

선박의 유체동역학 특성 및 엔진 모드를 고려한 에너지효율운항지수 추정 프레임워크 개발

유영준[†]·박홍래
대우조선해양(주)

Development of a Framework to Estimate the EEOI of a Ship Considering the Hydrodynamic Characteristics and Engine Mode

Youngjun You[†]·Hongrae Park
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd. (DSME)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Since IMO has discussed the effectuation of the EEDI, EEOI and SEEMP, each country, shipping company, shipbuilding company and research institute have been requested to prepare the design, construction and operation of the efficient ship. From the shipbuilding company's point of view, it was necessary to develop a method based on the maneuvering equations of motion in a bid to estimate the EEOI considering the design, model test results and the calculation results of the ship. In this paper, the estimation method of RPM, power and fuel consumption proposed in the previous research was developed to construct a framework that helps in the estimation of the EEOI. It was possible to estimate the EEOI from the estimated ship speed (distance), LNG cargo mass, fuel consumptions and emission factors according to the type of fuel. The rapid increase of the evaluated EEOI was observed when the LNGC with ME-GI engine executing the course changed with a large difference. This prompted the comparison of the type of fuel on the estimated EEOI by considering HFO, LNG fuel and MGO properties.

Keywords : EEOI(에너지효율운항지수), Hydrodynamic(유체동역학), Fuel(연료), Maneuvering(조종), ME-GI engine(ME-GI엔진)

1. 서론

국제해사기구(IMO)는 에너지효율설계지수(EEDI), 에너지효율운항지수(EEOI), 에너지효율관리계획(SEEMP)의 적용에 관하여 해운선사, 조선소, 선급 등의 기관과 논의하고 있으며 (Ball et al., 2015), 5,000 총톤수(gross tonnage) 이상 선박의 에너지효율관리계획의 예시를 제시한 바 있다 (IMO, 2016). 또한, 국제해사기구는 에너지효율관리계획의 일환으로 평가 및 보고가 권고되고 있는 에너지효율운항지수와 관련하여, 해당 지수를 계산하는데 이용되는 수식과 이산화탄소 배출계수(emission factor)를 정리한 바 있다 (IMO, 2009). 이와 같은 국제기구의 에너지효율성과 관련 움직임에 대응하기 위하여, 정부 기관, 해운선사, 조선소, 선급, 연구소 등에서 다양한 연구를 수행하고 있다.

Choi et al. (2010)은 선박 부문의 석유류 수급량 및 배출

계수를 고려하여, 대한민국에서 운항하는 선박에서 배출되는 온실가스 배출량을 추정하였다. Lee and Lee (2016)는 부산항을 기준으로 2011년도부터 2년 간 입·출항한 선박의 데이터를 분석하여 선박의 종류에 따라 배기가스에 포함된 7가지 오염물질(NO_x, SO_x, CO, PM, HC, VOC, CO₂)의 배출량을 추정하였다. Shao (2016)는 미국 환경보전국의 NON-ROAD 모델을 이용하여 배기가스 및 오염물질 배출량을 추정한 바 있다.

Rakke (2016)는 선박자동식별장치(AIS)에 누적되는 다양한 선박의 운항기록 관점에서, 에너지효율성 및 오염물질 배출량을 추정하는 방법을 제시하였다. Smith et al.(2013)은 운항 중인 선박의 에너지효율성 및 온실가스 배출량을 통계적인 방법으로 추정하기도 하였다. Caughpan et al. (2016)은 선박의 에너지효율성과 관련된 규정, 설계요소 등을 정리함으로써, 효율성을 높이는 설계 방안을 탐색하기도 하였다.

Jo et al. (2014)은 실선 운항데이터 분석에 현실적인 제약 사항들을 살펴보기 위하여, 계측되는 장비에 따른 운항데이터의 종류를 정리한 바 있다. You et al., (2017a; 2017b; 2018)은 실선운항데이터, 선박자동식별장치에서 획득한 운항데이터, 기상데이터베이스 등을 조합하여, 운항했던 선박의 운항성능을 추정하고 검증하는 연구를 수행한 바 있다. You et al. (2018b)은 이전 연구에서 개발되었던 운항 중인 선박의 분당 회전수 및 동력 추정 방법에 연료소모량 및 액화천연가스(LNG) 화물창의 증발 가스의 연소량을 기반으로 운항비용을 추정한 뒤, 최적의 운항속도를 제안하기도 하였다.

본 연구에서는 대상 선박의 주요제원 및 중량정보, 저항, 자항 모형시험 결과, 조종 자유항주 모형시험 결과, 파랑 평균 표류력 계산 결과를 기반으로 운항 중인 선박의 에너지효율운항지수를 추정하는 기법을 제안하고, 추정된 에너지효율운항지수의 특성을 분석하는 것을 목표로 하였다 (You and Park, 2018).

먼저, 대상 선박은 선행 연구와 같이 ME-GI 엔진을 탑재한 쌍축 천연가스 운반선으로 선택하였다. 선박자동식별장치에서 동종의 선박이 실제 운항했던 항로를 기준으로 운항 시뮬레이션을 수행하되, 설계속도를 20 knots로 가정하여 설계속도를 추종하도록 운항 시나리오를 가정하였다. 선박의 유체동역학적 특성은 저항, 자항 모형시험 결과, 조종 자유항주 모형시험 결과, 파랑 평균 표류력 계산 결과를 고려하였다. 환경정보는 유럽 중기예보센터(ECMWF) 데이터베이스를 이용하여, 바람 및 파랑 정보를 획득함으로써 환경 하중이 선박의 동적 거동에 미치는 영향을 고려하였다. ME-GI 엔진의 경우 연료로 중유(HFO)를 사용하는 모드와 액화천연가스 및 해상용 경유(MGO)를 조합해서 사용하는 모드로 구분할 수 있다. 같은 운항 시나리오에서 각각의 엔진 모드에 따라 운항 중인 선박의 에너지효율운항지수가 어떻게 변화하는지 계산된 결과를 기반으로 비교·분석하였다.

