

3자유도 조종운동방정식을 이용한 실선성능 추정 방법에 관한 연구: 속도, 분당회전수, 또는 엔진동력을 기준으로

유영준[†]
대우조선해양(주)¹

Different Approaches for Estimating the Full-scale Performance of a Ship based on 3-DOF Maneuvering Equations of Motion: Given Speed, RPM or Power

Youngjun You[†]
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.

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.

It was important to estimate the full-scale operating performance including actual RPM and engine power of a ship since the operation efficiency during a voyage could be evaluated from the values. In the previous research, an entire voyage was simulated by following recorded speeds obtained from AIS and full-scale measurement data. Although reasonable tendencies were observed in the estimated speed, actual RPM, and engine power, it was impossible for them to be completely corresponded with the measured values due to the difference between actual operation and mathematical model. In this paper, alternative approaches to cope with the speed, actual RPM, and engine power were suggested by following the given speed, RPM, and power respectively. After entire voyages were simulated according to a given value, the effects of the value on the estimated performance were investigated. And, it was confirmed that the appropriate approach could be differently chosen according to the aim of the simulation or given value.

Keywords : Operating performance(운항성능), Maneuvering(조종), Speed(속도), RPM(분당회전수), Engine power(엔진동력)

1. 서론

최근, 조선해양 분야 미래 기술의 지향점으로써 스마트선박(SMART ship)에 대한 다양한 논의가 이루어지고 있다. 스마트선박을 어떻게 정의하는지에 대해서는 기업, 기관에 따라 다소 차이가 있다. 선주(또는 운항자), 조선소, 장비업체들은 향상된 IoT를 기반으로 각각의 필요에 맞추어 관련 기술을 개발하고 있어, 각각의 기능과 역할을 살펴보고자 했다(Ando, 2017). 첫째, Maersk, Shell, BW gas 등과 같은 선주 그룹은 선대의 총원, 운용계획의 수립, 운용, 관리 등의 기능을 수행하는 주체이며, 스마트선박을 통해 효율성, 안전성을 높임으로써, 더 많

은 이익을 기대할 수 있다. 둘째, 현대중공업, 대우조선해양, 삼성중공업 등을 포함한 조선소 그룹은 인도한 선박의 운항 데이터 분석을 통해 향상된 선박 설계를 추구하고, 설계된 선박의 실제 성능에 대한 경험적 지식과 기술을 획득할 수 있다. 셋째, ABB, Rolls-Royce, NAPA 등을 포함한 장비업체 그룹은 선박의 운항에 이용되는 장비의 개발 및 공급 주체이며, 제품의 상태를 감시하고 발생한 문제를 빠르게 진단하고 대처할 수 있다. 앞에서 기술된 스마트선박 관련 기술은 Table 1과 같이 정리할 수 있다(표를 발췌함에 일부 역할을 재구성하였다(Ando, 2017)).

효율적이고 친환경적인 선박에 대한 요구가 증가하면서, 초기 설계단계부터 선박의 효율 및 오염물질 배출에 관한 성능을

입증할 필요성이 제기되었다 (Ball et al., 2015). 선사, 항만, 선급, 모형시험소, 조선소 등은 각각의 역할에 따라, 운항 중인 선박의 성능을 정확하게 추정하거나 개선하는 방법을 개발해 왔다. Lu et al. (2013)은 경험적인 환경 하중 증가를 고려하여 Suez-Max tanker를 대상으로 각각의 로딩 조건, 속도, 상대 파랑 입사각에 따른 운항성능을 평가한 뒤, 해상조건과 운항성능의 연관 관계를 생성하였다. Johnson and Styhre (2015)는 선박의 항만 체류 시간을 줄임으로써 잠재적으로 개선 가능한 운항 효율성을 추정하였다. 선급, 대학교, 모형시험소 등은 SHOPERA 프로젝트를 통해 에너지효율설계지수(EEDI) 적용을 대비하여 새로 건조되는 선박을 대상으로 계산을 수행하고, 기술적인 사항을 논의하였다 (Papanikolaou et al., 2014). 이외에도 Kim et al. (2017)과 Luo et al. (2016)은 바람 및 파랑으로 인한 환경 하중을 추정하고, 부가저항으로 인한 선박의 속도 저하를 추정하기도 하였다. 또한, Degiuli et al. (2017)은 파랑 중 부가저항으로 인한 선박의 연료 소모량 증가를 추정하기도 하였다. 본 저자는 선박의 실선 성능을 추정하고, 그 추정 결과를 기반으로 선박의 설계를 개선하는 연구를 수행해 왔다. 특히, 선체, 추진기, 타 등의 기계적인 요소뿐 아니라, 바람, 파도와 같은 환경 하중을 고려하여 선박의 분당회전수 (RPM), 동력(Power), 경제 운항속도, 에너지효율운항지수 (EEOI) 등을 추정한 바 있다 (You et al., 2017a; You et al., 2017b; You et al., 2018a; You et al., 2018b; You and Park, 2018).

Table 1 Examples of SMART ship according to the roles

Role	Function	Example of SMART ship
Ship owner (incl. operator)	Technical management	Safety operation
		Condition monitoring and maintenance
		Environmental regulation compliance
		Hull and propeller cleaning
		Retrofit and modification
	Operation	Energy saving operation
		Safe operation
		Schedule management
	Fleet planning	Fleet allocation
		Service planning
Chartering		
New building	Design optimization	
Shipyard	In-service ship	Ship performance analysis
	New building	Design optimization
Manufacturer (or vender)	Maintenance	Remote monitoring and diagnosis

선박의 실선 운항성능 추정과 관련된 연속적인 연구를 수행 하면서, 실선 운항성능과 직접적으로 관련된 선사, 모형시험소 등의 비교, 검증 요구에 대응할 필요가 있었다. 특히, 선박의 설계속도 (혹은 운항속도)를 기준으로 장비의 용량, 비용, 성능 등을 제시하거나 비교, 검증하는 조선소와 달리, 분당회전수를 기준으로 자유 항주 시험을 수행하고 결과를 분석하는 모형시험소, 동력을 기준으로 세팅된 항해 장비의 운용을 고려하여 운항 계획을 수립해야 하는 선주(또는 항해자)에게 필요한 분석 결과를 제공해야 했다. 이상적으로 추정된 실선 운항성능은 기록된 속도, 분당회전수, 동력이 모두 정확하게 일치해야 한다. 하지만, 다양한 장비의 운용, 건조된 선박의 상태, 계획된 운항 상태의 불확실성, 시뮬레이션에 이용된 수학적 모형과 실제 선박의 차이 등으로 인해, 추정된 속도, 분당회전수, 동력이 예측값과 동시에 일치할 수 없음을 확인한 바 있다 (You et al., 2017a; You et al., 2017b; You et al., 2018a).

본 논문에서는 조선소, 모형시험소, 선주의 요구에 맞추어 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 운항 시뮬레이션을 수행하는 방법을 각각 제안하였다. 특히, 기존에 제안된 운항 시뮬레이션 연구에서 경험적으로 구성했던 룩업테이블(look-up table) 방식의 분당회전수 증감에서 벗어나, 선박 추진 체계 동특성을 고려한 엔진-추진기 토오크 평형을 적용하였다. 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 운항 시뮬레이션을 수행할 때, 특성에 맞는 가정과 절차를 따라 엔진-추진기 토오크 평형식을 다르게 적용하였다. 각각의 기준값과 적용 방법에 따라 계산된 운항 시뮬레이션 결과를 분석하여, 각각의 계산 방법이 갖는 특징을 정리하고자 했다.

