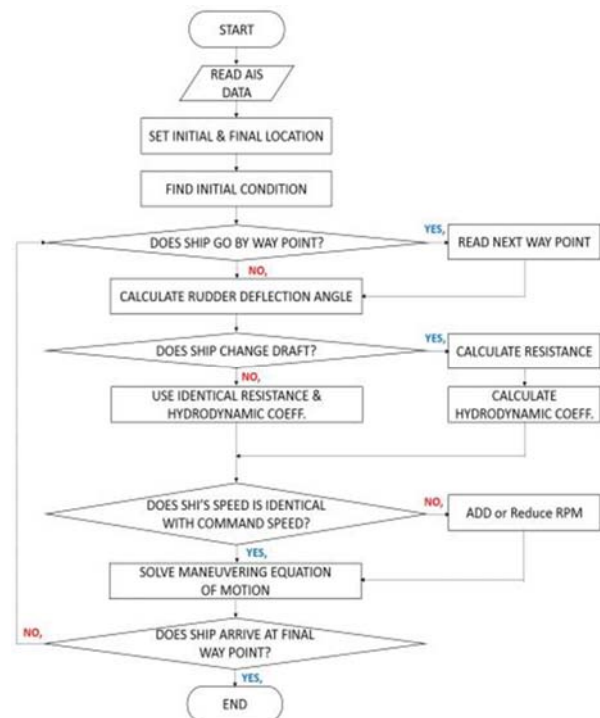


Fig. 6 Flow chart of the sailing simulation using the AIS data

초기위치에서의 대지속도를 초기 운항속도로 가정하였는데, 이때 필요한 분당회전수를 초기흡수를 기준으로 설계흡수와 밸러스트흡수의 저장, 자항 정보를 선형 보간하여 추정하였다. 초기기전수각은 초기 위치와 두 번째 경로점을 잇는 방위각으로 가정하였다.

대상선박은 현재 위치에서 다음 경로점을 향해 운항하는데, 만약 이전의 계산에서 추종하던 경로점을 지나쳤을 경우 다음 위

치를 경로점으로 변경하고, 아직 도달하지 못했을 경우에는 경로 점을 유지한다. 경로점에 도달했는지에 대한 판단은 기존의 충돌 회피 관련 연구에서 사용했던 개념을 차용하여 적용하였다 (Lee & Rhee, 2001; You & Rhee, 2016; You, et al., 2017). 즉, 선박의 중심과 경로점이 일정거리 이내에 도달 하였는 지와 선박의 현재 위치와 경로점을 잇는 방위각과 현재 선수각의 차이보다 일정 각도 이상 커졌는지를 확인한 후 판단한다. 여기서, 그 값은 $0.25L_{PP}$ 와 $\pi/4$ 로 가정하였다. 명령침로와 현재선수각이 이루는 차이, 선박의 선회각속도를 변수로 피지제어를 이용하여 경로유지 혹은 경로변경에 필요한 타각을 결정한다 (Hasegawa & Kouzuki, 1987). 단, 실제 운항하는 선박에서 침로 변경에 사용되는 타각 결정방법은 선박에 설치되는 자동항행장치 업체에 따라 결정되며, 경우에 따라 운항자의 판단에 따른 조타행위가 있을 수 있어 실제와 동일한 조작방법을 시뮬레이션에 이용하는 것은 불가능하다.

운항중인 선박은 적재화물의 양과 밸러스트수의 양에 따라 실제 운항하는 흘수가 결정되는데, 선박의 흘수에 따라 설계흘수와 밸러스트흘수의 저항, 자항 계수를 평균흘수에 따라 선형보간하였으며, 경험식을 이용하여 계산된 유체력계수를 고려하였다 (Kijima, et al., 1990). 또한 선박이 명령속도와 현재속도를 30초마다 비교하여, 더 빠른 속도로 이동하고 있다면 분당회전수를 0.2씩 감소시키고, 더 낮은 속도로 이동하고 있다면 분당회전수를 0.2씩 증가시킨다 (You, et al., 2017).

추정된 저항, 자항, 조종성능 등을 고려하여, 조종운동방정식을 풀이하고 위치, 속도, 가속도 등의 정보를 업데이트 한다. 업데이트된 선박의 위치가 최종 경로점에 도달했는지를 판단하여, 도달할 때까지 동일한 계산을 반복한다. 계산이 수행되는 동안 선박의 위치 정보는 극좌표계로 일정하게 업데이트 되는데, 극좌표계 정보와 평면 좌표계의 정보로 반복적으로 변환될 경우 발생하는 오차를 줄이기 위함 이었다 (Richardus & Adler, 1972).

