



# 2,700톤급 전기추진 스마트 선박의 실선 운항데이터 분석을 통한 오손 효과 검토 연구

강민우<sup>1</sup>·유영준<sup>1,2,†</sup>·김수빈<sup>1</sup>·정성준<sup>3</sup>  
울산대학교 일반대학원 조선및해양공학과의<sup>1</sup>  
울산대학교 공과대학 조선해양공학부<sup>2</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>3</sup>

## A Feasibility Study on Effects of Fouling on Speed and Power for 2,700ton-Class Electric-Propulsion Smart Ship by Analyzing Full-Scale Measurement Data

Minwoo Kang<sup>1</sup>·Youngjun You<sup>1,2,†</sup>·Subin Kim<sup>1</sup>·Sungjun Jung<sup>3</sup>  
Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, University of Ulsan<sup>1</sup>  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan<sup>2</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO)<sup>3</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.

For developing net-zero technology in the shipbuilding and shipping industry, a novel approach for quantifying energy efficiency of a ship has been requested. Although the full-scale performance of a ship has been assessed, there are restrictions due to the fouling effect on the resistance and powering of a ship. In this paper, a feasibility study was aimed at investigating the effects of fouling on speed and power for the 2,700 ton-class electric-propulsion smart ship by analyzing full-scale measurement data. First, full-scale measurements were classified according to trip number after full-scale measurements were post-processed by excluding missing data, data outliers, and inconsistent data. Second, speed-RPM and speed-power relations were obtained by applying the least square method. Third, regression was repeatedly conducted according to sea state to investigate the effect of environmental loads on speed-RPM and speed-power relations. Fourth, the effect of fouling was quantified by evaluating speed loss over time. Finally, it was possible for us to recognize the limitation that the speed-RPM and speed-power relation acquired from full-scale measurement data analysis due to fouling effect.

**Keywords** : Fouling effect(오손 효과), Electric-propulsion smart ship(전기추진 스마트 선박), Full-scale measurement data(실선 운항 데이터), Sea state(해상상태), Regression(회귀분석)

## 1. 서론

최근까지 조선 및 해운 분야에서 온실가스 배출 저감을 위한 환경 규제가 강화됨에 따라, 선박의 운항 효율성을 높이기 위한 다양한 연구개발이 진행됐다(Bourman et al., 2017). 특히, 선박의 에너지 효율성을 정량적으로 평가, 분석할 수 있는 방법론의 필요성이 제기된 바 있다(Kuroda and Sugimoto, 2022). 전통적으로 선박의 운항 성능은 모형 시험을 통해 모형 선박의 저항추진 성능을 추정 후, ITTC 1957 또는 ITTC 1978 실선 확장법을 적용, 주기관(main engine) 용량 설계, 실선 속도를 추정해 왔다. 이외에도, 실선에서 측정된 속도, 연료 소모량, 분당회

전수(RPM), 동력 계측값을 토대로, 실선 운항 성능을 추정하는 방법이 제안되기도 하였다(Orihara and Tsujimoto, 2018). 측정된 실선 운항데이터의 에너지 효율성을 분석하고, 성능 저하 요인을 도출하려는 연구가 수행되기도 하였으며(Mak et al., 2014), 운항 경로와 기상 조건을 고려한 선박의 운항 성능 예측 기법이 제안되기도 했다(Kuroda and Sugimoto, 2022). 또한, 선박자동식별장치(AIS)에 기록된 운항 정보와 기상 데이터베이스를 통해 획득한 기상 정보를 활용하여, 유체동역학 및 제어 연계 해석을 토대로 분당회전수 및 동력을 추정하는 기법이 제안되기도 하였다(You et al., 2017).

하지만, 선박이 운항 중 조우하는 바람, 파랑, 조류로 인한 동

력 증가, 오손(fouling) 효과로 인한 동력 증가를 정량화하는 데 어려움이 있기 때문에, 모형 시험, 수치해석, 시운전 등을 기반으로 추정된 실선 운항 성능에 한계가 있음을 밝힌 바 있다 (Aldous et al., 2015; Bitner-Gregersen et al., 2016). 오손 현상이 선박의 추진 효율에 미치는 영향을 실선 운항데이터 분석을 통해 비교하는 연구가 수행되기도 하였다 (Demirel et al., 2017). 방오 기술의 적용이 선박의 저항과 동력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하거나 (Schultz, 2007; Chambers et al., 2006), 오손 효과에 따른 마찰저항 증가와 그로 인한 동력 요구량 변화를 시험 및 수치해석을 통해 분석하려는 연구가 수행되기도 하였다 (Valchev et al., 2022).