본 연구를 통해, 에너지효율운항지수를 대상 선박의 주요제원 및 중량정보, 저항, 자항 모형시험 결과, 조종 자유항주 모형시험 결과, 파랑 평균 표류력 계산 결과를 이용하여 임의의 운항 시나리오에 대해서 직접 추정하는 방법을 제시하였다. 개발된 기법 및 절차를 이용하여, 설계단계에서부터 객관적인 절차와 추정된 수치를 근거로 효율적인 선박을 설계할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 대상 선박 및 수학적모형

본 연구에서는 Fig. 1에서 보이는 ME-GI 엔진을 탑재한 액화천연가스 운반선을 대상으로 에너지효율운항지수 추정 및 분석을 수행하였다.

실제 건조되어, 현재 운항 중인 선박을 대상으로 연구를 수행하기는 했지만, 같은 선박의 실선 운항데이터를 확보하지는 못했다. 대신 선박자동식별장치 운항 데이터에 기록된 다른 액화천연가스 운반선의 운항 기록을 확보하여, 유럽 중기예보센터 기상데이터베이스와 조합하여 운항 시뮬레이션을 수행하였다 (You et al., 2017b). 대상 선박의 주요제원 및 중량정보, 저항, 자항 모형시험



Fig. 1 The twin-screw LNGC on ways (SM Eagle)

결과, 조종 자유항주 모형시험 결과, 파랑 평균 표류력 계산 결과는 선행연구에서 기술한 바 있기 때문에 본 논문에서는 개략적인 내용만 기술하였다 (You, 2018; You and Choi, 2017).

2.1 선체, 추진기, 타를 고려한 조종운동방정식

Fig. 2는 본 연구에서 이용된 지구 고정좌표계 및 선체 고정좌표계를 보여주고 있다. 서로 다른 축계를 이용하는 모형시험 결과, 계산 결과는 본 좌표계를 기준으로 다시 정리하였다. o, x_g, y_g 는 각각 지구 고정좌표계의 기준점, 종 방향, 횡 방향 축계를 가리킨다. ϕ 는 위도, λ 는 경도, δ 는 설치된 타의 타각(하첨자에 따라 설치된 방향 구분), ψ 는 선박의 지구 고정좌표계에서의 선수각, β 는 편류각, V_{WT} 는 바람의 속도, ψ_{WT} 는 바람의 방향, ψ_{WA} 는 파도의 방향을 각각 가리킨다.

대상 선박의 조종 운동은 식 (1)을 이용하여 계산된다. 식 (1)에서 m 은 선박의 질량, I_{ZZ} 는 선박의 질량 관성모멘트, u, v 는 선박의 종 방향 속도와 횡 방향 속도, \dot{u}, \dot{v} 은 선박의 속도 시간 변화율, r 은 선박의 $L_{pp}/2$ 위치에서 각속도, \dot{r} 은 각속도의 시간 변화율을 의미한다. 식 (1)의 우변에 있는 X, Y, N 은 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 가리키며, 식 (2)와

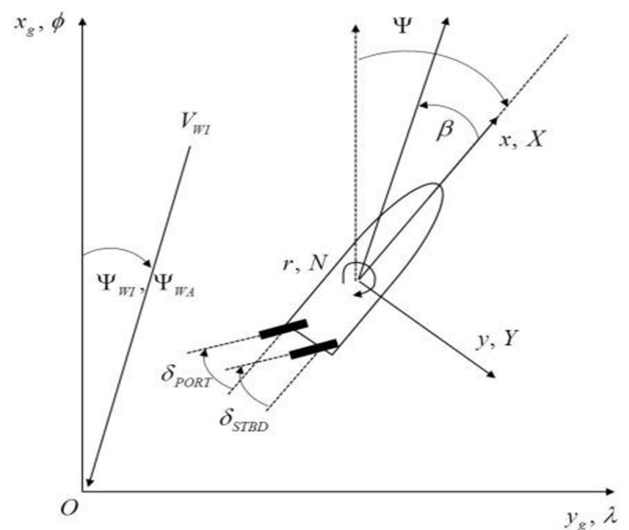


Fig. 2 Coordinates

같이 각각의 성분으로 나누어 정리할 수 있다. 하 첨자 H, P, R, WI, WA는 각각 선체, 추진기, 타, 바람, 파도를 가리킨다.

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

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

조종운동방정식에 선체, 추진기, 타의 특성을 고려한 수학 모형은 선행 연구에서 구체적으로 기술되어 있다 (You, 2018; You and Choi, 2017). 선체와 타에 관한 유체동역학 정보는 경험식을 이용하되, 자유항주시험결과와 비교하여 검증하였다 (Kijima et al., 1990; Fujii & Tsuda, 1961; Fujii & Tsuda, 1962). 추진기에 관한 수학모형은 추진기 단독모형시험결과를 이용하였다.

추정된 에너지효율운항지수의 분석 단계에서 추력, 토오크, 동력 등의 분석이 필요한 관계로, 식 (3)과 Fig. 3을 본 논문에서 기술하였다. 운항 중인 쌍축 선박에서 추력, 토오크, 동력은 식 (3)을 이용하여 계산한다. Fig. 3은 대상 선박에 탑재된 추진기의 단독시험 결과이다. 일반적인 추진기 단독시험 결과의 경향성과 같이, 전진비가 증가함에 따라 추력 계수 및 토오크 계수가 감소하는 경향성을 보여주고 있다. (설계정보의 내부적인 보안 정책에 따라 구체적인 수치는 축계에 표시하지 않았다.)