극좌표계 내에서 두 점 사이의 이동거리, 방위각, 이동 후 도착지점의 좌표를 구하기 위하여, 식 (6), (7), (8)을 이용하였다. 먼저, 식 (6)은 두 점 좌표를 알 때, 두 점사이의 거리를 계산한 것이다. (ϕ_1, λ_1) 은 계산에 사용된 시작점의 위경도 좌표를, (ϕ_2, λ_2) 는 도착점의 좌표를 가리킨다. $\Delta\phi$ 는 도착점의 위도와 시작점의 위도 차이를, $\Delta\lambda$ 는 도착점의 경도와 시작점의 경도 차이를 가리킨다. R 은 지구의 반지름을 가리키며, d 는 두 점사이의 거리를 가리킨다. 식 (7)은 두 점의 좌표를 알 때, 두 점사이의 방위각을 계산한 것이다. θ 는 방위각을 가리킨다. 식 (8)은 시작점과 방위각, 그리고 이동거리를 알 때 도착한 지점의 극좌표를 계산한 것이다. 세 가지 식을 이용하여 극좌표계 내에서 선박과 경로점의 거리 계산, 선수각과 선박의 현재위치와 경로점을 잇는 각도의 차이 계산, 조종운동방정식 풀이 후 선박의 위치 업데이트 등을 수행하였다.

$$a = \sin^2(\Delta\phi/2) + \cos\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \sin^2(\Delta\lambda/2) \quad (6)$$

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$

$$d = R \cdot c$$

$$\theta = \operatorname{atan2}(\sin\Delta\lambda \cdot \cos\phi_2, \cos\phi_1 \cdot \sin\phi_2 - \sin\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \cos\Delta\lambda) \quad (7)$$

$$\phi_2 = a \sin(\sin\phi_1 \cdot \cos(d/R) + \cos\phi_1 \cdot \sin(d/R) \cdot \cos\theta) \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \operatorname{atan2}(\sin\theta \cdot \sin(d/R) \cdot \cos\phi_1, \cos(d/R) - \sin\phi_1 \cdot \sin\phi_2)$$

앞에서 설명한 흐름에 맞추어, 2010년 11월 22일 9시부터 2010년 12월 6일 14시 00분 사이에 선박의 운항과정을 시뮬레이션 하였다. Fig. 7은 선택된 운항기간동안 선박자동식별장치에서 획득한 선박의 위치와 계산된 선박의 위치를 비교한 것이다. 선박자동식별장치를 통해 획득한 선박의 위치와 계산된 선박의 위치가 대체적으로 일치하는 것으로 보인다. 하지만 14일간 운항한 전체 운항경로에서 비교되었기 때문에, 변침이 크게 이루어졌던 구간에서 선박의 예측 위치와 계산된 위치를 구체적으로 비교할 필요가 있었다. Fig. 7에서 말라카 해협 입구 부분에 사각형으로 표시된 변침구간을 확대하여, Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8은 말라카 해협 입구 근처에서 선박의 위치와 계산된 위치를 확대하여 도시한 것이다. 실선은 계산된 위치를, 사각형은 선박 자동식별장치에서 10분 간격으로 획득한 값을 가리킨다. Fig. 8에서 X축과 Y축은 극좌표계에서 각각 0.5°를 나타내며, 식 (6)을 이용하여 계산할 경우 약 55.59 km에 해당한다. 변침이 크게 이루어졌던 구간을 포함해서, 전체 구간에서 대상선박이 경로점을 잘 추종하고 있었음을 확인할 수 있다.

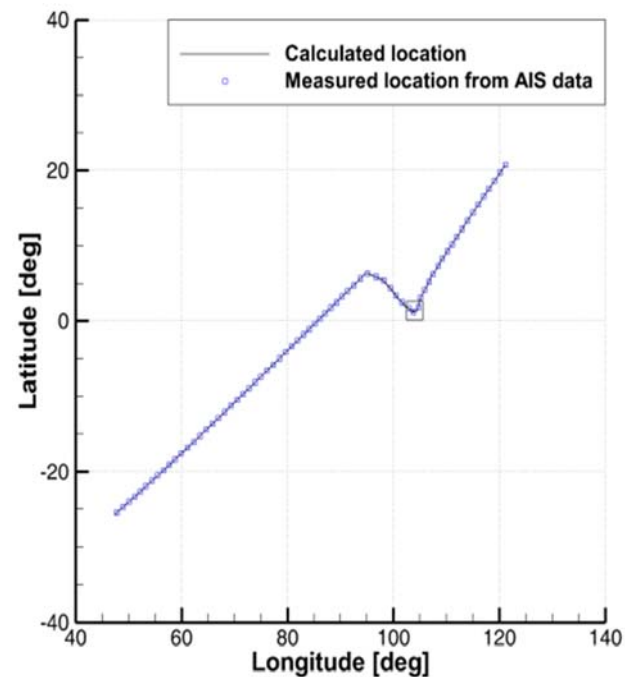


Fig. 7 Comparison between ship locations acquired from AIS data and those calculated from simulation