본 연구에서는 2,700톤급 전기추진 스마트 선박의 실선 운항 데이터 분석을 통해, 오손 효과가 선박의 실선 운항성능에 미치는 영향을 검토하는 것을 목표로 하였다. 첫째, 실선 운항데이터를 후처리함으로써 계측 누락, 이상값, 센서 오차 등을 제거하고, 항차별 시계열 데이터로 분류하였다. 둘째, 후처리된 전체 실선 운항데이터를 기준으로 속도-분당회전수, 속도-동력의 관계성에 따라 회귀분석을 수행, 유효성을 검토하였다. 셋째, 실선 운항데이터 회귀분석 시 환경하중이 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여, 해상상태 2, 3, 4 별로 데이터를 분류, 회귀분석을 각각 수행, 분석하였다. 넷째, 오손 효과가 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여, 기준 동력에 따른 속도 변화에 관한 시계열을 도출, 분석하였다. 이를 통해 선박의 오손 효과가 동력 증가, 또는 속도 손실에 미치는 영향이 뚜렷함을 확인하였다. 그 결과 실선 운항데이터를 회귀분석 함으로써 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을 유추하는 방법론이 갖는 한계를 유추할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대상 선박, 실선 운항데이터 및 기상 데이터베이스, 회귀분석 모델 등 오손 효과를 분석하는 데 필요한 기술 자료의 세부 정보 및 수학적모형을 기술하였다. 3장에서는 실선 운항데이터 분석을 수행하기 위하여, 항차 별 실선 운항데이터를 분류하고, 계측 오차, 누락, 이상값으로 판단되는 정보를 제거, 보정하는 후처리 기법, 항차 별 데이터의 궤적을 정리하였다. 4장에서는 실선 운항데이터에서 계측된 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을, 회귀분석을 통해 분석하였다. 또한, 선박이 진수된 시점부터 저자가 선택한 동력을 기준으로 운항 속도의 손실에 관한 시계열을 도출, 분석하였다. 5장에서는 본 연구에서 검토한 사항을 요약, 정리하였다.

## 2. 실선 운항데이터 및 회귀분석 모델

### 2.1 대상 선박

2,700톤급의 전기추진 스마트 선박인 울산태화호를 대상으로 연구를 수행하였는데, 해당 선박은 산업통상자원부와 울산시가 2019년부터 4년간 448억 원을 투입해 건조한 국내 최초 직류 기반



Fig. 1 2,700ton-class electric propulsion smart ship (ULSAN TAEHWA)

Table 1 Principal dimensions of 2,700ton-class electric propulsion smart ship (ULSAN TAEHWA)

Property		Value
Lpp [m]		78.5
Breadth [m]		12.8
Design draft [m]		3.3
Gross tonnage [mt]		2,696
Speed	Design [knots]	14
	Maximum [knots]	16
Number of propellers [EA]		2
Number of propeller blades [EA]		4
Predicted power at design speed with design draft [kW]		1,198

하이브리드 전기 추진선으로, 국내 기자재 실증, 해상관광, 및 실선 운항데이터를 활용한 비즈니스를 목적으로 건조되었다. 오손 효과를 정량적으로 분석하기 위해서는 장기간 축적된 실선 운항데이터가 필요하다 (Larsson and Simonsen, 2014). 따라서, 실선 운항데이터 비즈니스를 목적으로, 지속적으로 운용되고 있는 울산태화호를 대상 선박으로 선정, 데이터 분석을 수행하고자 하였다. 울산태화호는 Fig. 1과 같으며, 울산태화호 주요 제원은 Table 1과 같다. 오손 효과를 분석하기 위해서 설계 정보를 고려하여 최초 진수 시점의 실선 스케일 동력 값이 설계선속인 14knots에서 1,198kW임을 확인하였다 (KRISO, 2021).

### 2.2 실선 운항데이터 및 기상 데이터베이스

본 연구에서 활용한 실선 운항데이터는 2023년 1월 5일 09시 30분(KST)부터 2024년 7월 18일 15시 34분(KST)까지 경위도, 대지속도(SOG), 침로(COG), 분당회전수, 축동력(shaft power) 등 실선의 운항 상태를 모니터링하는 데 필요한 다양한 정보를 1분 간격으로 저장한 것이다.

운항하는 선박의 오손 효과를 검토하기 위해서는 선박에 작용하는 바람, 파랑, 조류 등의 환경하중이 선박 운항성능에 미치는 영향을 제거하거나, 정량적으로 분석할 수 있어야 한다. 이를 위해, 바람, 파랑, 조류 등의 환경 조건에 관한 계측값, 또는 추정값이 필요했다. 물론, 획득한 실선 운항데이터에 선박에 탑재된 풍

속, 풍향 센서를 통해 계측한 바람 정보가 선체 고정 좌표계를 기준으로 기록되어 있기는 했다. 하지만, 해상상태별 회귀분석을 위하여 지구 고정좌표계를 기준으로 추정 또는 기록된 정보가 필요했다. 따라서, 유럽중기예보센터(ECMWF) 기상 데이터베이스를 활용하여, 바람 및 파랑 정보를 획득하였다 (단, 실선 운항데이터를 분석할 수 있는 수준의 조류 정보를 획득할 수 없었다.)

유럽중기예보센터 ERA5 기상 데이터베이스를 이용하여, 시간, 경위도에 따라 바람의 속도, 방향, 유의파고, 평균 파주기, 파향 등의 정보를 획득할 수 있었다. 바람 정보는 경위도 0.25° 간격으로, 파랑 정보는 경위도 0.5° 간격으로, 1시간 간격으로 획득할 수 있었다. 기록된 시각(KST)를 UTC로 변환, 경로점에 가장 가까운 값을 선택, 분석에 이용하였다.