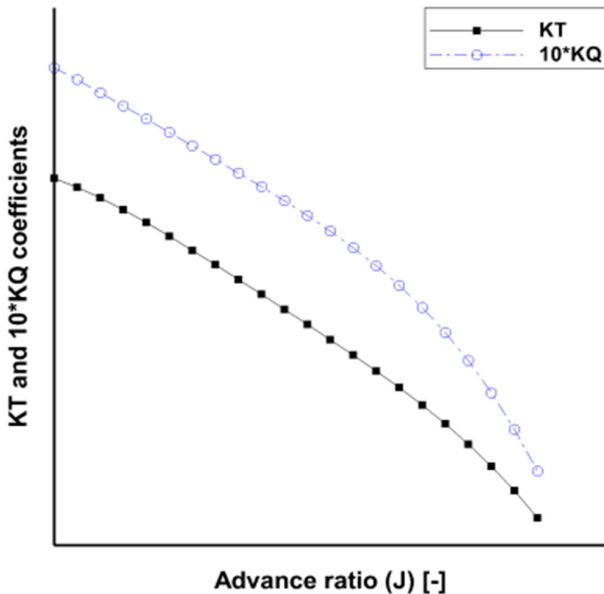


Fig. 3 The thrust and torque coefficients obtained from the propeller open water test

식 (3)에서 t 는 추력감소계수, n 은 분당회전수, D_p 는 추진기 직경, K_T 는 추력계수, J_p 는 전진비, Q 는 토오크, K_Q 는 토오크 계수를 가리킨다. 또한, 하첨자 $PORT$, $STBD$ 는 각각의 추진기가 설치된 방향을 의미한다.

$$\begin{aligned} X_P &= (1-t)\rho n^2_{PORT} D_p^4 K_T(J_{P,PORT}) \\ &\quad + (1-t)\rho n^2_{STBD} D_p^4 K_T(J_{P,STBD}) \\ N_P &= y_P(1-t)\rho n^2_{PORT} D_p^4 K_T(J_{P,PORT}) \\ &\quad - y_P(1-t)\rho n^2_{STBD} D_p^4 K_T(J_{P,STBD}) \\ Q &= \rho n^2_{PORT} D_p^5 K_Q(J_{P,PORT}) + \rho n^2_{STBD} D_p^5 K_Q(J_{P,STBD}) \\ Power &= 2\pi n Q \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 바람 하중

바람 하중은 식 (4), (5)를 이용하여 계산한다. 바람 하중을 구하기 위해서 필요한 바람 하중 계수는 모형시험을 통해 획득하였으며, 선행연구에서 관련 정보를 기술한 바 있다 (You et al., 2018a). 식 (4)에서 C_X , C_Y , C_N 는 무차원화된 풍하중 계수를, A_T 는 수선면 위쪽 종 방향 투영면적을, A_L 은 횡 방향 투영면적을, ρ_{air} 는 공기의 밀도를, L_{OA} 는 선박의 전체 길이를 가리킨다. 식 (5)에서 u_{rWI} 는 바람의 종 방향 상대 속도를, v_{rWI} 는 횡 방향 상대 속도를, V_{rWI} 는 상대속도의 절대값을, ψ_{rWI} 는 바람의 상대 입사각을 가리킨다.

선체에 입사되는 바람의 상대 속도와 상대 입사각을 계산하기 위해서는 선박의 속도, 선수각 외에 지구 고정좌표계에서 바람의 속도와 방향을 알아야 한다. 이 정보는 유럽 중기예보 센터 데이터베이스를 이용하여, 선박자동식별장치에서 획득한 운항시각에 따른 선박의 위치정보를 이용하여 획득하였다.

$$\begin{aligned} X_W &= \frac{1}{2} C_X' \rho_{air} A_T V_{rWI}^2 \\ Y_W &= \frac{1}{2} C_Y' \rho_{air} A_L V_{rWI}^2 \\ N_W &= \frac{1}{2} C_N' \rho_{air} A_L L_{OA} V_{rWI}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_{rWI} &= V_{rWI} \cos(\psi_{rWI} - \psi) + u \\ v_{rWI} &= V_{rWI} \sin(\psi_{rWI} - \psi) + v \\ V_{rWI} &= \sqrt{(u_{rWI})^2 + (v_{rWI})^2} \\ \psi_{rWI} &= \tan^{-1}(v_{rWI}/u_{rWI}) \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 파랑 하중

파랑 하중은 식 (6)을 이용하여 계산되는데, 파랑 평균 표류력만을 조종운동방정식에 파랑 하중으로 고려하였다. 식 (6)에서 QTF 는 파랑 평균 표류력을, w 는 파도의 주파수를, α 는 파도의 입사각도를, ζ_A 는 파의 진폭을, $E(w)$ 는 ITTC 파 스펙트럼을 가리킨다. 선박의 속도, 평균 파도 주기, 파도의 방향을 이용하여 선형보간한 값을 외력으로 고려하였다. 같은 대상 선박의 파랑 하중을 구하는 과정 및 계산 결과는 선행연구에 상세히 기술되어 있다 (You et al., 2018a).

$$\begin{aligned} X_{WA}, Y_{WA}, N_{WA} &= \int_0^\infty \frac{QTF(w, \alpha)}{\zeta_A^2} E(w) dw \\ E(w) &= \frac{5}{16} H_S^2 \frac{w_m^4}{w} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{w_m}{w}\right)^4\right) \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 엔진 특성

연료소모량은 식 (7), (8), (9)를 이용하여 계산한다. 대상 선박에는 2개의 엔진이 설치되며, 좌현과 우현에 설치된 엔진은 같은 방향에 설치된 추진기의 추력 발생에 필요한 동력을 생성한다. 따라서, 각각의 엔진에서 소모한 연료량을 더해 연료소모량을 추정하였다. 서론에서 설명한 것처럼, ME-GI 엔진은 중유를 사용하는 모드와 액화천연가스 및 해상용 경유를 사용하는 모드로 구분된다. 중유를 사용하는 경우에 식 (7)은 FOC가 중유소모량이고, 액화천연가스를 사용하는 경우에 식 (8)은 해상용 경유소모량, 식 (9)는 액화천연가스소모량이다.

$$FOC = Power \times SFOC(power) \tag{7}$$

$$FPOC = Power \times SPOC(power) \tag{8}$$

$$FGC = Power \times SGC(power) \tag{9}$$

탑재된 ME-GI 엔진의 연료소모량 곡선은 Fig. 4에서 보여 주고 있다 (MAN Diesel & Turbo, 2014). Fig. 3과 마찬가지로 내부적인 보안 정책에 따라 구체적인 수치는 축계에 표시하지 않았다.

통상적으로 선박용 엔진은 약 50~70% 정도의 엔진 로드에서 단위 동력을 생산하는데 가장 적은 연료가 소모되도록 설계된다. SFOC 곡선과 SGC 곡선의 경우 약 65~70% 정도의 엔진 로드에서 최소값을 가짐을 확인할 수 있는데, SPOC 곡선의 경우 엔진 로드 증가함에 따라 단위 동력을 생산하는데 더 적은 연료가 소모된다.