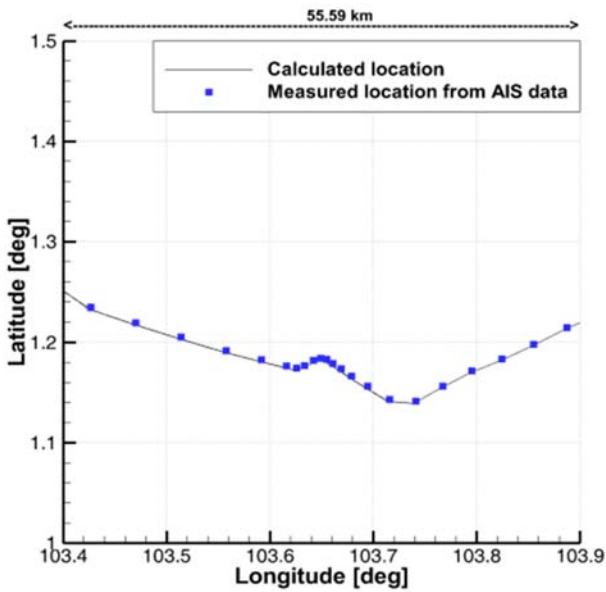


Fig. 8 Enlarged locations of the ship near the entrance of the Strait of Malacca

Fig. 9는 선박자동식별장치에서 획득한 선박의 대지속도와 계산된 선박의 속도를 비교한 것이다. 시각형은 선박자동식별장치에서 획득한 값을, 실선은 본 연구에서 계산으로 추정된 결과를 가리킨다. X축의 점선은 출발 시점을 기준으로 24시간 단위로 식별 가능하도록 구분한 것이다. Fig. 10은 Fig. 8에서 보여준 대각도 변침 구간의 속도 시계열을 확대하여 표기한 것이다. 계측된 속도의 변화 폭이 매우 컸던 4일에서 4.1일 사이에서는 계산된 속도 변화의 기울기가 좀 더 완만한 것으로 보인다. 변동 폭이 큰 마력 혹은 분당회전수 조절구간에서는 다소 오차가 발생함을 알 수 있다.

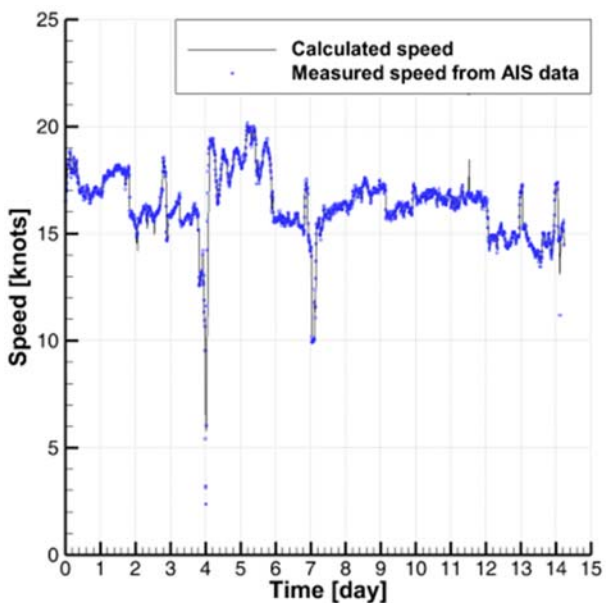


Fig. 9 Comparison between ship speed acquired from AIS data and those calculated from simulation

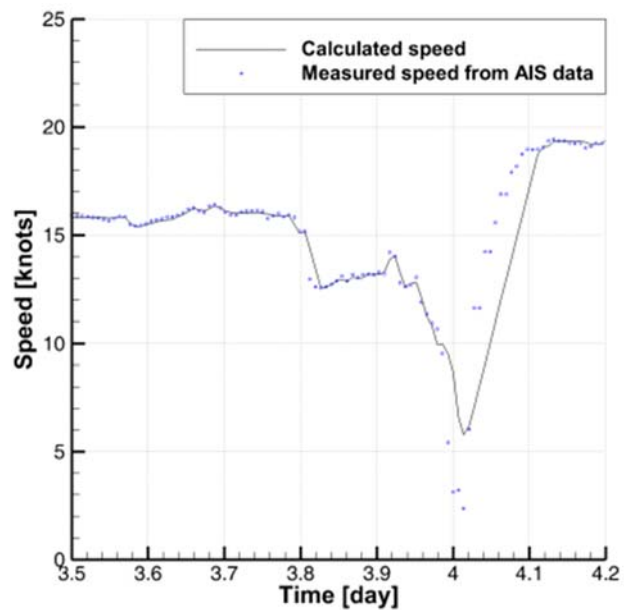


Fig. 10 Detailed time histories of measured speed and calculated speed from 3.5 day to 4.2 day

Figs. 7, 8, 9, 10에서 보는 것처럼, 선박자동식별장치에서 획득한 선박의 위치와 속도 모두 계산시 추정된 값과 대체적으로 일치하고 있다. 대각도 변침 구간에서도 계측된 조종운동을 비교적 잘 모사하고 있었다. 당초 계획했던 것처럼, 대상선박의 운항 시뮬레이션이 정상적으로 잘 수행된 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구에서 제안된 방법을 따라 운항 시뮬레이션을 수행할 경우 변침 및 운항자에 의한 속도 제어까지 포함한 전체 항해 과정을 연속적으로 모사할 수 있다는 장점을 확인할 수 있었다. 또한, 조종운동방정식 풀이를 통해 선박의 위치, 속도, 가속도, 타각, 분당회전수 등 다양한 정보를 추정하는 것이 가능하며, 이를 통해 초기 설계단계부터 선박의 설계정보 및 장비 특성에 따른 운항능을 비교하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