### 2.3 회귀분석 및 속도 손실 수치화 모델

실선 운항데이터 분석을 위하여, 선박의 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을 고려하여, 최소자승법을 적용하여 회귀분석을 수행하였다 (You et al., 2020). 첫째, 선박의 분당회전수는 속도와 선형 관계가 있어, 식 (1)과 같이 가정한 후 회귀계수  $\alpha_1$ 을 찾고자 하였다. 둘째, 선박의 동력은 속도의 세 제곱에 비례하는 관계가 있어, 식 (2)와 같이 가정한 후 회귀계수  $\alpha_2$ 를 찾고자 하였다. 선박의 속도-분당회전수, 속도-동력에 관한 회귀계수를 찾은 후, 회귀분석의 타당성 또는 유효성을 검토하고자 식 (3)에 명시된 피어슨 상관계수를 계산하고자 하였다 (Berman, 2016). 식 (1), (2), (3)에서,  $n$ 은 분당회전수,  $P$ 는 동력,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 는 회귀계수,  $U$ 는 속도를 가리킨다. 식 (3)은  $x$ 와  $y$ 의 공분산을 각 변수의 표준편차 곱으로 나눈 값으로, 상관계수  $r$ 은 1과 -1 사이의 값을 나타낸다. 속도-분당회전수에 대하여  $x_i$ 는 대지속도,  $y_i$ 는 분당회전수,  $\bar{x}$ 는 대지속도의 평균,  $\bar{y}$ 는 분당회전수의 평균이며, 속도-동력에 대하여  $x_i$ 는 대지속도의 3승,  $y_i$ 는 동력,  $\bar{x}$ 는 대지속도 3승의 평균,  $\bar{y}$ 는 동력의 평균이다.

$$n = \alpha_1 \times U \tag{1}$$

$$P = \alpha_2 \times U^3 \tag{2}$$

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

본 연구는 2,700톤급 전기추진 스마트 선박에서 실선 운항데이터 축적을 시작한 2023년 1월 5일 09시 30분부터 약 19개월간 계측한 데이터를 분석한 초기 연구로써, 앞으로 대상 선박에서 축적된 실선 운항데이터 분석 연구를 지속적으로 계획하고 있다. 오손 효과를 기준 동력에 따른 선박의 운항속도 시계열로 도시, 정량적인 분석을 시도하였다 (Larsson and Simonsen, 2014; You et al, 2020). 여기서, 오손 효과가 작용한 시간의 기준점은 HD 현대미포조선소에서 대상 선박을 진수했던 일자리를 기준으로

삼았으며, 진수 이후 오손 효과가 선박의 실선 운항 성능에 지속적으로 영향을 주었다고 가정하였다. 대상 선박의 저항, 자항 모형 시험보고서에 따르면 설계속도인 14knots에서 1,198kW의 동력이 필요함을 확인할 수 있다 (KRISO, 2021). 대상 선박에서는 2개의 추진기가 탑재, 운용되며, 1,198kW를 기준으로  $\pm 0.25\%$  (3kW) 범위의 동력을 기준으로 분석하였다. (선박의 운항 상태에 따라서 같은 속도에서도 동력이 큰 폭으로 변화하기 때문에, 특정 기준 동력 값에 매칭되는 데이터만 발체할 경우 회귀분석에 필요한 충분한 데이터 획득이 불가능하다.) 14knots로 운항하는 조건이 전체 항해데이터에 고르게 분포하지 않음을 확인하여, 13knots에 해당하는 890kW를 기준으로  $\pm 0.5\%$  (4.5kW) 범위의 동력을 기준으로 추가 분석하였다. (14knots 조건과 같이  $\pm 0.25\%$  범위로는 속도 손실을 검토에 필요한 충분한 데이터가 발체되지 않아,  $\pm 0.5\%$  범위까지 발체하였다.)

## 3. 실선 운항데이터 분석 개요

### 3.1 실선 운항데이터 항차 분류

2,700톤급 전기추진 스마트 선박의 실선 운항데이터는 선박의 출항, 정박, 예인 등 운항 상태와 상관없이 지속적으로 상태 정보가 저장되어 있었다. Nourbakhsh et al. (2022)는 실선 운항데이터 분석 시 계측값의 오차, 누락, 이상값에 대한 후처리가 필요함을 제기한 바 있다. 본 연구에서도 선박의 오손 효과를 정량적으로 분석하기 위해서 다음 면에서 설명할 네 가지를 고려하여, Fig. 2의 순서도에 따라 72개 항차의 실선 운항데이터로 분류하였다. Fig. 3은 72개 항차 중 임의로 발체한 4개 항차의 운항 경로의 경위도를 예시로 발체, 표기하였다.