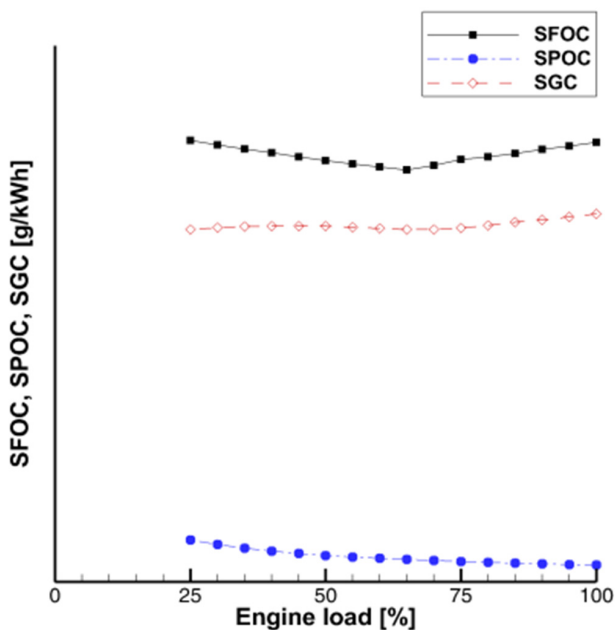


Fig. 4 The SFOC, SPOC, and SGC curves of the equipped ME-GI engines

2.5 에너지효율운항지수 계산식

에너지효율운항지수의 계산은 식 (10)을 이용하여 계산한다. 에너지효율운항지수는 연료소모량($\sum_j FC_j$)에 이산화탄소 배출계수(C_{Fj})를 곱한 값을 화물의 질량(m_{cargo})과 이동 거리(D)를 곱한 값으로 나눈 것으로 정의된다 (IMO, 2009). 통상 운항중인 선박의 연료소모량을 추정하는 것이 어렵기 때문에, 운항데이터를 기반으로 통계적인 접근을 취하거나 설계속도 조건에서 사양서에 명시된 동력을 기준으로 대푯값 형태로 추정해왔다. 하지만, 선행연구에서 제안되었던 분당회전수, 동력, 연료소모량 추정기법을 기반으로 할 경우 식 (10)의 계산에 이용되는 연료소모량을 매순간 직접적으로 추정하는 것이 가능하다 (You et al., 2018a; You et al., 2018b). 따라서, 식 (10)을 이용한 에너지효율운항지수를 조종운동방정식의 풀이 과정에 추정하는 것이 가능하며, 추정된 에너지효율운항지수는 선박의 유체동역학 특성, 운항 시나리오, 기상조건의 변화 등 다양한 조건의 변화 등을 고려했다고 볼 수 있다.

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{cargo} \times D} \tag{10}$$

3. 시뮬레이션 개요

선박자동식별장치 데이터베이스에 누적된 액화천연가스 운반선의 운항기록을 본 논문의 운항 시뮬레이션 시나리오로 선택하였다. 선택한 항로는 Fig. 5에서 보는 것처럼, 나이지리아에서 액화천연가스를 적재한 후, 희망봉, 마다가스카르, 말라카해협을 통과한 후 일본 오사카까지이다. 기록된 선박의 위치와 시간 정보를 이용하여, 유럽중기예보센터 데이터베이스에서 바람 및 파랑정보를 획득하였다.

설계속도 관점에서 대상 선박의 에너지효율운항지수를 분석하는 것이 목표였기 때문에, 설계속도에 준하는 20 knots를 명령속도로 해당 항로를 운항하는 과정을 모사하였다 (본 연구에서는 선박의 동력을 일정하게 유지하는 것이 아니라, 외부 교란이 있더라도 일정한 속도를 추종하도록 시뮬레이션을 수행하였다.).

운항 시뮬레이션 및 에너지효율운항지수 계산과정은 Fig. 6 및 Table 1과 같다. 선박에 대한 유체동역학 관련 정보, 항로 정보, 기상 관련 정보를 기준으로 초기 위치에서 다음 경로점으로 선수각을 찾은 후, 설계속도에 맞추어 분당 회전수를 결정 한다. 일정한 시간 간격에 따라 식 (1), (2), (3), (4), (5), (6)을 고려한 조종운동방정식을 풀이한다. 분당회전수 및 동력을 추정한 후, 식 (7), (8), (9)을 풀이함으로써 엔진 모드에 따라 중유, 액화천연가스, 해상용 경유의 소모량을 추정한다. 식 (10)의 계산에 필요한 화물의 질량은 화물창에 적재한 액화천연가스의 양을 기준으로 추정하고, 이동 거리는 조종운동방정식에서 추정된 종 방향, 횡 방향 속도를 시간 간격으로 적분하여



Fig. 5 The recorded sea route obtained from the AIS data of an LNGC

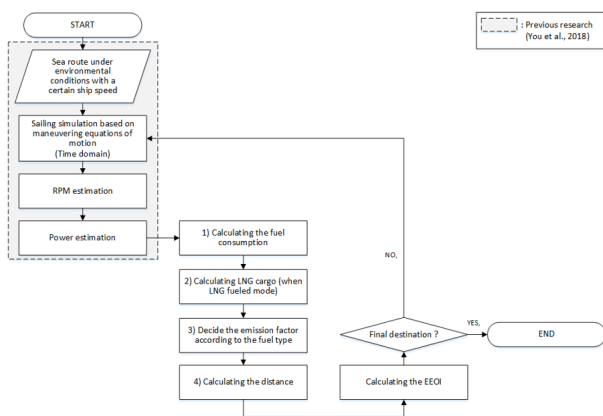


Fig. 6 Flow chart how to calculate the EEOI

Table 1 The steps to estimate the EEOI during the simulation

Step	Role
1	Initial setting at initial location (speed, heading angle, RPM etc.)
2	Solving the maneuvering equation of motion ((1), (2), (3), (4), (5), (6))
3	Estimating the fuel consumption (7), (8), (9)
4	Calculating the EEOI (10)
5	Finishing the simulation

추정할 수 있다. 연료소모량은 추정된 동력을 이용하여, 식 (7), (8), (9)를 계산하여 구한다. 배출계수는 사용되는 연료에 따라 사용한다. 이산화탄소 배출계수는 중유, 액화천연가스, 해상용 경유를 3.1144, 2.7500, 3.2060 t-CO₂/t-Fuel를 가정하였다 (IMO, 2009). 이 계산 과정을 시작위치에서부터 도착위치까지 반복한다 (단, 계산과정에서 소모된 연료에 따른 배수량의 변화는 없다고 가정하였다.).