4. 시뮬레이션 결과

선박자동식별장치를 통해 획득한 정보를 기반으로 시뮬레이션을 수행했을 때, 계산된 결과를 실제 대상선박에서 계측했던 데이터와 비교함으로써 본 연구의 타당성을 검증하고자 하였다. 선박의 운항 중 분당회전수 혹은 동력을 추정할 수 있다면, 선박의 연료소모량을 직접계산 기반으로 추정하는 것이 가능할 것이다. 이를 위해 계산된 분당회전수와 동력의 시계열을 계측 결과와 비교하였다.

Fig. 11에서는 운항과정동안 추정한 선박의 분당회전수 시계열과 실제 선박에서 계측된 분당회전수 시계열을 비교한 것이다. 시각형은 계산된 분당회전수를, 실선은 계측된 분당회전수를 가리킨다. 대체적으로 계측된 분당회전수와 계산된 분당회전수가 유사한 경향성을 보이고 있다.

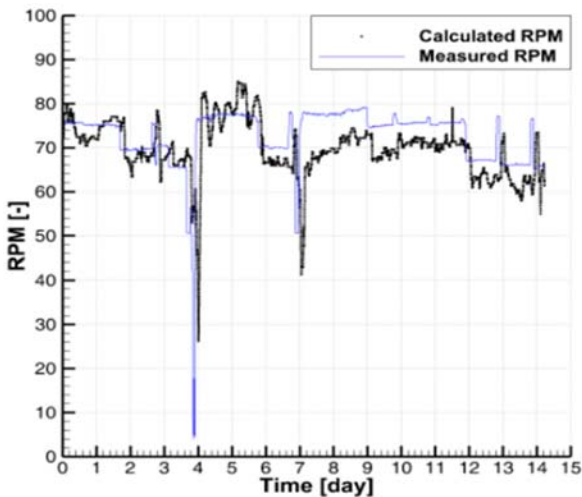


Fig. 11 Comparison between measured RPM and that calculated from simulation

계산된 분당회전수에서는 잦은 흔들림이 보이는데, 이것은 실제 선박에서 이용되는 제어방식과 선박자동식별장치에서 획득한 데이터를 기반으로 시뮬레이션 한 본 연구의 방법론과의 차이에 기인한다. 즉, 선박에서는 일정한 동력을 기준으로 운항을 하고, 바람, 조류, 파도 등의 외력에 의해 선박의 속도가 끊임없이 변한다. 본 연구에서 제안된 시뮬레이션은 Fig. 9와 같이 외력에 의해 끊임없이 변화하는 속도를 입력으로 시뮬레이션 한 결과이기 때문에, 분당회전수가 그에 맞추어 끊임없이 변하고 있다.

Fig. 12는 Fig. 8에 해당하는 구간의 분당회전수 시계열을 확대하여 표기한 것이다. Fig. 10에서는 선박자동식별장치로 수신된 속도와 계산된 선박의 속도에 시차없이 유사한 경향성을 보였다. 하지만, 분당회전수의 경우 약 0.1일 정도의 시차가 발생하고 있었다. 운항자의 동력제어에 따른 결과로 운항 속도의 변동이 나타나는데, 선박의 느린 동적 특성상 동력제어의 효과가 속도에 반영되는데 일정한 시간이 소요된다. 따라서, 선박자동식별장치로 수신된 속도를 추종하는 본 시뮬레이션의 특성상 시차를 피할 수 없다고 생각된다.

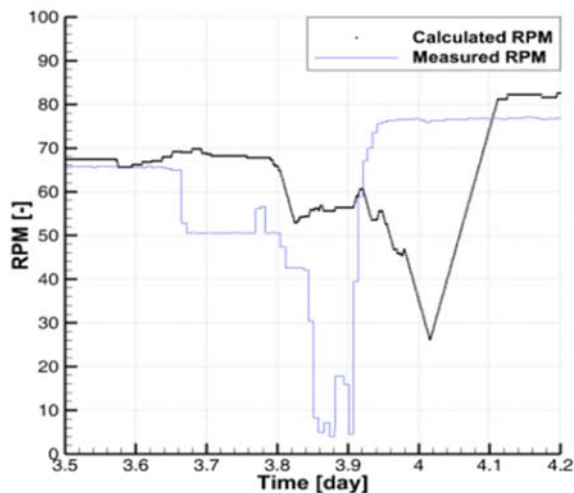


Fig. 12 Detailed time histories of measured RPM and calculated RPM from 3.5 day to 4.2 day

Fig. 13은 10분 간격으로 계측된 분당회전수와 계산된 분당회전수의 차이를 히스토그램으로 작성한 것이다. 분당회전수 차이의 간격은 1로 선택하였다.