2. 대상 선박 및 수학적 모형

본 연구에서는 선행 연구(You et al., 2017a; You et al., 2017b; You et al., 2018a)에서 활용되었던 148K 단축(Single-screw) 천연가스운반선(LNGC)을 이용하였고, 이전 연구에서 검토되었던 실선 운항데이터 상의 운항 경로와 바람 및 파랑 조건을 기준으로 운항 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 선박의 개략적인 정보는 Table 2와 같으며, 더 상세한 주요제원은 선행연구(You et al., 2017a)에 정리되어 있다. Fig. 1에서는 본 연구에서 사용된 축계를 정의하고 있다. 실선 운항데이터, 저항/항 모형시험, 추진기 단독(POW) 시험 결과, 조종 운동방정식,

Table 2 Brief information of the LNGC

Data	Value
IMO Number [-]	9311581
Tonnage [ton]	98.79
Length overall [m]	288.0
Beam [m]	43.0
Year of construction [-]	2008
Capacity [m ³]	148.47

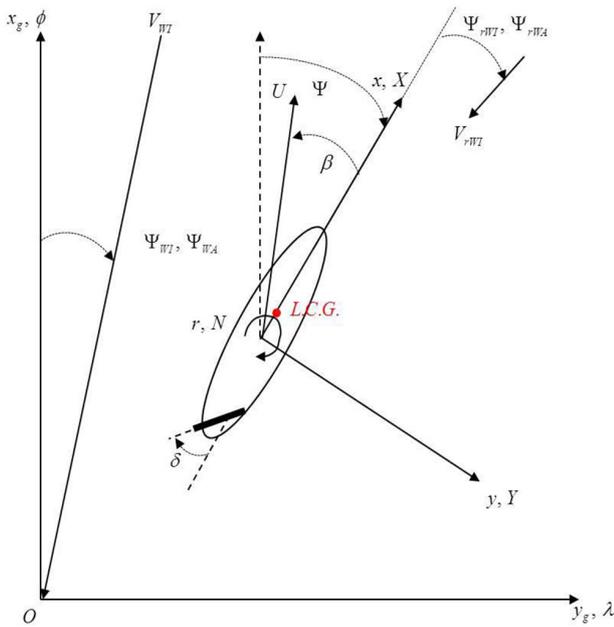


Fig. 1 Coordinate to solve the maneuvering equations of motion

자유 항주 시험 결과, 풍동 시험, 파랑 하중 등 각각의 항목이 서로 다른 축계를 사용하기 때문에, Fig. 1과 같은 하나의 기준 축계가 필요했다.

2.1 선체, 추진기, 타, 바람, 파랑 하중

운항 시뮬레이션을 수행하는데 선체, 추진기, 타, 바람, 파랑 등을 고려한 조종 운동방정식을 이용하였다. 식 (1)에서 X, Y, N 3자유도 조종 운동방정식임을 확인할 수 있으며, 선체, 추진기, 타, 바람, 파랑 다섯 가지 요소를 하첨자로 표시하였다. 식 (2)는 선체 하중을 추정하기 위한 수학적모형을 보여주고 있다. Kijima et al. (1990)의 경험식을 이용하여, 각각의 유체력계수를 추정하였다. 식 (3)은 추진기에서 발생하는 추력을 계산하기 위한 수식을 보여주고 있고, 표시된 주요 계수는 추진기 단독 시험 결과에서 획득하였다. 식 (4)는 선체의 운동 정보 및 추진기 단독 시험 결과로부터 추진기에 작용하는 토오크를 추정하는 수식을 보여주고 있으며, 식 (5)는 추진에 필요한 동력의 계산식이다.

$$X = X_H + X_P + X_R + X_{WI} + X_{WA} \quad (1)$$

$$Y = Y_H + Y_R + Y_{WI} + Y_{WA}$$

$$N = N_H + N_R + N_{WI} + N_{WA}$$

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

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

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

where,

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

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

$$X_P = (1-t) \rho n^2 D_P^4 K_T(J_P) \quad (3)$$

where, $J_P = u(1-w_p)/nD_P$

$$Q_P = \rho n^2 D_P^4 K_T(J_P) \quad (4)$$

$$Power = 2\pi n Q_P \quad (5)$$

식 (6)은 타의 하중을 계산하기 위한 수식을 보여주고 있으며, Fujii and Tsuda (1961, 1962)의 경험식을 기반으로 양력 계수의 기울기를 추정하였다. 수학적모형을 구성하는데 모형시험 결과 및 경험식을 혼용하였기 때문에, 구성된 조종 운동방정식 및 유체동역학적 특성이 잘 묘사되는지 검증할 필요가 있었다. 선항연구에서 검증한 모델을 동일하게 이용하였고, Fig. 2와 같이 대상 선박의 35° 선회 시 조종 운동을 설계 흡수와 밸러스트 흡수에서 검증한 결과만 발췌하였다. 여기서, 정상선회에 도달했을 때 궤적의 일부에 오차가 보이기는 하지만, 허용 가능한 수준이라고 판단하였다. 식 (7)은 풍하중을 구하기 위한 수식을 보여주고 있고, 식 (8)은 풍하중 계산에 필요한 상대 속도, 상대 입사각 계산식이다. 각각의 계수는 풍동 시험 결과로부터 획득하였으며,

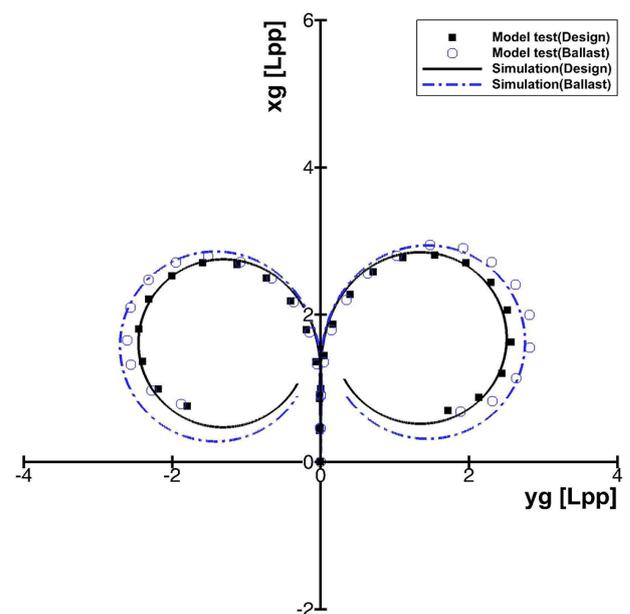


Fig. 2 35° turning trajectories acquired from simulations and free-running model tests (You et al., 2017a)

매 순간 선박의 운동 정보와 바람의 정보를 고려하여 풍하중을 추정하였다. 식 (9)는 파랑 하중을 추정하기 위한 수식을 보여 주고 있다. 평균파랑표류력 QTF는 HYDROSTAR를 이용하여 계산하였다. 계산 결과 및 계산과정에 대해서는 이전 연구에서 상세히 기술되어 있다 (You et al., 2018a).

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (6)$$

where,

$$\begin{aligned} F_N &= 0.5 * \rho A_R^2 U_R^2 C_L \sin \alpha_R \\ C_{L,\alpha} &= \frac{6.13A}{A+2.25} \\ \alpha_R &= \delta - \gamma(\beta - l_R' r') \\ X_{WI} &= C_X' \frac{1}{2} \rho_{air} A_T V_r^2 \\ Y_{WI} &= C_Y' \frac{1}{2} \rho_{air} A_L V_r^2 \\ N_{WI} &= C_N' \frac{1}{2} \rho_{air} A_L L_{OA} V_r^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u_{rWI} &= V_{WI} \cos(\psi_{WI} - \psi) + u \\ v_{rWI} &= V_{WI} \sin(\psi_{WI} - \psi) + v \\ V_{rWI} &= \sqrt{(u_{rWI})^2 + (v_{rWI})^2} \\ \psi_{rWI} &= \tan^{-1}(v_{rWI}/u_{rWI}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X_{WA}, Y_{WA}, N_{WA} &= 2 \int_0^\infty \frac{QTF(U, w, \alpha)}{\zeta_A^2} E(w) dw \\ E(w) &= \frac{5}{16} H_s^2 \frac{w_m^4}{w} \exp - \frac{5}{4} \left(\frac{w_m}{w}\right)^4 \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 룩업테이블 방식의 분당회전수 증감 방법