Fig. 7은 운항 시뮬레이션 동안 대상 선박이 만났던 바람의 속도와 유의파고의 시계열이다. 5~6일 차에 희망봉을 통과하는 시점에 가장 큰 환경 하중이 발생했고, 다른 구간에서는 대체로 온화한 기상상태였던 것으로 생각된다.

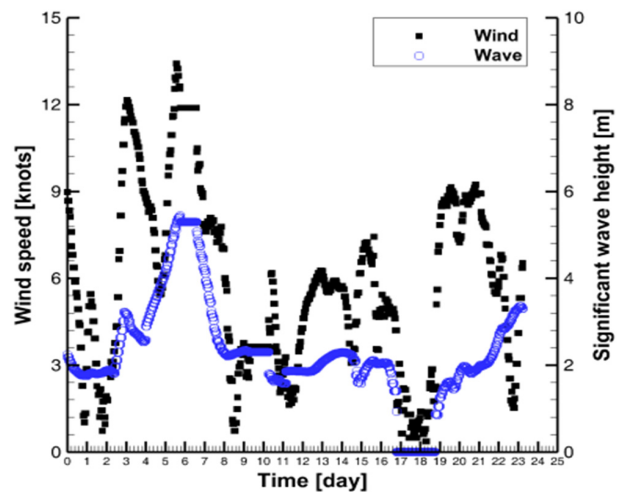


Fig. 7 The time series of the environmental conditions during the voyage

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 대상 선박의 동적 거동, 분당 회전수 및 동력추정

같은 대상 선박, 같은 경로의 운항 시뮬레이션에 대한 타당성 검증은 선행 연구에서 수행된 바 있기 때문에, 본 논문에서는 에너지효율운항지수의 추정에 관한 결과와 분석에 초점을 맞추어 결과를 정리하였다 (You et al., 2018b)

Fig. 8은 설계속도인 20 knots를 기준으로 운항 시뮬레이션을 수행했을 때, 전체 운항 기간 선박의 종 방향, 횡 방향 속도를 보여주고 있다. 일부 구간에서 종 방향 속도의 뚜렷한 감소, 횡 방향 속도의 뚜렷한 증가를 볼 수 있다. 속도의 급격한 변화가 관찰된 위치는 Fig. 9에 점으로 표시해 두었는데, 말라카 해협과 오사카항의 입구 근처의 해역이다.

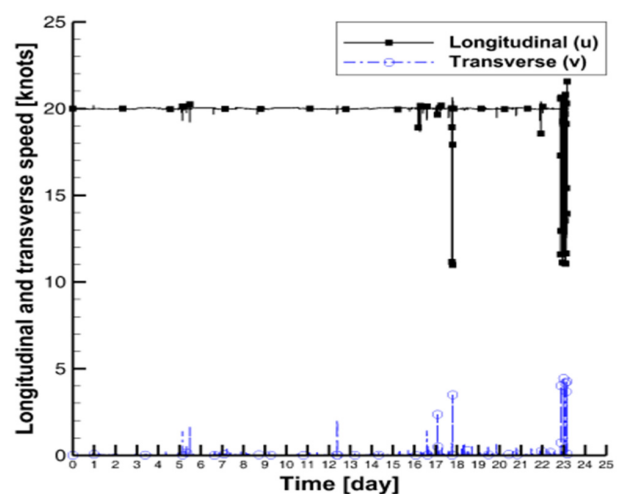


Fig. 8 The time series of the simulated speed along the longitudinal and transverse direction during the voyage

두 해역 모두 통행하는 선박의 수가 많은 곳으로 알려져 있으며, 다른 선박과의 충돌사고 방지를 위하여 선박이 대각도 항로변경을 수행하였다. 기록된 위치를 경로점으로 추종하기 때문에 대상 선박의 운항 시뮬레이션 과정에서 대각도 항로변경을 수행하였고, 그 결과 Fig. 8에서 보는 것처럼 종 방향 속도의 감소, 횡 방향 속도의 증가가 관찰되었다고 볼 수 있다.

운항 시뮬레이션에서 설계속도와 현재 속도를 비교한 후 분당 회전수를 조절하는 방법을 사용하고 있는데, 대각도 항로변경을 하는 동안 저항증가로 인해 발생한 속도감소와 환경 하중에 따른 속도감소를 분리하기 어려웠다. 이를 보완하기 위해, 선행연구에서는 타각 데이터를 분석하여 약 3.5 deg 이상의 타각에서 발생하는 속도 감소에서는 분당 회전수를 조절하지 않는 방법을 선택하였다 (You et al., 2018b).



Fig. 9 The locations on the peaks of the estimated EEOI

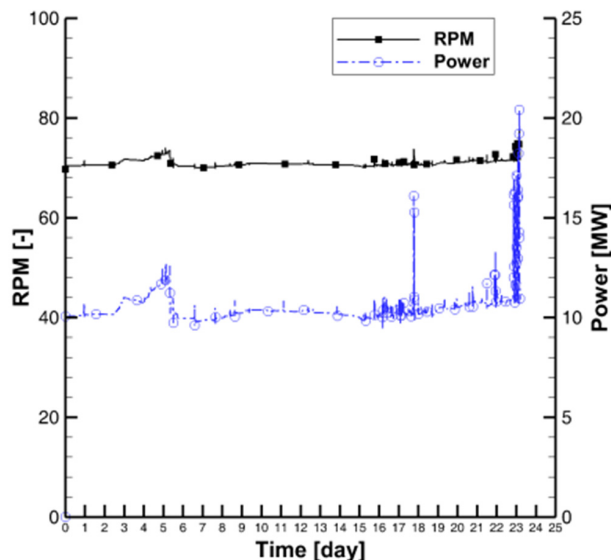


Fig. 10 The time series of the simulated RPM and power during the voyage

Fig. 10에서 운항 기간 계산된 분당 회전수와 동력의 시계열을 확인할 수 있다. 약 5~6일경 관찰되는 분당 회전수의 증가는 희망봉을 통과하면서 만만 환경 하중으로 인한 분당 회전

수의 일시적인 증가로 판단된다. 다만, 18일 차, 23~24일 차에 관찰되는 분당 회전수의 일시적인 증가는 연속적인 대각도 항로변경으로 인한 속도 감소와 이를 바로잡기 위한 분당 회전수의 증가로 판단된다. 물론 대각도 항로변경이 종료된 이후 빨리 설계속도 유지에 필요한 분당 회전수로 복귀하기 때문에 그 증가가 크지 않고, 지속시간이 길지 않았다.