오차의 평균은 2.93, 표준편차는 7.26로 추정되었다. 오차의 분포는 오차의 평균인 2.93 부근의 4를 중심으로 종형으로 분포하고 있다. 중심 부근에 집중되는 오차와 빈도로 볼 때, 시뮬레이션으로 계산된 분당회전수가 계측된 분당회전수의 경향성을 잘 따라가고 있는 것으로 생각할 수 있다. 오차의 분포가 0이 아닌 4만큼 편향된 값을 중심으로 종형으로 분포하는 이유는 본 연구에서 환경하중을 고려하지 않았기 때문으로 생각한다. 즉, 바람, 조류, 파가 선체에 부가적으로 작용할 경우 더 큰 저항이 작용하게 되고, 동일한 속도를 유지하기 위해서는 더 큰 분당회전수를 필요로 한다. 실제 운항과정에서는 바람, 조류, 파 등의 환경하중이 선체에 작용했기 때문에 대체적으로 분당회전수가 더 큰값을 가지게 된다고 생각할 수 있다. 환경하중을 고려하지 않았던 본 계산에서는 더 낮은 분당회전수를 이용해서, 실제 운항했던 대지속도를 추종하는 것이 가능했던 것이다.

오차의 절대값이 큰 영역에서도 빈도수가 보이는데, 이것은 계산된 분당회전수와 계측된 분당회전수의 시차로 인한 것이 주요 원인으로 생각된다. Fig. 11에서 보이는 시계열에서 분당회전수가 급격하게 증가하거나 감소하는 구간에서는 계산값이 더 늦게 증가하거나 감소하기 때문에, 이 부분에서 계측된 분당회전수와 계산된 분당회전수의 차이가 크게 나타나는 것이다.

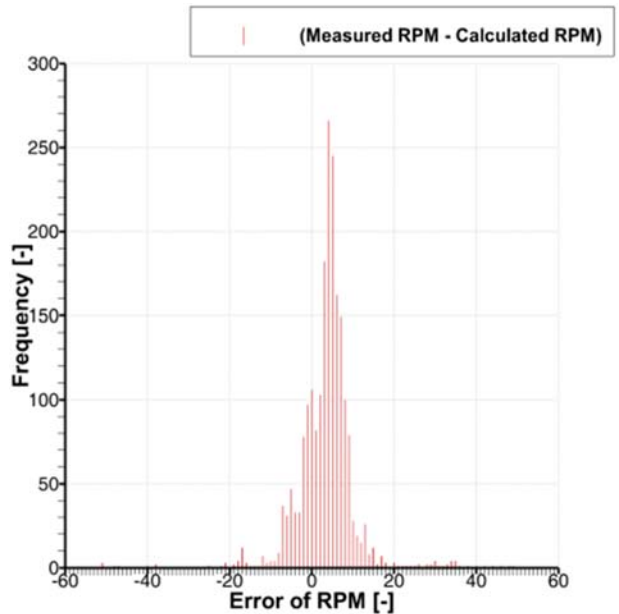


Fig. 13 Histogram of error between measured RPM and that calculated from simulation

대상선박에 설치된 추진기의 동적 특징과 임의의 시점에 분당회전수를 알 수 있다면, 선박의 추계동력을 추정하는 것이 가능하다. 대상 선박의 경우 모형시험을 통해 획득한 전진비-토크 정보를 알고 있기 때문에, $K_Q(\dot{\tau})$ 계수를 구할 수 있다. 결과적으로 식 (9)를 이용하여, 추계동력을 추정하고자 하였다.

$$Q = \rho n^2 D_p^5 K_Q(J) \tag{9}$$

$$Power = 2\pi n Q$$

Fig. 14와 15에서는 Fig. 11에서 추정된 분당회전수와 식 (9)를 이용하여, 대상선박에서의 동력을 추정하여 시계열로 표시하고, 계측된 추계동력을 비교한 것이다. 1점 쇄선은 계측된 추계동력을, 실선은 계산된 동력을 가리킨다. 단, Fig.14의 사각형은 계측된 바람의 속도를, Fig. 15의 사각형은 계측된 유의파고를 가리킨다. Fig. 10에서 보았던 것처럼, Fig.14와 15에서도 대체적으로 계측된 추계동력과 계산된 동력이 유사한 경향성을 보이고 있다. 식 (9)에서 보는 것처럼 동력계산과정에서 분당회전수가 이용되기 때문에, Fig. 11에서 관찰되었던 계산된 시계열의 잦은 흔들림과 시차가 동일하게 나타났다.