이전 연구(You et al., 2017a; You et al., 2017b; You et al., 2018a)에서 AIS 또는 실선 운항데이터에 기록된 운항 속도를 기준으로 운항 시뮬레이션 수행하는데, 매 순간의 추진기 작동 상태(분당회전수)의 추정이 중요했다. 즉, 운항자가 항해 하는 동안 실시간 명령하는 분당회전수, 동력 등을 모르는 상태에서 (특히, AIS 데이터만 제공되는 경우), 겉으로 드러난 선박의 속도, 경로, 선수각 등의 정보로부터 분당회전수, 동력, 연료 소모량 등을 추정하고자 했다. 따라서, 분당회전수의 증감을 결정하기 위해 경험적으로 구성된 룩업테이블이 필요했다. 다만, 속도 변화의 폭에 따라 분당회전수 증감을 위해 구성된 룩업테이블이 튜닝되어야 할 필요가 있었다. You et al. (2017a)는 전체 항해 기간에 선박 속도 변화의 폭이 컸고, You et al. (2018b)는 일정한 설계속도 (또는 기준속도)를 따라 운항 시뮬레이션을 수행했다는 차이가 있었다.

$$\Delta U = U_{COM} - U \quad (10)$$

Table 3 RPM increment according to the speed difference considered in the previous research (You et al., 2017a)

You et al., (2017a)	
Condition [knots]	RPM command [-]
$\Delta U > 8.0$	+0.6
$8.0 \geq \Delta U > 4.0$	+0.4
$4.0 \geq \Delta U > 0.2$	+0.2
$0.2 \geq \Delta U > -0.2$	Maintained
$-0.2 \geq \Delta U > -4.0$	-0.2
$-4.0 \geq \Delta U > -8.0$	-0.4
$-8.0 \geq \Delta U$	-0.6

이러한 특징을 반영하여 수정된 룩업테이블을 Table 3, 4에서 보여주고 있다. Table 3은 AIS 또는 실선 운항데이터에 큰 폭의 속도 변화가 있었던 경우에 구성된 룩업테이블인 반면, Table 4는 주어진 속도가 일정했던 경우에 구성된 룩업테이블이었다. 분당회전수를 일정하게 유지하는 속도 조건의 크기를 |0.2| knots에서 |0.05| knots로 줄인 것이 특징이라고 볼 수 있다. 식 (10)에서는 룩업테이블에서 분당회전수 증감량의 판단 기준이 되는 속도 조건, 즉 주어진 속도 (또는 명령속도)와 현재 속도의 차이를 수식으로 정의하였다.

Table 4 RPM increment according to the speed difference considered in the previous research (You et al., 2018b)

You et al., (2018b)	
Condition [knots]	RPM command [-]
$\Delta U > 8.0$	+0.4
$8.0 \geq \Delta U > 2.0$	+0.2
$2.0 \geq \Delta U > 0.05$	+0.1
$0.05 \geq \Delta U > -0.05$	Maintained
$0.05 \geq \Delta U > -2.0$	-0.1
$-2.0 \geq \Delta U > -8.0$	-0.2
$-8.0 \geq \Delta U$	-0.4

2.3 엔진-추진기 토크 평형을 이용한 분당회전수 추정

정상 상태에서 운항하는 선박을 가정할 경우, 엔진으로부터 전달된 토크는 실제 추진기 회전에 필요한 토크와 평형을 이루어야 한다. 만약 엔진으로부터 전달된 토크가 추진기 회전에 필요한 토크보다 크다면, 추진기의 분당회전수는 점차 증가할 것이다. 반대로 전달된 토크가 추진기 회전에 필요한 토크보다 작다면, 추진기의 분당회전수는 점차 감소할 것이다. 이러한 관계는 식 (11)의 엔진-추진기 토크 평형식을 통해 쉽게 이해할 수 있다. 본 연구에서는 이전 연구에서 적용되었던 경험적인 분당회전수 증감 방식 대신, 식 (11)을 적용하여 추진기 분당회전수를 추정하고자 했다.

$$Q_E - Q_P = 2\pi I_{PP} \dot{n} \quad (11)$$

$$\dot{n} = \frac{Q_E - Q_P}{2\pi I_{PP}}$$

다만, 식 (11)을 적용하는데 주어진 속도, 분당회전수, 동력으로부터 유추할 수 있는 변수가 다르기 때문에, 몇 가지 가정을 통해 식 (12), (13), (14)와 같이 수정할 필요가 있었다.

먼저, 식 (12)는 주어진 속도를 기준으로 분당회전수 증감을 결정하기 위한 수식을 보여주고 있다. 주어진 속도를 기준으로 엔진으로부터 전달된 토크($Q_{E(given\ speed)}$)를 유추하기 위하여, 설계된 선박의 속도-분당회전수 곡선 (Speed-RPM curve)를 이용하였다. 즉, 주어진 속도, 현재 속도를 알고 있을 때, 속도-분당회전수 곡선으로부터 예상되는 분당회전수를 각각 찾고, 현재 운동상태를 통해 얻은 $K_Q(J_P)$ 를 고려하여 토크를 계산할 수 있다. 여기서, 현재 분당회전수를 알고 있음에도 토크(Q_P)를 추정하는데 속도-분당회전수 곡선을 이용하는 이유는 환경 하중의 크기 변화에 따른 토크의 증가, 감소로 인해 분당회전수 증감이 반대로 결정되는 경우를 피하기 위해서이다. 속도-분당회전수 곡선은 모형 시험 결과와 실선의 시미진을 고려하여 작성되는데, 임의의 시점에 조우한 환경 하중의 크기가 시미진을 초과할 경우, 명령속도에 도달하지 못했음에도 현재 토크(Q_P)가 주어진 토크($Q_{E(given\ speed)}$)보다 크게 계산될 수 있다.

$$Q_{E(given\ speed)} - Q_P = 2\pi I_{PP} \dot{n} \quad (12)$$

$$\rho n_{given\ speed}^2 D_p^5 K_Q(J_P) - \rho n_{current\ speed}^2 D_p^5 K_Q(J_P) = 2\pi I_{PP} \dot{n}$$

$$\dot{n} = \frac{\rho n_{given\ speed}^2 D_p^5 K_Q(J_P) - \rho n_{current\ speed}^2 D_p^5 K_Q(J_P)}{2\pi I_{PP}}$$

식 (13)은 주어진 분당회전수를 기준으로 분당회전수 증감을 결정하기 위한 수식을 보여주고 있다. 주어진 분당회전수에서 엔진으로부터 전달된 토크($Q_{E(given\ RPM)}$)와 현재 분당회전수에서 필요한 토크(Q_P)는 현재 운동상태를 통해 얻은 $K_Q(J_P)$ 를 이용하여 계산하였다.

$$Q_{E(given\ RPM)} - Q_P = 2\pi I_{PP} \dot{n} \quad (13)$$

$$\rho n_{given\ RPM}^2 D_p^5 K_Q(J_P) - \rho n^2 D_p^5 K_Q(J_P) = 2\pi I_{PP} \dot{n}$$

$$\dot{n} = \frac{\rho n_{given\ RPM}^2 D_p^5 K_Q(J_P) - \rho n^2 D_p^5 K_Q(J_P)}{2\pi I_{PP}}$$

식 (14)는 주어진 동력을 기준으로 분당회전수 증감을 결정하기 위한 수식을 보여주고 있다. 주어진 동력으로부터 현재 분당회전수와 식 (5)를 이용해 토크($Q_{E(given\ power)}$)를 유추할 수 있다.

$$Q_{E(given\ power)} - Q_P = 2\pi I_{PP} \dot{n} \quad (14)$$

where,

$$Q_{E(given\ power)} = \frac{P_{given}}{2\pi n}$$

$$Q_{E(given\ power)} - \rho n^2 D_p^5 K_Q(J_P) = 2\pi I_{PP} \dot{n}$$

$$\dot{n} = \frac{Q_{E(given\ power)} - \rho n^2 D_p^5 K_Q(J_P)}{2\pi I_{PP}}$$

3. 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 대상 선박이 2010년 11월 22일 09시부터 2010년 12월 06일 09시까지 약 14일간 운항했던 기록을 따라 운항 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3과 같이 대만 인근에서부터 마다가스카르 인근까지 운항하였다. 저장장치의 운