4.2 에너지효율운항지수 계산

에너지효율운항지수를 계산하기 위해서는 식 (10)에서 설명한 것처럼, 화물의 질량, 연료소모량, 이동 거리, 배출계수를 알고 있어야 한다.

액화천연가스 운반선에서 화물창에 적재된 액화천연가스를 연료로 사용할 경우 화물의 질량은 변동될 수밖에 없으며, 가스연소기(GCU) 혹은 재액화 장치(re-liquefaction unit)의 탑재/운용 여부에 따라서도 화물창에 적재된 액화천연가스량의 변동이 있을 수 있다. 본 연구에서는 추진에 사용되는 액화천연가스에 대한 변동만을 고려하였으며, 가스연소기 혹은 재액화장치는 고려하지 않았다. 따라서, 액화천연가스 및 해상용 경유를 연료로 사용하는 경우 추진에 적재된 액화천연가스를 사용하고, 시간에 따라 전체 적재량에서 꾸준히 감소한다.

통상적으로 액화천연가스는 전체 화물창 적재 가능 용량의 약 98%를 적재하는 것으로 알려져 있다. 173,000 m³의 화물창을 갖고 있다고 할 때, 초기 위치에서 169,540 m³만큼의 화물을 적재하게 된다. 액화천연가스 및 해상용 경유를 연료로 사용하는 경우, Fig. 11에서 보는 것처럼 점진적으로 적재된 액화천연가스량이 감소했고, 최종위치에서 적재량은 165,995 m³으로 추정되었다.

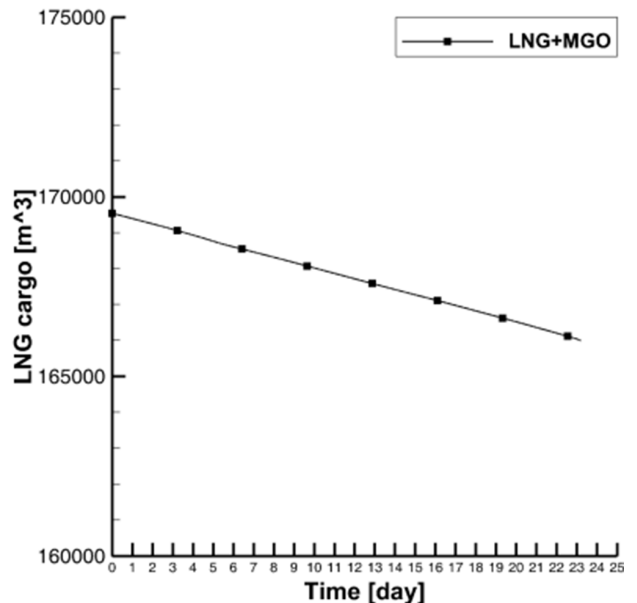


Fig. 11 The time series of the remaining LNG cargo in the tank during the voyage (LNG fuel mode only)

연료소모량은 식 (7), (8), (9)와 같이 추정된 동력에 엔진 로드에서 따른 연료소모량을 곱해 추정한다. Fig. 12에서는 각각의 엔진 모드에 대해서 추정된 중유, 액화천연가스, 해상용 경유의 소모량을 도시하였다. 해상용 경유는 파일럿 기름의 용도로 사용하기 때문에, 소모량이 액화천연가스 보다 매우 작아 미미한 변화를 보여주고 있다. 중유와 액화천연가스는 일정한 차이는 존재하지만, 같은 경향성을 보여주고 있다. 정량적인 차이는 Fig. 4의 SFOC 곡선과 SGC 곡선의 정량적인 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다. Fig. 12에서도 18일 차, 23~24일 차에 급격한 DLNGC, DMGOC, DHFOC의 급격한 증가가 관찰되는데, Fig. 10에서 관찰된 급격한 동력의 증가가 연료소모량 증가에 영향을 미친 것이다.

Fig. 13에서는 전체 운항 기간에 추정된 에너지효율운항지수를 보여주고 있다.

에너지효율운항지수가 급격하게 증가하는 원인은 대각도 항로변경으로 인한 속도의 감소가 가장 중요한 원인으로 판단된다. 선박의 운항속도 감소가 에너지효율운항지수에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 운항속도가 감소함에 따라 식 (10)의 분모에 있는 단위시간 동안 선박의 이동 거리가 감소한다. Fig. 8에서 대각도 항로변경 시 선박의 종 방향 속도가 약 50% 수준까지 감소하는 것을 고려할 때, 이동 거리 감소만으로 에너지효율운항지수는 2배 정도 증가할 수 있다.

운항속도가 감소하면 분당 회전수가 고정되었다고 가정할 때, 식 (3)에서 전진비가 감소하게 된다. 물론 타각이 3.5 deg 이하인 경우 명령속도 추종을 위하여, 분당 회전수가 증가하는 것을 고려하면 전진비는 더 감소하게 된다. Fig. 3에서 토크 계수의 경향성을 볼 때, 전진비가 감소하면 토크 계수가 증가하기 때문에 추진기에 작용하는 토크가 증가하고, 추진에 필요한 동력, 연료소모량이 증가한다. 식 (10)의 분자에 있는 연료소모량이 증가하기 때문에, 에너지효율운항지수가 더 증가하게 된다.