다만, Fig. 11과 비교할 때 계측된 추계동력과 계산된 동력의 정량적인 차이가 분당회전수에 비해 더 커진 것을 알 수 있다. 이것은 식 (9)를 이용하여 계산된 동력이 분당회전수의 세제곱에 비례하기 때문이다. 즉, 분당회전수의 오차가 세제곱으로 동력의 오차가 증가하기 때문에, 정량적인 오차가 뚜렷하게 관측되었던 6일부터 12일 까지의 계측 구간에서 매우 큰 오차를 보이고 있었다. 이 구간에서는 Fig. 14와 15에서 보는 것처럼, 바람의 속도와 유의파고가 뚜렷하게 커져 선체에 작용하는 부가적인 저항이 더 커졌을 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 실제 운항에서는 일정한 속도를 유지하기 위하여 더 큰 분당회전수와 추계동력을 필요로 했고, 본 계산에서는 환경하중을 고려하지 않았기 때문에 더 작은 분당회전수와 동력을 사용한 것이다.

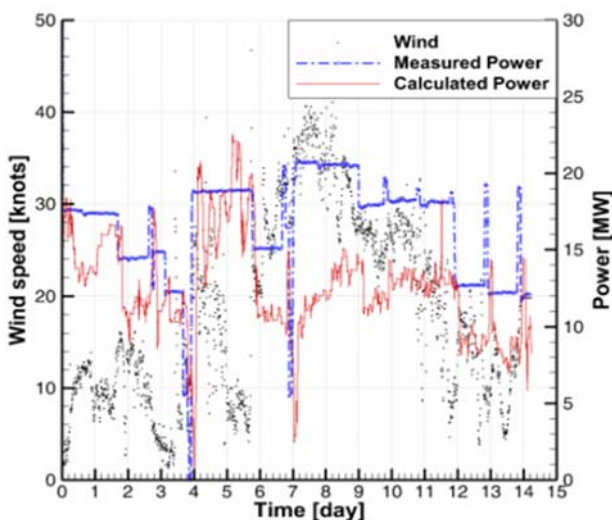


Fig. 14 Time histories of wind speed, measured power and calculated power from simulation

그런데 Figs. 11, 14, 15에서 3일에서 5일 정도에는 추정된 분당회전수, 동력이 계측된 분당회전수, 동력에 비해 다소 크게 추정되는 것을 알 수 있다. 환경하중이 작용하는 전체 구간에서 이 구간에서 상대크기가 변하는 이유를 밝히기 위하여, Fig. 16

에서 약 15일 동안 계측한 환경하중의 방향을 도시하였다. 사각형은 바람의 입사 방향을, 원은 파도의 입사 방향을 가리키며, 두 값 모두 선체에 입사하는 상대각도로 표기되었다. 대체로 환경하중이 선체의 선수방향에서 입사되기 때문에, 선박이 부가적인 저항을 받는 형태로 작용하고 있다. 다만, 3일에서 5일 사이에는 바람 및 파랑의 입사방향이 선미방향에서 입사되는 경우를 포함해서, 불규칙하게 분포하고 있었다. 따라서 다른 방향에 비해 환경하중이 선박의 운항 속도를 낮추는 효과가 작았을 것으로 생각되며, 추정된 분당회전수, 동력이 계측된 값보다 다소 크게 추정된 이유라고 볼 수 있다.

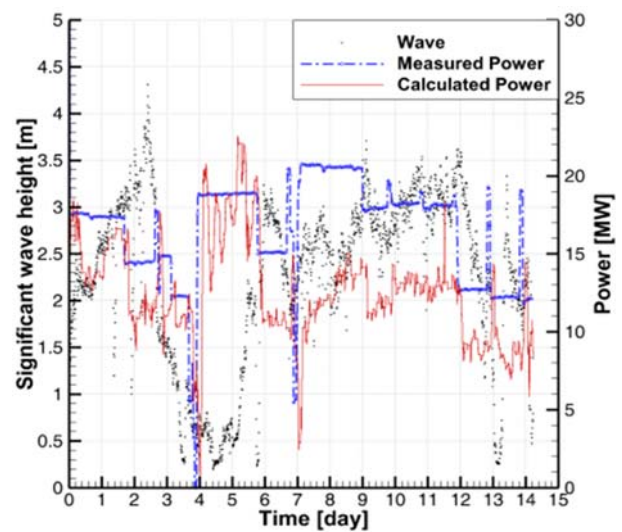


Fig. 15 Time histories of significant wave height, measured power and calculated power from simulation