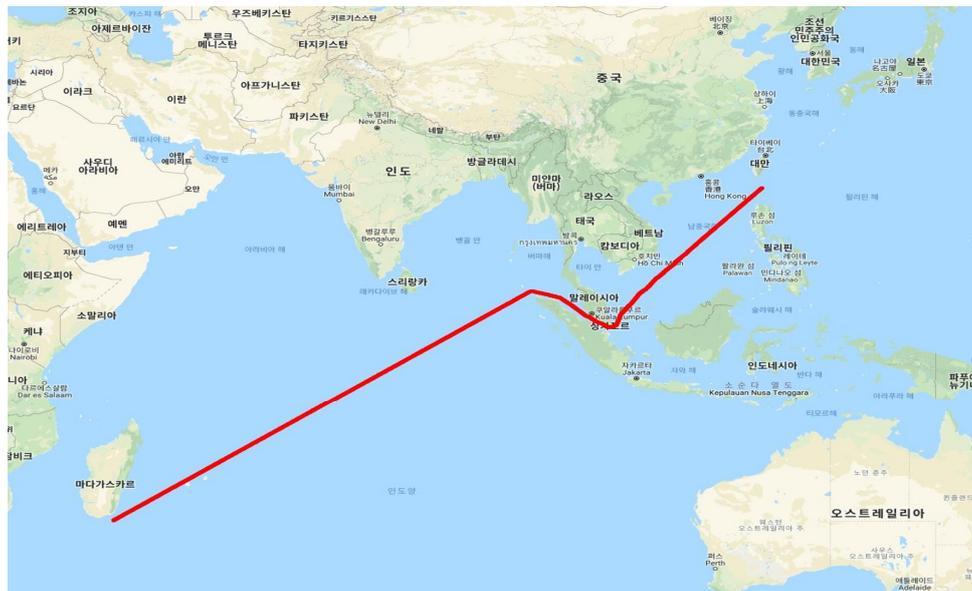


Fig. 3 Sea routes of LNG IMO for about 14 days

용에 따라 일부 계측 간격이 달라진 경우가 있지만, 대체로 10분 간격으로 기록되어 있었다. 운항 시뮬레이션에 이용한 정보는 시간(UTC), 경위도 좌표, 침로(COG), 대지속도(SOG), 선수미 흘수, 분당회전수, 동력, 계측된 바람의 상대속도, 상대 입사각, 계측된 파도의 유의파고, 평균파주기, 상대 입사각 등이다.

Fig. 4는 실선 운항데이터에 기록된 바람의 상대속도 및 유의파고를 보여주고 있다. 선박이 조우했던 최대 바람의 상대속도는 약 45 knots 정도였으며, 최대 유의파고는 약 4 m 정도였다. 대체로 바람, 파도의 환경 하중이 매우 작았던 3~5일 차는 말라카해협을 통과했던 기간이었다. 바람 및 파랑의 상대 입사각은 이전 연구(You et al., 2017b; You et al., 2018a)에서 정리되어 있는데, 말라카 해협을 통과하던 3~5일 차에 바람 및

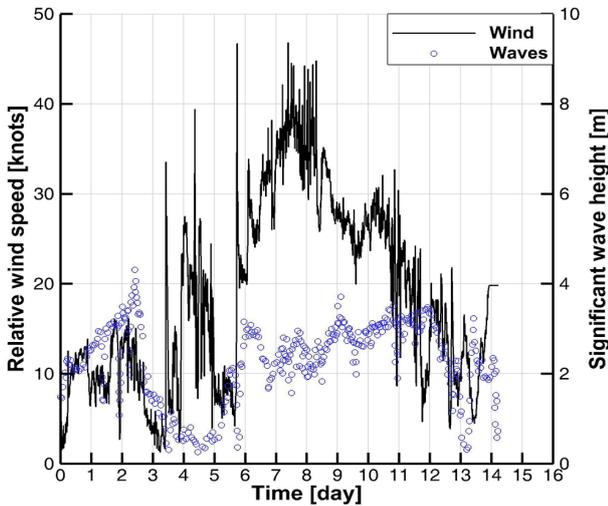


Fig. 4 Time histories of measured relative wind speed and significant wave height

파랑의 크기가 매우 작은 대신 상대 입사각이 0~360° 사이에서 불규칙적으로 분포하고 있었다. 운항 시뮬레이션은 Fig. 5와 같이 수행되었다. 먼저, 실선 운항데이터에서 획득한 초기조건에 맞추어 초기화를 하고, 주어진 상태변수를 이용하여 조종 운동방정식을 풀이한다. 위치, 속도, 가속도 등을 업데이트하고, 도착 위치에 도달했는지를 판단하였다. 도달하지 않았다면 기록된 선박의 위치를 경로점으로 가정하여 추종하는데 필요한 타각을 계산하고 입력한다. 분당회전수는 주어진 속도, 분당회전수, 동력 중 기준이 되는 값에 맞추어 앞에서 설명한 방법에 따라 업데이트한다. 업데이트된 상태변수를 고려하여 조종운동방정식을 풀이하는 과정을 반복함으로써, 운항 시뮬레이션을 하도록 구성되어 있다.

선행연구에서 록업테이블 방식을 이용했을 때, 운항 시뮬레이션을 수행한 절차는 회색 음영으로 표시한 것과 같다. 본 연구에서 주어진 속도를 기준으로 한 운항 시뮬레이션을 할 때 록업테이블 방식을 엔진-추진기 토크 평형 방식으로 수정했기 때문에, 분당회전수 증감량 결정 부분에 회색 음영과 흰색 음영으로 나란히 표시하였다. 또한, 기록된 분당회전수를 추종하거나 기록된 동력을 추종할 때, 분당회전수 증감을 결정함에 차이가 있다고 판단하여 흰색 음영으로 별도 표시하였다.

먼저, 분당회전수 증감 방식의 변화에도 불구하고 운항 시뮬레이션이 잘 수행되었는지 확인할 필요가 있었다. Fig. 6과 7은 각각 속도를 기준으로 수행한 시뮬레이션에서 계측값과 계산값의 차이를 보여주고 있다. Fig. 6은 전체 항해 기간(약 14일)의 비교 결과를, Fig. 7은 7.2일~7.8일에 해당하는 기간의 비교 결과를 보여주고 있다. 대체로 두 방법 모두 기록된 운항속도를 잘 추종하는 것으로 보였으나, 엔진-추진기 토크 평형식을 이용했을 때 더 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 록업테이블을 이용했을 때 불완전한 튜닝으로 인해 계측값과

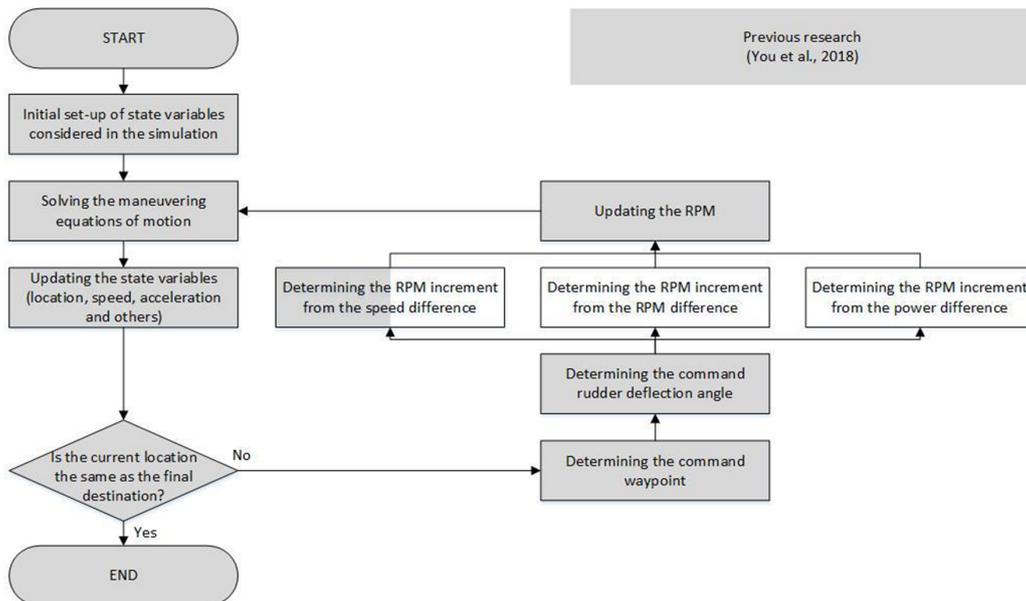


Fig. 5 Flowchart to estimate the full-scale performance of the LNGC by following the given speed, RPM, and power