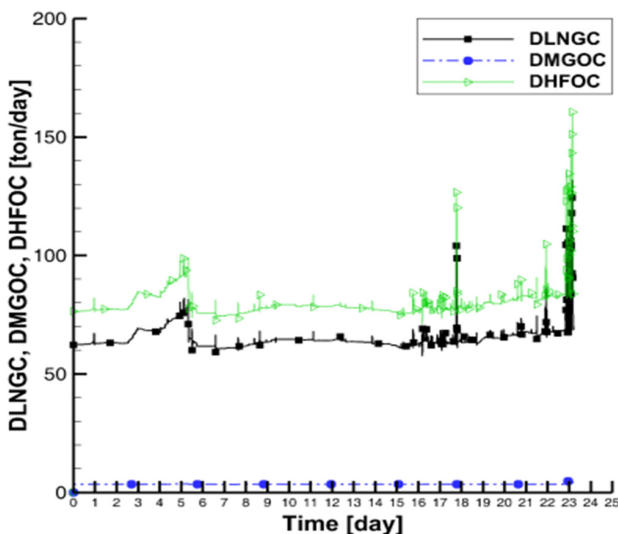


Fig. 12 The time series of the estimated DLNGC, DMGOC, DHFOC during the voyage

Fig. 14는 중유를 사용하는 엔진 모드와 액화천연가스 및 해상용 경유를 사용하는 엔진 모드 에너지효율운항지수의 상대 비율을 보여주고 있다. 상대비율은 식 (11)과 같이 정의하였다.

액화천연가스 및 해상용 경유를 연료로 사용하는 선박의 에너지효율운항지수는 중유를 사용하는 엔진 모드의 선박에 비해 약 76.5~78% 수준임을 확인할 수 있다. 이 결과는 액화천연가스를 연료로 추진하는 경우가 중유로 추진하는 경우보다 효율성이 높을 뿐 아니라, 더 적은 CO₂와 SO₂를 배출한다는 Laugen (2013)의 연구결과와 같은 경향성을 보이고 있다.

출발 후 시간이 지남에 따라 상대비율이 증가하는 경향성을 갖는데, 그 이유는 Fig. 11에서 보는 것처럼 액화천연가스로 추진할 경우 화물의 질량이 영향을 받았기 때문이다. 하지만, 초기 위치와 도착 위치에서 적재된 액화천연가스량의 차이를 기준으로 보면, 약 2% 정도 감소한다. 적재량의 감소에 따라 에너지효율운항지수가 소폭 증가하게 되어 상대비율이 증가하는 것으로 나타났다.

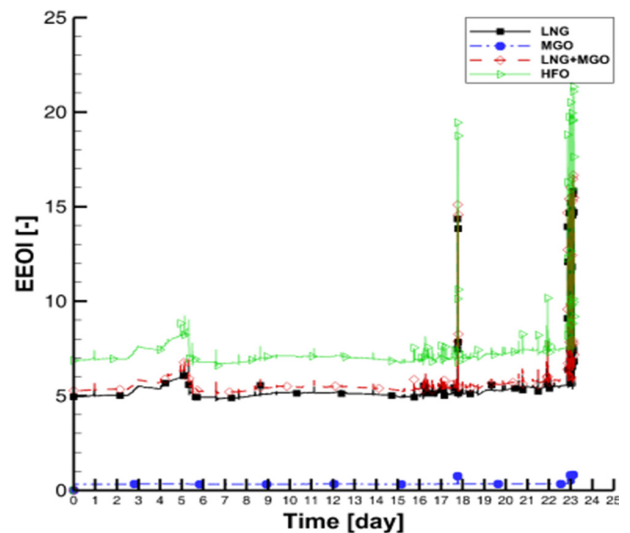


Fig. 13 The time series of the estimated EEOI according to the engine mode

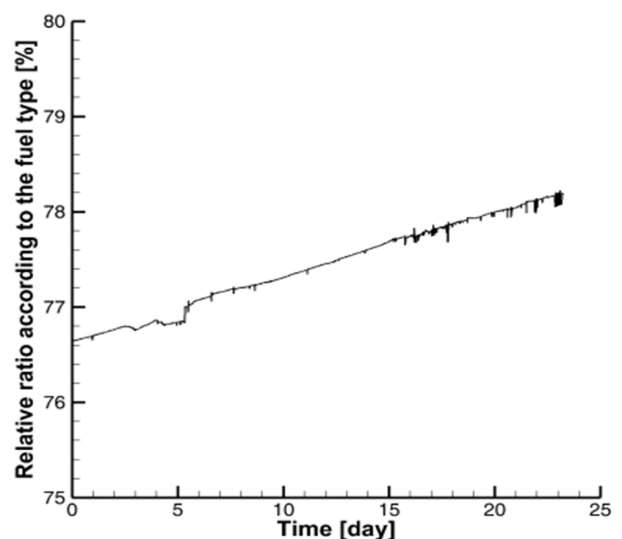


Fig. 14 The relative ratio according to the fuel type

약 4~5일 차에 상대비율이 일시적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 기간은 상대적으로 거친 기상상태에서 빠른 바람과 높은 유의파고를 만났던 기간이다. 환경 하중이 증가함에 따라 선체에 작용하는 외력이 증가하였다. Fig. 4에서 SFOC, SGC 곡선의 특징에 기인한 것으로 보이는데, SFOC는 엔진 로드가 65%인 조건에서 최소값을 갖고, SGC는 엔진 로드가 70%인 조건에서 최소값을 갖는다. 또한 엔진로드가 최소인 조건보다 증가할 때, SFOC의 증가 추세가 SGC의 증가 추세보다 더 큼을 알 수 있다. 따라서, 선박의 저항이 증가함에 따라 액화천연가스와 해상용 경유를 연료로 사용했을 때 중유를 사용한 경우보다 더 효율적인 운항이 가능함을 알 수 있다. 따라서, 환경 하중이 컸던 4~5일 차에 에너지효율운항지수가 일시적으로 감소했다고 판단된다.

$$Ratio = \frac{EEOI(LNG+MGO)}{EEOI(HFO)} \times 100 \quad (11)$$

5. 결론

본 연구에서는 대상 선박의 주요제원 및 중량정보, 저항, 자항 모형시험 결과, 조종 자유항주 모형시험 결과, 파랑 평균 표류력 계산 결과를 기반으로 운항 중인 선박의 에너지효율운항지수를 추정하는 프레임워크를 개발하였고, 추정된 에너지효율운항지수를 분석하였다. 다음과 같은 세 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 조종운동방정식을 기반으로 저항, 자항 모형시험 결과, 조종 자유항주 모형시험 결과, 파랑 평균 표류력 계산 결과를 고려하고, 탑재된 엔진 특성을 고려함으로써 하나의 플랫폼 내에서 운항 중인 선박의 동적 특성, 분당회전수, 동력, 연료소모량, 에너지효율운항지수를 연속적으로 추정하는 것이 가능했다. 따라서, 선박의 동적 거동이 에너지효율운항지수에 미치는 영향을 물리적인 관점에서 이해할 수 있었다.