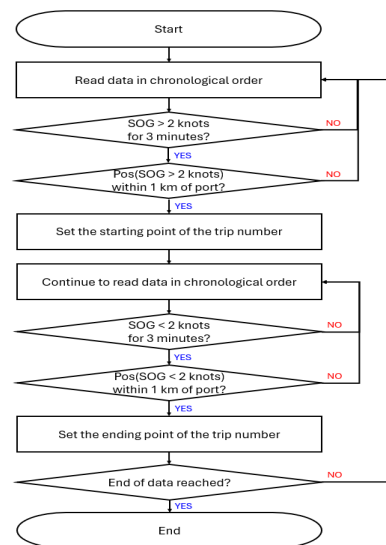


Fig. 2 Flow chart of the post-processing procedure for separating voyage

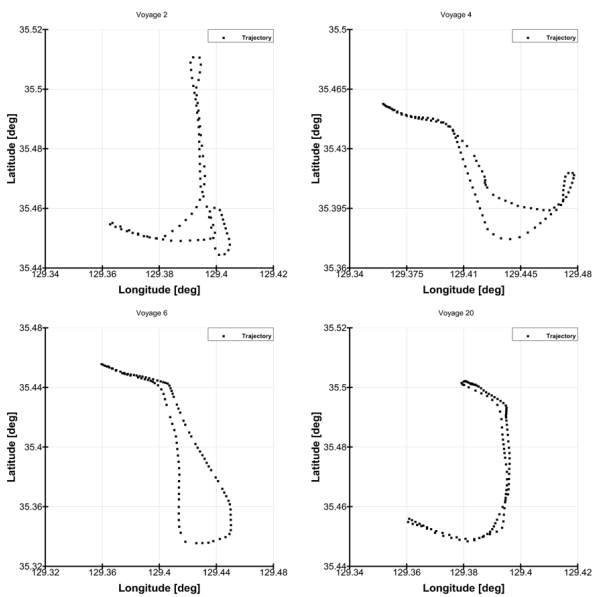


Fig. 3 Examples of post-processed voyages

첫째, 선박의 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을 분석하기 위해서는, 선박의 운항 중 기록된 값을 기준으로 분석할 필요가 있었다. 따라서, 선박의 대지속도를 기준으로 데이터를 분류하였다.

둘째, 항만 내, 선박의 속도가 매우 느린 구간에서는 대상 선박의 이-접안을 위한 협력 행위, 환경하중의 불확실성, 조타 행위의 불연속성 등이 관찰되어, 분석에서 배제할 필요가 있었다. 일반적으로 정박 중에서는 대지속도가 0.01knots 정도의 작은 값으로 표시되며, 이-접안을 포함한 정박지 인근에서 출항, 회항 과정에서는 대지속도가 2knots 이내의 값으로 표시된다. 따라서, 실선 운항데이터를 항차에 따라 분류하기 위하여 울산신항(35.456, 129.360)을 기준으로 반경 1km, 대지속도 2knots 이상 조건을 모두 만족할 경우를 항차의 시작과 종료 기준으로 가정하였다.

셋째, 누락된 상태 정보는 데이터 분석 과정에서 고려되지 않지만, 이상값에 대해서는 확인 및 처리가 필요했다. 즉, 1분 간격 데이터 관점에서 선박의 거동이 연속적인 것으로 판단되나, 물리적으로 타당하지 않은 값이 표기되거나, 0으로 표시되는 경우가 있었다. 물리적으로 타당하지 않은 이상값은 센서 오작동 등이 의심되나, 후처리 단계에서 구분할 수 없기 때문에 실선 운항데이터 분석에서 제외하였다.

넷째, 항차에 따라 분류된 실선 운항데이터 중 3knots 이상의 데이터만 발췌, 분석에 이용하였다. 대상 선박이 관광, 항해 장비 실증을 위해서도 운용되고 있기 때문에, 바다 한가운데에서 대지속도 1~2knots 이하로 이동하거나, 일반적인 운항과는 다른 거동을 보이는 경우가 있었기 때문에 실선 운항데이터 분석 시 제외하였다.

### 3.2 기상 상태에 따른 실선 운항데이터 분석 조건

기상 상태에 따라 선박의 속도, 분당회전수, 동력 등의 주요 성능지수가 뚜렷하게 영향을 받기 때문에, 해상상태에 따른 주요

성능지수에 관한 추가 분석을 수행하고자 하였다 (Faltinsen, 1993).

2,700톤급 전기추진 스마트 선박의 실선 운항데이터에 매칭된 기상 데이터베이스를 검토한 결과, 해상상태 2~4 범위에서 운항했음을 확인할 수 있었다. 후처리된 데이터를 기준으로 해상상태 2가 약 25%, 해상상태 3이 약 70%, 해상상태 4가 약 5% 정도 차지하였다. (대상 선박이 관광, 장비 실증 목적으로 운용되며, 수선간길이가 78.5m임을 고려할 때, 운항할 수 있는 기상 조건이 해상상태 4 이내일 것으로 예상된다.)

## 4. 실선 운항데이터 분석 결과

### 4.1 속도-분당회전수, 속도-동력 회귀분석 (전체)

일반적으로, 선박의 실선 운항 성능 분석 시 속도-분당회전수는 선형 관계성을, 속도-동력 관계는 세제곱 관계성을 기준으로 분석한다 (Berthelsen and Nielsen, 2021; You et al., 2020). Fig. 4는 속도-분당회전수 관계, Fig. 5는 속도-동력 관계를 각각 표시하였으며, 회귀분석을 수행한 결과에 대해서도 각각 수식의 형태로 표시해 두었다. Table 2에서는 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성에서 회귀분석 결과 얻어진 회귀계수와 상관계수를 각각 정리하였다.