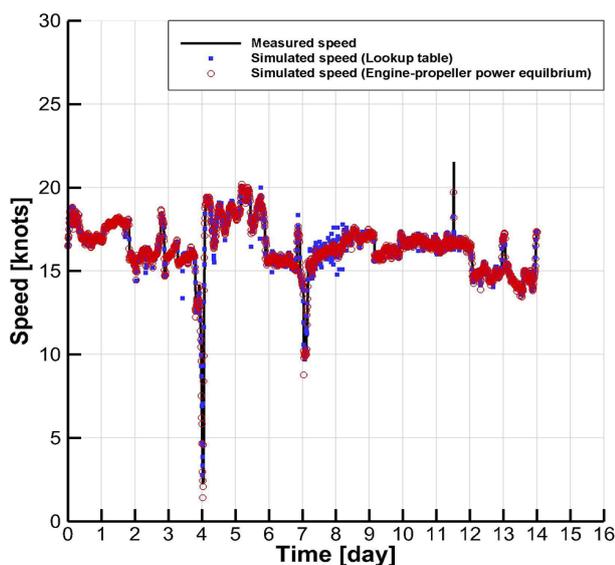


Fig. 6 Time histories of measured speed and simulated speeds considering the lookup table and engine-propeller torque equilibrium for 14 days

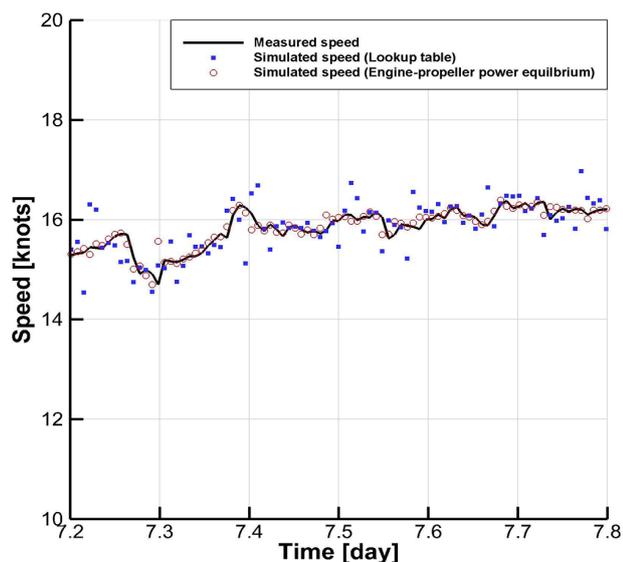


Fig. 7 Time histories of measured speed and simulated speeds considering the lookup table and engine-propeller torque equilibrium from (7.2 to 7.8) day

계산값에 오차가 발생하는 경우가 관찰되었고, 특히 7.2일~7.8 일 차에 오차가 집중적으로 있었다. 본 연구에서 엔진-추진기 토오크 평형식을 적용함으로써, Fig. 6, 7에서 볼 수 있는 것처럼 속도의 오차가 뚜렷하게 감소하였다.

4. 시뮬레이션 결과 분석

속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 한 각각의 시뮬레이션 결과 실선 운항데이터에 기록된 선박의 위치와 일치함을 확인

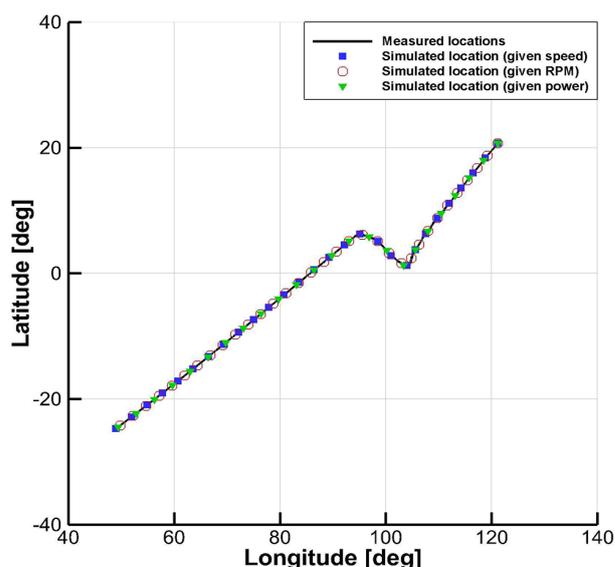


Fig. 8 Entire sea routes acquired from measurement device and simulations

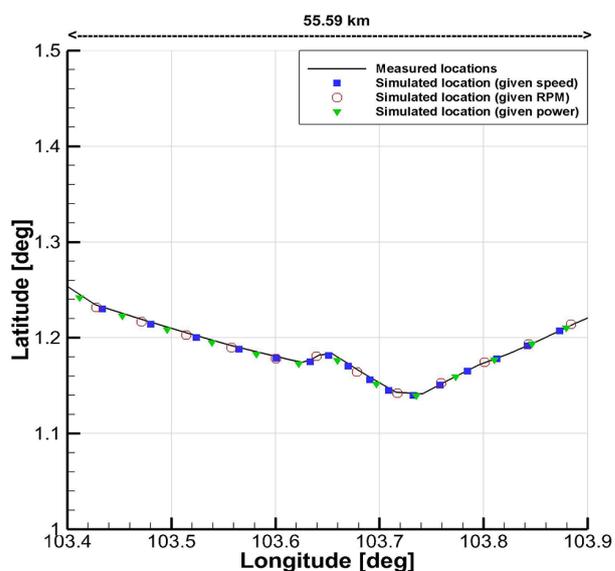


Fig. 9 Partial sea routes near the Strait of Malacca acquired from measurement device and simulations

할 수 있었다. Fig. 8은 예측된 경위도 좌표와 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 했을 때, 계산된 선박의 위치를 표시한 것이며, Fig. 9는 대각도 항로변경이 있었던 부분을 확대한 것이다. 주어진 변수와 관계없이, 계산된 위치가 예측된 위치와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.1 기록값, 명령값, 계산값의 비교

주어진 속도, 분당회전수, 동력을 각각 기준으로 시뮬레이션 했을 때, 실선 운항데이터에 기록된 값, 매 순간 시뮬레이션에서 명령했던 값, 계산된 값을 비교함으로써 시뮬레이터의 타당성을 살펴보고자 했다. Fig. 10은 주어진 속도를 기준으로 시뮬

레이션한 경우 비교 결과이다. 세 값 모두 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 전체 14일 동안의 시뮬레이션을 했고, 약 10분 이내의 오차로 도착점에 도달했다. 10분 간격으로 기록된 속도, 위치 등을 이용하여 수행한 운항 시뮬레이션 개념상 무시할 만한 차이로 보인다.