둘째, 운항 중인 선박이 대각도 항로변경을 수행할 때 에너지효율운항지수의 급격한 증가가 관찰되었다. 운항 속도의 감소는 단위 시간 동안 이동 거리의 감소, 전진비 감소에 따른 토오크 계수, 동력의 증가, 연료소모량의 증가 원인이 되며, 에너지효율운항지수를 증가시킨다. 따라서 선박의 교통량이 많은 해역, 항만의 출입의 통로가 되는 해역 등에서 에너지효율운항지수가 더 크게 추정될 것임을 예상할 수 있다.

셋째, 중유를 사용하는 조건에 비해 액화천연가스 및 해상용 경유를 연료로 사용하는 선박의 에너지효율운항지수가 약 76~78%정도 낮게 나타났다. 또한, 더 큰 엔진 로드가 필요한 운항 조건에서 액화천연가스 및 해상용 경유의 효율성이 더 높아짐을 알 수 있었다.

본 논문에서 분석한 것처럼, 운항 경로 변경을 목적으로 하거나 다른 선박, 지형지물과 간섭을 피하기 위한 대각도 항로 변경 및 조타 행위는 에너지효율 관점에서 불리한 운항 계획으로 판단된다. 자율운항 혹은 운항 최적화 관점에서 대각도 항

로 변경 행위를 줄이는 운항계획을 수립함으로써, 더 높은 에너지효율성을 갖는 선박의 운용이 가능할 것으로 기대한다.

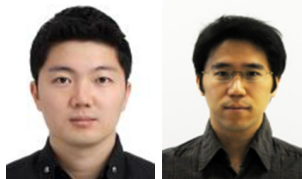
Nomenclature

Abbreviation	Full meaning
IMO	International maritime organization
EEDI	Energy efficiency design index
EEOI	Energy efficiency operational indicator
SEEMP	Ship energy efficiency management plan
MARPOL	The international convention for the prevention of pollution from ships
NOx	Nitrogen oxides
SOx	Sulphur oxides
CO	Carbon monoxide
PM	Particulate matter
HC	Unburned hydrocarbons
VOC	Volatile organic compounds
CO ₂	Carbon dioxide
AIS	Automatic identification system
LNG	Liquefied natural gas
ME-GI	Main engine electronic control gas injection
ECMWF	European centre for medium-range weather forecasts
HFO	Heavy fuel oil
MGO	Marine gas oil
LNGC	Liquefied natural gas carrier
FOC	Fuel oil consumption
FGC	Fuel gas consumption
FPOC	Fuel pilot oil consumption
SFOC	Specified fuel oil consumption
SGC	Specified fuel gas consumption
SPOC	Specified fuel pilot oil consumption
GCU	Gas combustion unit
DLNGC	Daily LNG consumption
DMGOC	Daily MGO consumption
DHFOC	Daily HFO consumption

References

- 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.
- Caughpan, S. A., Reynolds, K. J., 2016. Energy efficiency white paper (ship operations cooperative program), GLOSTEN, Washington: USA

- Choi, S., Park, S., Jang, Y., Lee, H., Hwang, E., Bong, C., 2010. A study on the greenhouse gas emission from ships in Korea, *Journal of the Korean Society of Transportation*, 28(6), pp.33-42
- 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.
- IMO, 2009, MEPC.1/Circ.684 – Guidelines for the development of the ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), Adopted on 17 August 2009.
- IMO, 2016, Resolution MEPC.282(70) – 2016 Guidelines for the development of a Ship Efficiency Management Plan (SEEMP), Adopted on 28 October 2016.
- Jo, Y., Park, K., Jang, Y., Kim, M., 2014. Considerations in ship performance analysis based on operatopon data, *Proceedings of the Annual Autumn Conference of the Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, 6-7 November.
- Kijima, K. Nakiri, Y. Tsutsui, Y. & Matsunaga, M., 1990. Prediciton method of ship manoeuvrability in deep and shallow water. *Joint International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*, Tokyo, Japan, 4-7 June 1990, pp.311-319.
- Laugen, L., 2013, *An environmental life cycle assessment of LNG and HFO as marine fuels*, M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science Technology.
- Lee, M. & Lee, H., 2016, Estimation of ship emissions and environmental costs : focusing on port of Busan, *Journal of Korea Port Economic Association*, 32(4), pp.15-28.
- MAN Diesel & Turbo, 2014, *LNG carriers with ME-GI engine and high pressure GAS supply system*, Copenhagen SV, Denmark
- Rakke, S. G., 2016. *Ship emissions calculation from AIS*, Master of Science in Engineering and ICT, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Shao, Z., 2016, Non-road emission inventory model methodology, ICCT(The International Council on Clean Transportation), Working Paper-4
- Smith, T., O'Keeffe, E., Aldous, L. and Agnolucci. P., 2013. *Assessment of shipping's efficiency using satellite AIS data*, UCL ENERGY INSTITUTE.
- You, Y., 2018. A study on the maneuverability of a twin-screw LNGC under machinery failure, *Ocean Engineering*, 155, pp.324-350.
- You, Y., Choi, J., 2017. A numerical study on the maneuverability of a twin-screw LNG carrier under single propeller failure, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), pp.204-214.
- 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*, 54(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 from a direct cost evaluation considering the dynamic characteristics and equipment operation, *Ocean Engineering*, 168, pp.23-40.
- You, Y. and Park. H., 2018. Development of a framework to estimate the EEOI of a ship considering the hydrodynamic characteristics and engine mode during a voyage, *Proceedings of the Annual Autumn Conference of the Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, 8-9 November.



유영준

박홍래