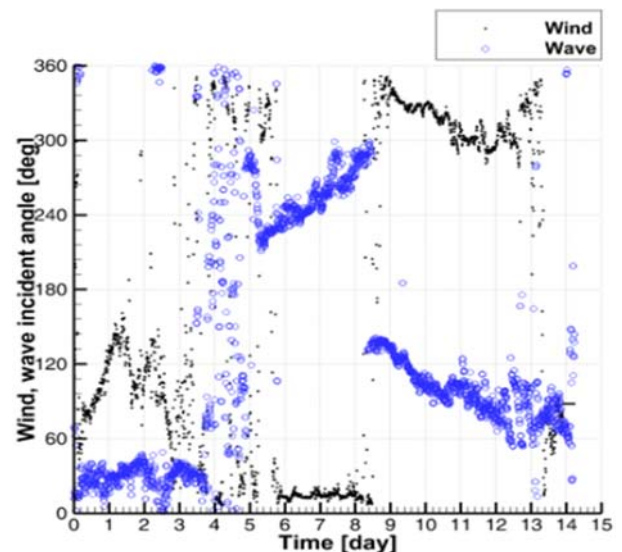


Fig. 16 Time histories of wind and wave incident angle

Fig. 17은 Fig. 8에 해당하는 구간의 동력 시계열을 확대하여 표기한 것이다. Fig. 12에서 계측된 분당회전수 시계열과 계산된

분당회전수 시계열에 0.1일 정도의 시차가 발생했던 것과 유사하게, 동력 시계열에서도 0.1일 정도의 시차가 동일하게 발생했다. 동력의 변화는 거의 유사한 형태로 변화하고 있음을 알 수 있다.

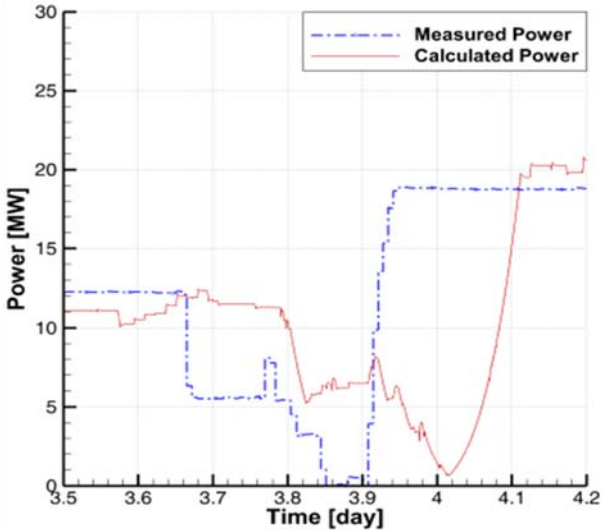


Fig. 17 Detailed time histories of measured power and calculated power from 3.5 day to 4.2 day

Fig. 18은 계측된 축계동력과 계산된 동력의 차이를 히스토그램으로 표시한 것이다. 동력 차이의 간격은 0.5 MW으로 선택하였다. 오차의 평균은 3.94 MW, 표준편차는 3.62 MW으로 추정되었다. 계측된 축계동력과 계산된 동력의 오차의 분포는 오차의 평균인 3.94 MW 부근을 중심으로 종형으로 분포하고 있다. 앞에서 언급한 것처럼 환경하중으로 인해 편향된 값을 중심으로 오차의 히스토그램이 분포한 것으로 생각된다. 또한, 계측된 축계동력과 계산된 동력의 차이의 절대값이 큰 영역에서 보이는 계측 횟수는 두 시계열의 시차 때문에 나타난 것으로 생각된다.

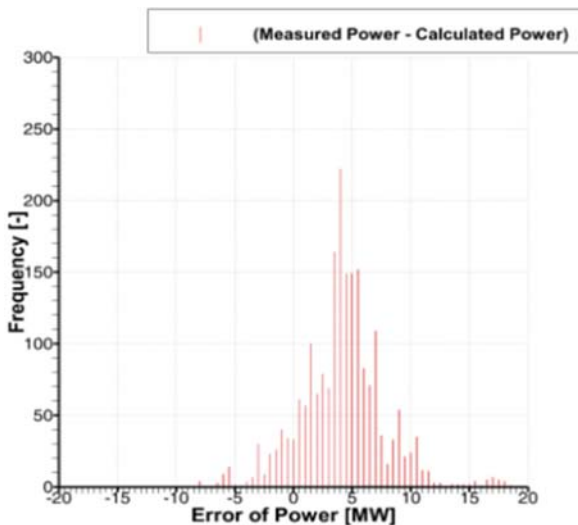


Fig. 18 Histogram of error for between measured power and that calculated from simulation

5. 결론

본 연구에서는 선박의 설계정보 및 모형시험 정보를 기반으로, 해운선사로부터 제공받지 못하는 운항경로 및 운항 상태에 관한 정보를 대체할 수 있는 수단으로써 선박자동식별장치를 이용하여 운항성능을 추정하는 방안을 제시하였다.

첫째, 조종운동방정식을 기반으로 대상선박의 운항시뮬레이션을 수행함에 따라 변침 및 운항자에 의한 속도 제어를 포함하여 전체 항해과정을 모사할 수 있었다. 즉, 실제 운항데이터 없이도 선박의 항적과 속도에 대한 정보만 획득할 수 있다면, 해당 경로를 운항하는 동안에 정성적으로 유사한 경향성을 갖는 분당회전수 및 동력을 추정하는 것이 가능하다는 것을 확인하였다. 다만, 환경하중을 고려하지 않을 경우, 정량적인 오차가 커질 수 있음을 알 수 있었다.