Fig. 11은 주어진 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션한 경우 비교 결과이다. 여기서 계측된 값에 비해 명령값, 계산값의 시간이 4일 차부터 약 0.5일간 지연되었고, 7일 차에는 약 0.8일 정도 지연된 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 이용된 운항 시뮬레이션 기법은 기록된 선박의 위치를 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 따라 운항하는 선박을 모사한 것이다. 그런데 말라카 해협 부근에서 분당회전수가 매우 작았고, 환경 하중의 크기는 작은

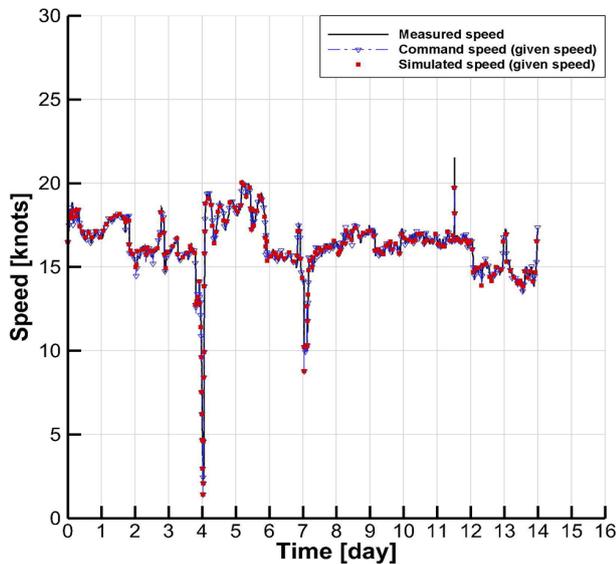


Fig. 10 Time histories of measured speed, command speed, and simulated speed

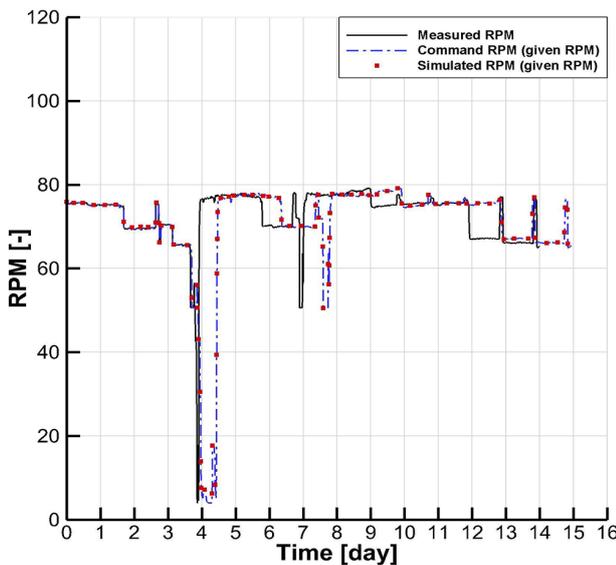


Fig. 11 Time histories of measured RPM, command RPM, and simulated RPM

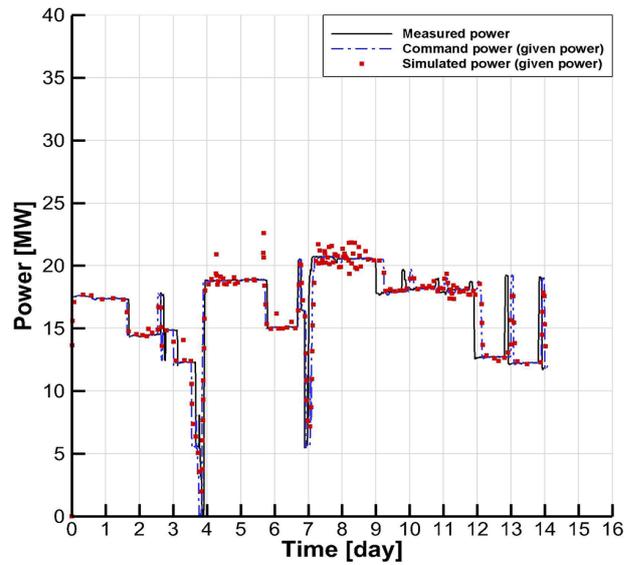


Fig. 12 Time histories of measured power, command power, and simulated power

대신 상대 입사각이 매우 불규칙했다. 따라서, 경로점을 추종하기 위해 더 많은 타각 제어가 필요했고, 선박의 속도가 기록된 속도보다 더 낮게 계산되었을 것으로 예상된다. 물론, 저속 조건의 조종 운동을 정확히 모사하기 위하여 별도의 모형시험, 수확모형을 이용해야 한다는 연구 결과를 고려할 때, 수확모형의 불확실성 또한 오차의 원인이 될 수 있다 (Yoon and Kim, 2005; Kim et al., 2008). 전체 14일 동안의 시뮬레이션을 했을 때 약 20시간 정도 늦게 도착점에 도달했으며, 약 6% 정도의 시뮬레이션 시간의 증가했다.

Fig. 12는 주어진 동력을 기준으로 시뮬레이션한 경우 비교 결과이다. 3일 차에 미미한 시간 촉진, 7일 차에 미미한 시간 지연을 관찰할 수 있다. 4~6일 차, 7~9일 차에 일정한 동력이 요구되었음에도 실제 계산된 동력이 불규칙한 흔들림을 보였는데, 불규칙한 환경 하중의 작용에 따라 침로 유지를 위해 조타 행위가 발생하고, 그로 인해 동력의 추정과 관련된 변수가 흔들렸기 때문으로 예상된다. 전체 14일 동안의 시뮬레이션을 했을 때 약 2시간 정도 늦게 도착점에 도달했으며, 약 0.6% 정도의 시뮬레이션 시간의 증가했다.

4.2 주어진 속도, 분당회전수, 동력에 따른 운항성능 추정

Fig. 13은 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션했을 때, 시간에 따라 계산된 선박의 속도와 실선 운항데이터에 기록된 운항속도를 비교한 것이다. Fig. 10에서 주어진 속도를 기준으로 시뮬레이션했을 때는 기록값과 계산값의 시계열이 일치했던 반면, Fig. 11, 12에서는 시간 촉진 또는 지연이 있었다. Fig. 13에서는 그 원인을 명확히 설명할 수 있다. 먼저, 주어진 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션할 때, 4일 차, 7일 차 부근에서 기록된 속도에 비해 계산된 속도가 느림을 확인할 수 있다. 따라서, 같은 거리를 이동하는데 더 많은 시간이 소요

된다. 속도가 매우 낮은 구간이기 때문에 시간의 증가는 뚜렷하게 나타났고, 그 영향으로 시간 지연이 나타났음을 알 수 있다. 주어진 동력을 기준으로 시뮬레이션할 때, 1일 차, 3일 차 부근에서 예측된 속도에 비해 계산된 속도가 높음을 확인할 수 있다. 따라서, 이 구간에서 기록된 시간보다 더 빠르게 이동했음을 알 수 있다. 반면 7~9일 차에는 더 낮은 속도로 이동했고, 이 구간부터 시간 지연이 나타났다. 이전 연구에서 살펴봤던 것처럼, 계산된 속도, 분당회전수, 동력 세 값이 예측값과 일치하는 것은 다양한 장비의 운용, 건조된 선박의 상태, 예측된 정보의 불확실성, 시뮬레이션에 이용된 수학적 모형과 실제 선박의 차이가 있기 때문에 불가능하다. 대상 선박의 경우 주어진 속도, 동력, 분당회전수 순서로 계산된 속도와 실선 운항데이터에 기록된 속도의 정성적, 정량적 차이가 작았다.

운항 시뮬레이션을 주어진 분당회전수, 동력을 기준으로 확대 적용하면서 왜 시간 축진 또는 지연이 발생했는지는 본 연구에서 이용된 시뮬레이션 개념과 관련되어 있다. 즉, AIS 또는 실선 운항데이터에 기록된 선박의 위치를 경로점으로 가정하여 추종하되, 주어진 속도를 기준으로 시뮬레이션할 경우 이동 거리, 이동 속도가 비슷하기 때문에 이동 시간이 거의 일치한다. 하지만, 속도, 분당회전수, 동력이 완전하게 일치하지 않는 수학적 모형의 특성상 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션할 경우 속도를 맞출 수 없고, 그로 인해 시간이 축진되거나 지연된다. Fig. 14는 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션했을 때 시작점의 위치에서부터 이동 거리에 따라 계산된 선박의 속도와 실선 운항데이터에 기록된 운항속도를 비교한 것이다. 즉, 출발점에서부터 이동한 거리에 따라 속도의 변화를 도시한 것이다. 각각의 구간에서는 예측된 속도와 계산된 속도 사이에 경향성이 일치함을 확인할 수 있다.