Figs. 4, 5에서 보는 것처럼, 회귀분석을 통해 얻은 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성의 회귀모델이 실선 운항데이터의 관계성을 잘 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 오손 효과가 점진적으로 속도-분당회전수, 속도-동력에 영향을 주었을 것으로 예상하여, 이를 확인하고자 실선 운항데이터를 6개월 간격으로 나누어 구분할 수 있도록 표시했다. 검은색 사각형은 7~13개월, 파란색 삼각형은 13~19개월, 붉은색 역삼각형은 19~25개월에 기록된 값이다. 속도-분당회전수, 속도-동력의 기록값을 살펴보면, 녹색

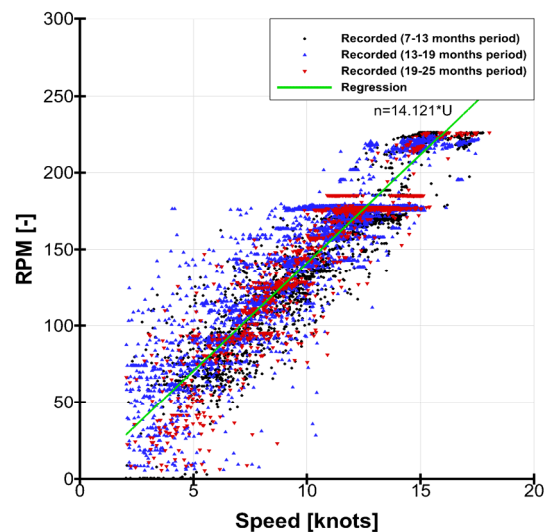


Fig. 4 Speed-RPM relations by plotting full-scale measurements and regression model of post-processed data

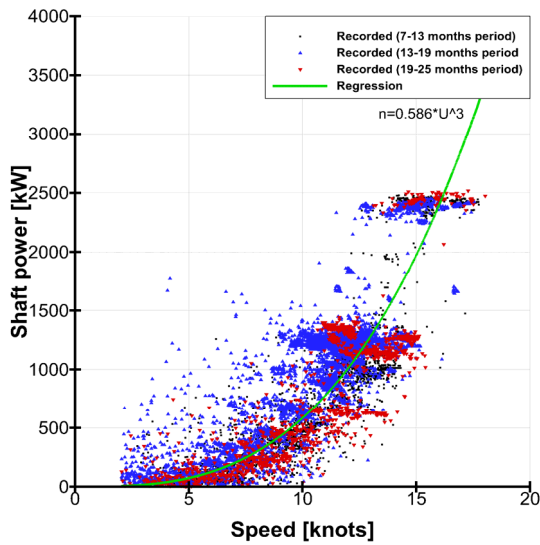


Fig. 5 Speed–Power relations by plotting full-scale measurements and regression model of post-processed data

Table 2 Regression coefficients and correlation coefficients of post-processed data

Item		Coefficient	Correlation coeff.
Total	Speed–RPM	14.121	0.897
	Speed–power	0.586	0.853

으로 표시된 회귀 곡선을 기준으로 아래쪽에는 검은색 사각형을 많고, 파란색 삼각형과 붉은색 역삼각형은 위쪽에 많음을 알 수 있다. 정량적으로 분석하지는 않았지만, 오손 효과에 따른 동력 증가 효과가 반영된 것임을 예상할 수 있었다.

Table 2에 정리된 상관계수 값에서 보는 것처럼, 속도–분당회전수 관계성이 속도–동력 관계성보다 강한 상관관계 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이는 같은 속도에서도 분당회전수, 동력이 매우 큰 범위 내에서 분포하고 있기 때문인데, 전기추진 스마트 선박 운항 과정에서의 바람, 파랑, 조류 등의 환경하중의 불확실성, 감속을 비롯한 조타 행위의 불확실성, 오손 효과로 인한 저항 증가 등을 모두 통제하지는 못하기 때문일 것으로 생각된다.

#### 4.2 속도–분당회전수, 속도–동력 회귀분석 (해상상태별)

앞서 4.1절에서 전체 실선 운항데이터에 대한 회귀분석을 수행하였고, 이후 실선 운항데이터에서 기상 상태가 속도–분당회전수, 속도–동력 관계성에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있는지 검토하였다. Fig. 6은 해상상태 3에 대한 속도–분당회전수 관계성을, Fig. 7은 해상상태 3에 대한 속도–동력 관계성을 각각 표시한 것이다. Table 3에서는 해상상태 2, 3, 4에 대한 속도–분

당회전수, 속도–동력 관계성의 회귀계수와 상관계수를 각각 정리하였다.

Figs. 6, 7에서 보는 것처럼, 속도–분당회전수, 속도–동력의 관계성은 후처리된 데이터 전체와 같은 관계성을 보인다. 특히, Table 3에 정리된 것처럼, 해상상태 2, 3, 4로 증가함에 속도–분당회전수 회귀계수가 증가함을 확인하고 있음을 확인할 수 있다. 해상상태가 높아짐에 따라 같은 속도를 내기 위하여 더 높은 분당회전수가 요구되는 것을 고려할 때, 타당한 결과로 판단된다. 하지만, 속도–동력 회귀계수는 일정한 경향성을 확인할 수 없었다. 상관계수를 기준으로 볼 때, 해상상태 2, 4 조건에서 상관계