둘째, 선박자동식별장치에서 획득한 선박의 위, 경도 좌표, 대지속도를 추종하는 시뮬레이션을 수행한 결과 계측된 분당회전수 시계열과 정성적으로 동일한 경향성을 갖는 분당회전수 시계열을 얻을 수 있었다. 약 15일간 계측된 분당회전수의 평균값이 72.58이었고, 분당회전수 오차의 평균이 2.93임을 고려할 때, 평균적인 오차는 계측값 기준 4.04% 정도로 추정되었다. 제한된 정보만으로 수행한 시뮬레이션으로도 신뢰할만한 수준의 분당회전수 추정이 가능했다.

셋째, 계측된 축계동력의 시계열과 계산된 동력의 시계열이 정성적으로 동일한 경향성을 보임을 확인하였다. 약 15일간 계측된 동력의 평균값이 16.52MW이었고, 동력 오차의 평균이 3.94MW임을 고려할 때, 평균적인 오차는 계측값 기준 23.85% 정도로 추정되었다. 분당회전수에 비해 정량적인 오차가 매우 커짐을 확인할 수 있었는데, 이것은 동력이 분당회전수의 세제곱에 비례하기 때문이다. 즉, 분당회전수에서 발생한 오차가 크면 클수록, 추정되는 동력은 정량적으로 더 큰 오차를 보이게 된다는 것이다. 설계관점에서 23.85%는 15일간 운항하는 동안 환경하중으로 인한 대상선박의 동력 증가분으로 생각할 수 있다.

현재 기상 데이터베이스로부터 운항 경로를 따라 해당 시점의 환경 조건을 추정함으로써, 환경하중을 고려하여 실선 운항 시뮬레이션을 수행하는 후속 연구를 계획하고 있다. 이를 통해, 실선 계측 데이터 없이 선박자동식별장치로부터 획득한 정보와 기상 데이터를 이용하여, 실선 운항 성능의 추정이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 선박의 설계과정에서 실선 운항성능을 기준으로 선박의 효율성을 비교할 수 있는 계산 모듈로 이용이 가능하다. 즉, 저항, 조종, 환경하중 등 각 요소가 실선성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 각각 분류하는 것이 가능하기 때문에, 각 요소가 실선 성능에 미치는 영향을 분석하는 것이 가능하다. 이를 기반으로 실선 성능 기반의 설계 방법론 정립이 가능할 것으로 기대된다.

References

Choi, G. Chang, B. Hur, J. & Cho, D., 2011.

- Comparison of cavitation patterns between model scale observations using model and full-scale wakes and full scale observations for a propeller of crude oil carrier. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1). pp.15–22.
- Fujii, J. & Tsuda, T., 1961. Experimental researches on rudder performance (2). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 110, pp.31–42.
- Fujii, J. & Tsuda, T., 1962. Experimental researches 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. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 205, pp.1–10.
- International Maritime Organization (IMO), 2002. *MSC.137(76) standards for ship manoeuvrability*. International Maritime Organization: London, UK.
- International Organization for Standardization (ISO), 2015. *Ships and marine technology – Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data*. International Maritime Organization: London, UK.
- Jung, R., 2011. Recent international development on the technical and operational measures of IMO's CO2 emission control from ships. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 14(1), pp.65–71.
- 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. Park, G. & Ha, M., 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. Yeo, D. Kim, S. Yun, K. & Oh, B., 2011. Prediction of maneuverability of KCS with 4 degrees of freedom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.267–274.
- Leica Geosystems Inc., 2001. *Marine GPS – The complete guide to automatic identification systems*. Leica Geosystems Inc: Heerbrugg.
- Lee, H. & Rhee, K., 2001. Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm. *International Shipbuilding Progress (ISP)*, 48(3), pp.197–212.
- Richardus, P. & Adler, R.K., 1972. *Map projections for geodesists, cartographers and geographers*. North-holland pub.: Amsterdam.
- Seo, M. Kim, Y. & Kim, K., 2011. Effects of nonlinear ship motions on ship maneuvering in large amplitude waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.516–527.
- Song, I. Seo, J. Paik, K. & Jung, J., 2005. Verification of propeller-induced fluctuating pressure in sea trial. *Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea*, pp.44–50.
- Yoo, B. Kim, J. Kim, J. & Ahn, Y., 2016. Analysis of ship powering performance under environmental disturbances using ship operational data. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of Society of Naval Architects of Korea*, Busan, 19–20 May 2016, pp.440–444.
- Yoo, B. & Kim, J., 2016. Probabilistic modeling of powering performance of a full-scale ship using machine learning techniques. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Korean Society of Ocean Engineers*, Busan, 17–18 November 2016, pp.272–275.
- Yoon, H. & Rhee, K., 2001. Estimation of external forces and current variables in sea trial using the estimation-before-modeling method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(4), pp.30–38.
- You, Y. Kim, S. & Kim, W., 2017. A study on quantifying sailing safety considering maneuverability of a vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.114–125.
- You, Y. & Rhee, K., 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.
- You, Y. Kim, J. & Seo, M., 2017. A study on the numerical simulation of maneuvering behaviors of a LNGC based on the AIS data. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of Society of Naval Architects of Korea*, Busan, 19–20 April 2017, pp.50–56.