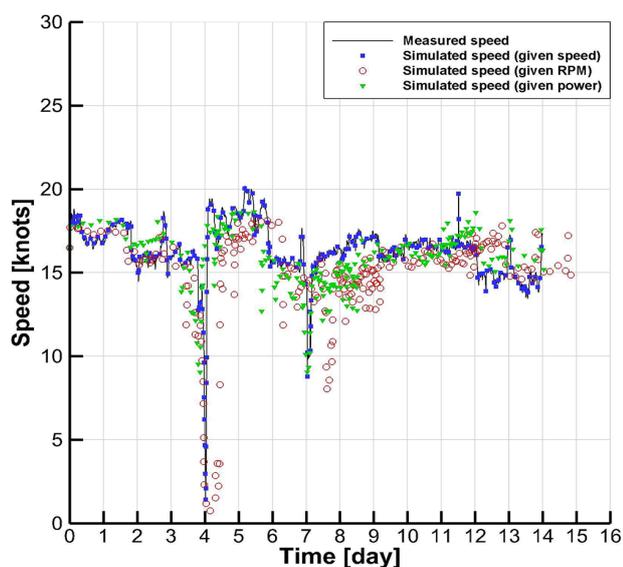


Fig. 13 Time histories of measured speed and simulated speeds: given speed, given RPM, and given power condition

Fig. 15는 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션했을 때 시간에 따라 계산된 분당회전수와 실선 운항데이터에 기록된 분당회전수를 비교한 것이다. 기록된 분당회전수와 비교할 때, 주어진 속도를 기준으로 시뮬레이션한 경우 분당회전수의 편차가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 기록된 속도와 운항 시뮬레이션 기법의 특징과 관련이 있다. 실제 운항에서는 불규칙한 환경 하중으로 인해 일정한 동력을 유지 하더라도, 예측된 선박의 운항속도는 끊임없이 변화할 수밖에 없다. 시뮬레이션 되는 선박의 속도가 실선운항데이터에 기록되어 있는 변화하는 속도를 추종하기 위해서 시뮬레이션에서의

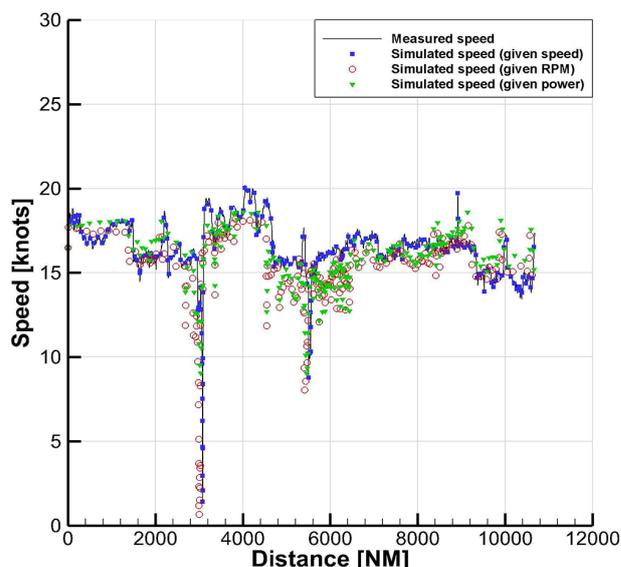


Fig. 14 Measured speed and simulated speeds from departing terminal to the final destination according to the distance: given speed, given RPM, and given power condition

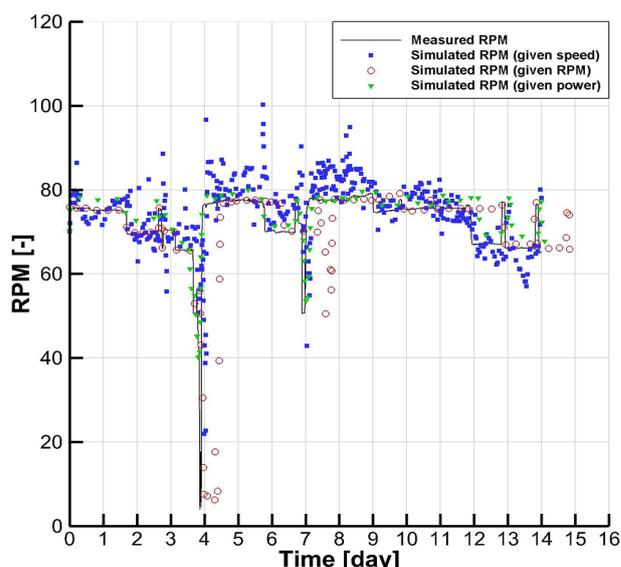


Fig. 15 Time histories of measured RPM and simulated RPMs: given speed, given RPM, and given power condition

Table 5 Comparison of the measured RPM and simulated RPM and error

	RPM [-]	Error [%]
Measured	72.69	-
Given speed	74.66	2.71
Given RPM	70.31	-3.27
Given power	74.64	2.68

분당회전수의 증감을 반복적으로 명령받는데, 분당회전수 증감 속도와 비교해 시뮬레이션 된 선박의 속도가 빠르게 변화하지 않기 때문에 실제 분당회전수보다 더 크게 증가한다. 초과 입력된 분당회전수로 인해 선박의 운항속도가 명령속도를 초과할 때, 다시 더 낮은 속도를 추종하기 위하여 반대로 분당회전수를 낮게 설정하게 된다. 식 (11)에서 보는 것처럼 분당회전수 증감은 토오크 차이에 비례해서 결정된다. 즉, PID 제어에서 P계인과 같은 효과가 나타나며, 이로 인해 분당회전수가 임의의 중간값을 기준으로 상하로 진동하게 된다. 반면, 주어진 분당회전수를 추종하는 경우 거의 진동이 없는 상태로 계측값과 유사한 경향성을 보인다. 주어진 동력을 기준으로 시뮬레이션하는 경우에도 흔들림이 거의 관찰되지 않았다.

선행연구에서 분당회전수, 동력을 전체 항해 기간에 대해 평균한 값으로 운항성능을 분석한 바 있다. Table 5는 전체 항해 기간에 계산된 분당회전수의 평균값을 정리한 것이다. 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션 된 평균 분당회전수를 비교함에 한 가지 문제가 발견되었다. 즉, 시간 축진 또는 시간 지연 효과에 따라 오차가 큰 구간이 평균값에 뚜렷한 영향을 줄 수 있다는 것이다. 즉, Table 5에서 주어진 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션했을 때, 평균분당회전수가 매우 작아진 것을 알 수 있는데, Fig. 11에서 본 것처럼 저속 구간을 통과하는데 더 오랜 시간이 걸렸기 때문에, 평균 분당회전수가 뚜렷하게 작아진 것이다. 이를 통해, 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션을 수행할 때는 시간에 따른 비교, 시간에 따른 평균값을 기준으로 비교, 분석하는데 주의해야 한다. 대신, Fig. 14와 같이 공간상의 위치, 또는 이동 거리를 기준으로 자유항주 시험 결과와 직접 비교하는 데 유용할 것으로 생각한다.

Fig. 16은 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션했을 때 시간에 따라 계산된 동력과 실선 운항데이터에 기록된 동력을 비교한 것이다. 분당회전수의 경우와 마찬가지로 기록된 동력과 비교할 때, 주어진 속도를 기준으로 시뮬레이션한 경우 동력의 편차가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 식 (4), (5)에서 보는 것처럼, 동력은 n^3 에 비례하므로, 동력의 편차는 더 증폭되는 경향이 있다. 따라서 임의의 중간값을 기준으로 큰 폭의 진동이 관찰된다. 즉, 장기간의 평균값으로는 유의미한 해석을 할 수 있으나, 짧은 순간의 동적 거동을 분석하는데 주의해야 한다. 반면, 주어진 분당회전수나 동력을 기준으로 시뮬레이션하는 경우 거의 진동이 없는 상태로 계측값과 유사한 경향성을 보인다. 다만, 속도 차이로 인해 뚜렷한 시간 축진 또는 지연이 있음을 확인할 수 있다.