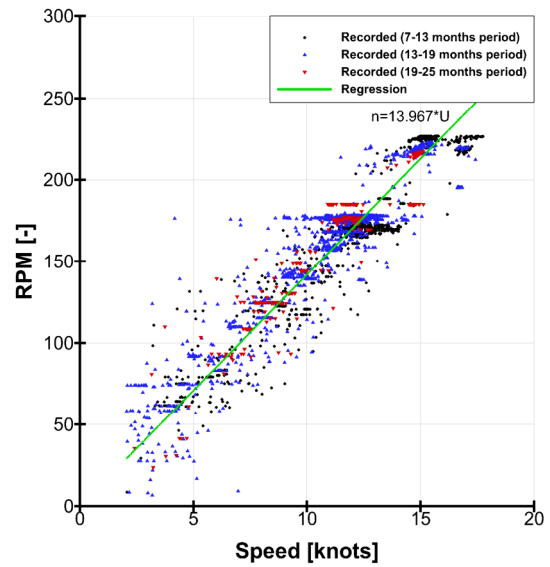


Fig. 6 Speed–RPM relations by plotting full-scale measurements and regression model of post-processed data within sea state 3

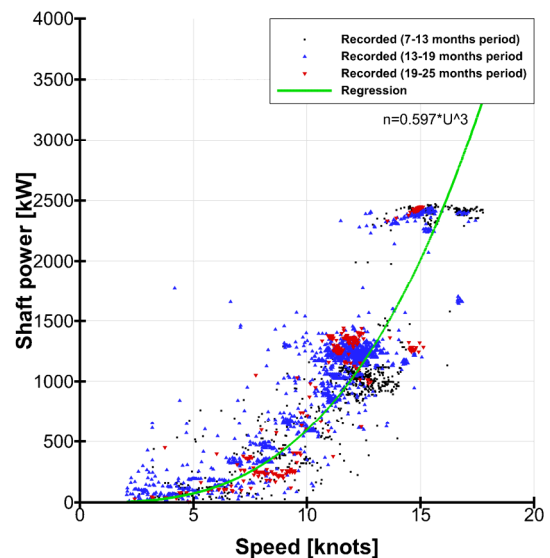


Fig. 7 Speed–Power relations by plotting full-scale measurements and regression model of post-processed data within sea state 3

Table 3 Regression coefficients and correlation coefficients of post-processed data according to sea state

Item		Coefficient	Correlation coeff.
sea state 2	Speed-RPM	13.967	0.824
	Speed-power	0.569	0.800
sea state 3	Speed-RPM	14.197	0.933
	Speed-power	0.597	0.884
sea state 4	Speed-RPM	14.516	0.924
	Speed-power	0.564	0.833

수는 0.800, 0.833으로, 해상상태 3에 비해 뚜렷하게 작았음을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 것처럼, 해상상태 2, 4의 데이터 비율이 해상상태 3에 비해 뚜렷하게 적었기 때문에, 운항 과정에서의 불확실성을 상쇄할 정도의 충분한 데이터가 회귀분석에 이용되지 못했기 때문으로 판단된다. 따라서, 실선 운항데이터의 분석만으로 환경하중이 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성에 미치는 영향을 정량적으로 분리하는 데 제한이 있음을 확인하였다. 이러한 점은 You et al. (2020)에서 제시했던 유체동역학 및 제어 연계 해석을 토대로 한 디지털 트윈 모델을 이용하여, 분리해 내는 방법에 대한 적용 가능성을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

### 4.3 오손 효과에 따른 속도 손실 회귀분석

오손 효과가 선박의 속도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 운항 시간이 증가함에 따라 기준 동력에서 얻어지는 대표 속도의 시계열을 Figs. 8, 9에서 도시하였다. 선박의 진수나 주기적인 수리 행위 이후 시간에 따라 오손 효과가 선박의 운항 성능에 지속적으로 영향을 주고 있다고 가정하였다. Figs. 8, 9와 같이 월별 속도 손실로 표시하도록 하였다. 다만, 시간에 따라 속도 손실이 나타나는 것으로 관찰되나, 일정 시점에 분포하는 속도 범위가 크기 때문에 시간에 따라 일정하게 감소하는 것으로 가정하는 것이 타당한지에 대한 의문이 있을 수 있다. 14knots, 13knots에서의 기준 동력을 기준으로, 시간에 따른 운항 속도 비율의 기울기가 0.87, 0.86으로 미미한 차이가 있음을 통해, 최소한의 타당성은 확인할 수 있었다. 하지만, 장기간 실선 운항데이터가 누적되었을 때, 오손 효과에 따라 속도 손실에 관한 분석은 다시 검토할 필요성이 있다고 판단된다.

Figs. 8, 9를 분석하는 과정에서 2024년 3월 12일부터 기준 동력에서의 속도가 뚜렷하게 변화함을 인지하였으며, 대상 선박의 운용 상에 뚜렷한 변화가 있었을 것으로 추론하였다. 울산정보산업진흥원(UIPA)에 문의한 결과 Fig. 10과 같이 해당 시점에 해수 흡입구(sea chest), 추진기, 타, 선저 등에 붙은 이물질 제거하는 수리 행위를 수행하였음을 확인하였다. 2024년 3월 이후 계속 데이터가 충분하지 않았기 때문에 경향성을 정량적으로

분석하는 것은 어렵지만, 기준 동력에서의 속도 비율이 100% 내외까지 증가했음을 확인할 수 있다. 따라서, 대상 선박의 오손 효과를 속도 기준으로 회귀분석할 수 있음을 확인하였다. (단, 수리 행위를 기준으로 속도 비율이 100% 내외로 증가하는 것으로 볼 때, 경년(ageing) 효과는 미미했을 것으로 판단된다.)