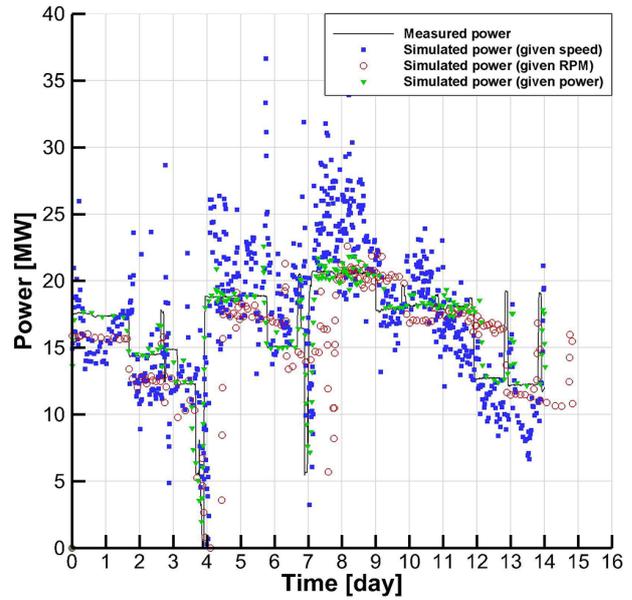


Fig. 16 Time histories of measured power and simulated powers: give speed, given RPM, and given power condition

Table 6 Comparison of the measured power and simulated RPM and power

	Power [MW]	Error [%]
Measured	16.59	-
Given speed	16.74	0.97
Given RPM	14.84	-10.55
Given power	16.44	-0.24

Table 6은 전체 항해 기간에 계산된 동력의 평균값을 정리한 것이다. Table 5와 마찬가지로 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션한 평균 동력을 계산함에 문제가 발견되었다. 시간 축진 또는 시간 지연 효과가 평균값에 영향을 주는 것이다. Table 6에서도 주어진 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션할 때, 평균 동력이 매우 작아지는 문제를 볼 수 있다. 앞에서 언급한 것처럼, 주어진 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션을 수행할 때는 경로점이나 이동 거리를 기준으로 자유항주 시험 결과와 비교하는 것이 더 적절한 비교가 될 수 있다고 생각한다. 주어진 동력을 기준으로 시뮬레이션이 수행된 경우는 주어진 속도를 기준으로 계산된 경우와 유사한 정도의 시계열을 보여주지만, 시간 축진 또는 지연에 주의해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 조선소, 모형시험소, 선주의 요구에 대응하기 위해 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 운항시뮬레이션을 수행하는 방법을 각각 제안하였다. 특히, 기존에 제안된 운항 시뮬레이션 연구에서 경험적으로 구성했던 룩업테이블 (look-up table) 방식의 분당회전수 증감에서 벗어나, 엔진-추

진기 토오크 평형을 고려하였다. 본 연구를 통해 세 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기존에 제안된 운항 시뮬레이션 연구에서 경험적으로 구성했던 룩업테이블 방식의 분당회전수 증감 제어에서 벗어나, 선박 추진기 계통의 동특성을 고려한 엔진-추진기 토오크 평형을 적용함으로써, 더 작은 속도 오차로 운항 시뮬레이션이 가능함을 확인하였다.

둘째, 주어진 속도를 기준으로 운항 시뮬레이션을 했을 때 분당회전수, 동력이 임의의 중간값을 기준으로 진동하는 형태의 결과를 얻게 된다. 물론, 장기간의 평균값으로는 유의미한 해석을 할 수 있으나, 짧은 순간의 동적 거동을 분석하는데 주의해야 한다. 반면, 전체 운항 시뮬레이션에 소요되는 시간은 속도를 기준으로 매우 작은 오차를 가지기 때문에, 시간 축진 또는 지연효과 없이 직접적으로 비교하는데 용이하다는 장점이 있다.

셋째, 주어진 분당회전수, 동력을 기준으로 시뮬레이션을 수행할 때 시간 축진 또는 지연이 발생함을 확인했다. 이와 같은 시간 축계의 지연효과는 주어진 분당회전수를 기준으로 시뮬레이션했을 때 저속구간에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 동력을 기준으로 시뮬레이션했을 때는 시간 축진 또는 지연효과가 작기는 하지만, 나타나고 있음을 확인했다. 따라서, 주어진 분당회전수 또는 동력을 기준으로 운항 시뮬레이션에 이용된 수학적모형이 갖는 제한 사항과 적용 가능 범위를 반드시 확인할 필요가 있으며, 경로점 또는 이동 거리를 기준으로 운항성능을 직접 비교할 때 유용할 것으로 생각된다.

본 연구를 통해, 조선소, 모형시험소, 선주의 필요에 따라 주어진 속도, 분당회전수, 동력을 기준으로 실선운항성능을 각각 추정할 수 있음과 각각의 방법에서 주의해야 하는 사항을 확인하였다. 추후, 조선소, 모형시험소, 선주 등에서 요구되는 실선 성능 추정 목적에 따라 합리적인 결과를 제공하는데 효용성이 있을 것으로 기대한다.

Nomenclature

Abbreviation	Full meaning
DOF	Degree of freedom
RPM	Revolution per minute
IoT	Internet of Things
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
LNGC	Liquefied Natural Gas Carrier
POW	Propeller Open Water
IMO	International Maritime Organization
QTF	Quadratic Transfer Function
AIS	Automatic Identification System
UTC	Universal Time Coordinated
COG	Course Over Ground
SOG	Speed Over Ground
LNG	Liquefied Natural Gas

Reference

- Ando, H., 2017. Activities of smart ship application platform 2 project (SSAP2), *International Marine Purchasing Association (IMPA)*, London, UK.
- Ball, M., Basile, A., & Veziroglu, T.N., 2015. *Compendium of hydrogen energy – volume 4: hydrogen use, safety and the hydrogen economy*, Woodhead publishing, Cambridge, UK.
- Degiuli, N., Ćatipović, I., Martić, I., Werner, A., & Ćorić, V., 2017. Increase of ship fuel consumption due to the added resistance in waves, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment System*, 5(1), pp.1–14.
- 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.
- Johnson, H., & Styhre, L., 2015. Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transportation Research Part A*, 71, pp.167–178.
- 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., Yeo, D., Rhee, K., & Kim, D., 2008. Prediction of manoeuvrability of a ship with low forward speed in shallow water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.280–287.
- Kim, M., Hizir, O., Turan, O., Day, S., & Incecik, A., 2017. Estimation of added resistance and ship speed loss in a sea way, *Ocean Engineering*, 141, pp.465–476.
- Lu, R., Turan, O., & Boulougouris, E., 2013. Voyage optimisation: prediction of ship specific fuel consumption for energy efficient shipping, *Low Carbon Shipping Conference*, London.
- Luo, S., Ma, N., Hirakawa, Y., 2016. Evaluation of resistance increase and speed loss of a ship in wind and waves. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1, pp.212–218.
- Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Bitner-Gregersen, E., Shigunov, V., Moctar, O.E., Soares, C.S. Reddy, D.N., & Sprenger, F., 2014. Energy efficient safe ship operation (shopera), *Influence of EEDI on Ship Design*, 24–25 September, London, UK.
- Yoon, H. & Kim, S., 2005. A study on the model test scheme for establishing the mathematical model of hydrodynamic force and moment acting on a slowly moving ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.98–104.

You, Y., Kim, J., & Seo, M., 2017a, A study on the prediction of sailing performance for a LNGC based on the AIS data. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, V54(4), pp.275–285.

You, Y., Kim, J., & Seo, M., 2017b, A feasibility study on the RPM and engine power estimation based on the combination of AIS and ECMWF database to replace the full-scale measurement. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(6), pp.501–514.

You, Y., Kim, J., & Seo, M., 2018a, Prediction of an actual RPM and engine power of an LNGC based on full-scale measurement data. *Ocean Engineering*, 147, pp.496–516.

You, Y., Lee, J., & Kim, I., 2018b, Prediction of the efficient speed of an LNGC with design condition from a direct cost evaluation considering the hydrodynamic characteristics and equipment operation. *Ocean Engineering*, 168, pp.23–40.

You, Y., & Park, H., 2018, Development of a framework to estimate the EEOI of a ship considering the hydrodynamic characteristics and engine mode. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(6), pp.457–465.



유 영 준