서론의 문헌 조사에서 기술했던 것처럼, 조선 및 해운 분야 연구자들이 실선 운항데이터를 토대로 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을 회귀분석하는 연구 방법론을 적용해왔다. Fig. 9에서와 같이 오손 효과에 따라 동력 증가, 또는 속도 손실이 시간에 따라 뚜렷하게 나타나기 때문에, 오손 효과를 고려하지 않을 경우 회귀분석에 대한 타당성이 제한될 수밖에 없음을 예상할 수 있다.

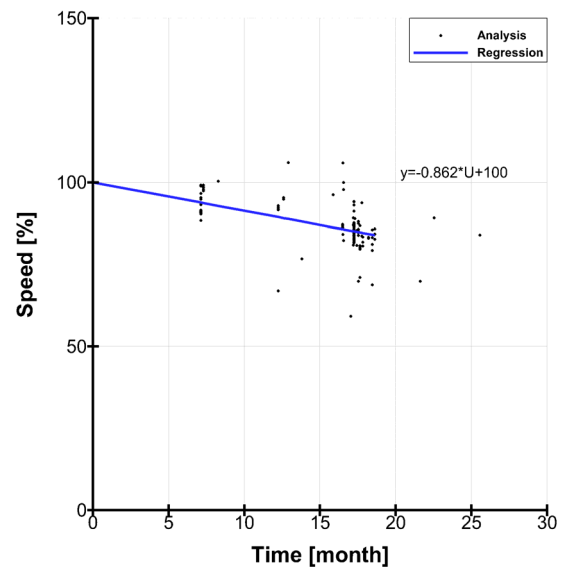


Fig. 8 Ratio of speed at a given power over time to speed of 14knots

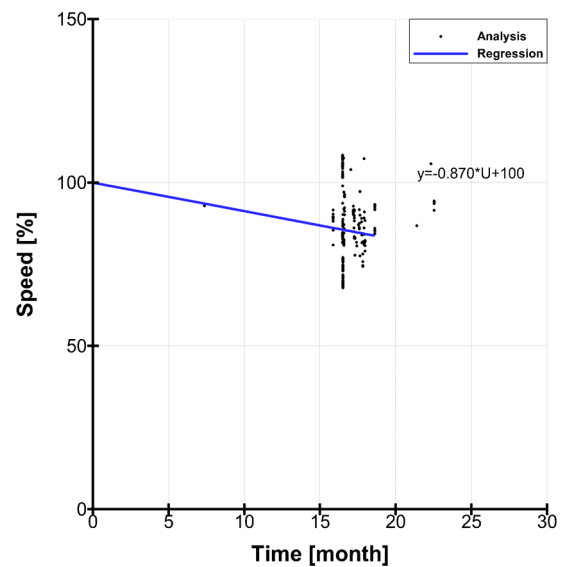


Fig. 9 Ratio of speed at a given power over time to speed of 13knots

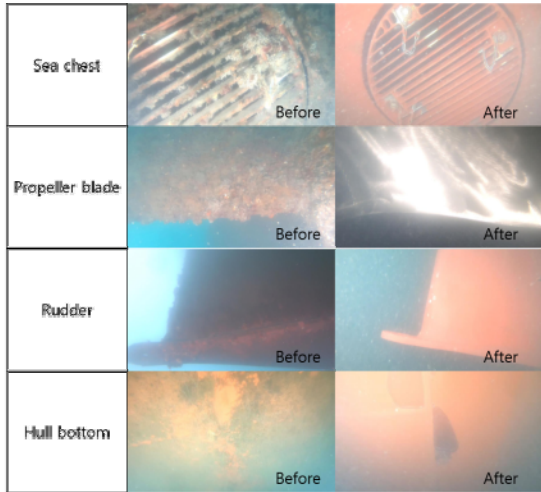


Fig. 10 Repairing work for cleaning sea chest, propeller blade, rudder and hull bottom on March 12, 2024

## 5. 결론

본 논문에서는 2,700톤급 전기추진 스마트 선박의 실선 운항 데이터 분석을 통해, 오손 효과가 선박의 실선 운항성능에 미치는 영향을 검토하는 것을 목표로 했으며, 다음과 같이 세 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 실선 운항데이터 분석을 위해서 운항 중인 상태 정보를 발체, 이-접안을 포함한 정박지 인근에서 출항, 회항 과정의 상태 정보 제외, 계측 누락, 이상값 계측 등을 수정, 보완하였다. 실선 운항데이터 내 대지속도를 기준으로, 울산신항 기준 반경 1km 외, 대지속도 2knots 이상의 조건에 대해서만 분석하였다. 또한, 계측 누락, 이상값을 제외하였으며, 대상 선박의 목적을 고려할 때 분류된 항차 별 데이터에서 3knots 이상의 데이터만을 이용하여 분석 연구를 수행하였다.

둘째, 후처리 된 실선 운항데이터를 이용하여 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을 고려하여, 회귀분석을 수행하여 회귀계수를 획득하였다. 다만, 해상상태별로 각각 회귀분석을 수행하였을 때, 속도-분당회전수는 뚜렷한 경향성을 보이며, 강한 상관관계를 보임을 확인하였다. 하지만, 속도-동력 관계성의 경우 뚜렷한 경향성을 확인할 수 없었다. 바람, 파랑, 조류 등과 같은 환경하중의 불확실성, 감가속을 비롯한 조타 행위의 불확실성을 모두 통제하지는 못했기 때문이며, 각각의 해상상태에서 충분한 데이터를 축적하지 못했기 때문일 것으로 생각된다.

셋째, 기준 동력에서 선박의 운항 속도에 관한 시계열 분석을 통해 선박의 운항 속도가 뚜렷하게 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기준 동력에서 시간이 지남에 따른 선박의 운항속도를 정량적으로 추정할 수 있는 수식을 획득할 수 있었다. 1,198kW를 기준으로 진수 시점에 14knots로 운항할 수 있었으나, 18개월 후 12.18knots로 속도가 뚜렷하게 손실되었음을 유추할 수 있다. 오손 효과가 선박의 운항 속도 저하, 또는 동력 증가에 뚜렷한 영향을 주고 있음을 고려할 때, 실선 운항데이터 회

귀분석을 통한 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성을 이용하는 방법의 유효성이 제한될 수 있음을 예상할 수 있었다.

앞서, 바람, 파랑, 또는 조류 등의 해상상태의 변화가 선박의 속도-분당회전수, 속도-동력 관계성에 미치는 영향을 실선 운항 데이터 분석만으로 정량화하기 어려움을 확인하였다. 선박의 유체동역학 및 제어 연계 해석을 통해 환경하중을 정량적으로 분석할 수 있는 디지털 트윈을 구축, 검증함으로써, 환경하중, 오손 효과를 정량적으로 분석하는 기법에 관한 후속 연구 개발을 수행할 예정이다. 또한, 인공지능을 이용한 실선 운항데이터 분석을 통해 오손 효과의 수치화 가능성을 검토할 예정이다.

## 후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00395678). 또한, 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술포진원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-02263945, 2025년 산업혁신타인재성장지원사업).

## Nomenclature

Abbreviation	Full meaning
AIS	Automatic Identification System
COG	Course Over Ground
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	ECMWF Reanalysis v5
ITTC	International Towing Tank Conference
KST	Korea Standard Time
RPM	Revolutions Per Minute
SOG	Speed Over Ground
UIPA	Ulsan ICT Promotion Agency
UTC	Coordinated Universal Time

## References

- Aldous, L., Smith, T., Bucknall R. and Thomson P., 2015. Uncertainty analysis in ship performance monitoring. *Ocean Engineering*, 110, pp.29-38.
- Berman, J.J., 2016. *Data simplification: taming information with open source tools*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Berthelsen, F.H. and Nielsen, U.D., 2021. Prediction of ships' speed-power relationship at speed intervals below the design speed, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 99, 102996.
- Bitner-Gregersen, E.M., Dong, S., Fu, T., Ma, N., Maisondieu, C., Miyake, R. and Rychlik, I., 2016. Sea

- state conditions for marine structures' analysis and model tests. *Ocean Engineering*, 119, pp.309–322.
- Bouman, E.A., Lindstad E., Riialand, A.I. and Strømman, A.H., 2017. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D*, 52, pp.408–421.
- Chambers, L.D., Stokes, K.R., Walsh, F.C. and Wood, R.J.K., 2006. Modern approaches to marine antifouling coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201, pp.3642–3652.
- Faltinsen, O., 1993. *Sea loads on ships and offshore structures*, Cambridge University Press, Cambridge, London, United Kingdom.
- Demirel, Y.K., Uzun, D., Zhang, Y., Fang, H.C., Day, A.H. and Turan, O., 2017. Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 33(10), pp.819–834.
- Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), 2021. *Hull form study for HMD smartship*, Report, BSPIS9790–12120–7.
- Kuroda, M. and Sugimoto, Y., 2022. Evaluation of ship performance in terms of shipping route and weather condition. *Ocean Engineering*, 254, 111335.
- Larsson, E. and Simonsen, M.H. 2014. *Direct weather routing*, Master's Thesis, Chalmers University of Technology.
- Mak, L., Sullivan, m., Kuczora, A. and Millan, J., 2014. Ship performance monitoring and analysis to improve fuel efficiency. 2014 Oceans – St. John's, St. John's, NL, Canada, 14–19 September 2014.
- Orihara, H. and Tsujimoto, M., 2018. Performance prediction of full-scale ship and analysis by means of on-board monitoring. Part 2: Validation of full-scale performance predictions in actual seas. *Journal of Marine Science and Technology*, 23, pp.782–801.
- Schultz, M.P., 2007. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 23(5), pp.331–341.
- Valchev, I., Coraddu, A., Kalikatzarakis, M., Geertsma, R. and Oneto, L., 2022. Numerical methods for monitoring and evaluating the biofouling state and effects on vessels' hull and propeller performance: A review. *Ocean Engineering*, 251, 110883.
- You, Y., Choi, J.W. and Lee, D.Y., 2020. Development of a framework to estimate the sea margin of an LNGC considering the hydrodynamic characteristics and voyage. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, pp.184–198.
- You, Y., Kim, J. and Seo, M., 2017. 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.

