선속과 해양기상이 선박 연료소모량에 미치는 영향에 대한 실선 실험 해석

Real Ship Experimental Analysis on the Influence of Fuel Oil Consumption Considering Ship Speed and Ocean Environment

신대운^{*,**,*} · 양찬수^{*,**,*} · 전호군^{*,**,*}

^{*}한국해양대학교 해양과학기술융합대학원

^{**}과학기술연합대학원대학교

^{***}한국해양과학기술원 해양방위안전연구센터

Dae-Woon Shin^{*,**,*} · Chan-Su Yang^{*,**,*} · Ho-Kun Jeon^{*,**,*}

^{*}Ocean Science & Technology School, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea

^{**}Division of Applied Ocean Science, University of Science and Technology, Daejeon, Korea

^{***}Marine Security and Safety Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea

Abstract

Ship fuel consumption is affected by ship speed and ocean environmental factors, which are resistance to ships. There have been not only mainly theoretical studies due to the difficulty of obtaining real ship experiment data, but also insufficient studies on correlation analysis between ship speed and ocean environment factors. In this study, we performed data pre-processing work to interpolate and integrate multi-type and shape data acquired by real ship experiments. Using the integrated data, we analyzed an empirical correlation between FOC and ship speed, ocean environmental factors (wind, current, wave). Navigation experiments for collecting data were performed on five voyages, starting at Busan Port, Ulsan Port, and Ulleungdo Island. FOC data was extracted from the electronic flow meter pre-installed for the research on ship, and ship position (Lon, Lat), speed (SOG) data were acquired from AIS and mobile phone, and ocean environmental data was used grid-type data generated by Korea Operational Oceanographic System (KOOS). As a result of daily correlation analysis, SOG was the greatest influence on FOC. Current velocity had the greatest effect on FOC according to the stronger external force by correlation analysis of average filtering condition. When receiving external force from the ship's heading, Wind speed was derived the highest rate of change in FOC compared to the maximum correlation coefficient of daily analysis. Current velocity was analyzed to have a high effect on FOC at low ship speed (6~7kts), and wind velocity was analyzed to be correlated with FOC at high ship speed (10kts), and wave affected FOC at all ship speed. wind velocity was found to have the greatest influence on the FOC during Maneuvering, and the correlation of wave force was analyzed to be the highest correlation during Cruising. In addition, we found to save the FOC with increasing rate of SOG change to 11% according to a force of 65kg · f acting on ship stern. This study has a meaning in the aspect of using the results of the real ship experiment because the results were derived with the limited condition and ship type, it is necessary that supplementation research.

Keywords : Fuel oil consumption, Correlation analysis, Ocean environment, Ship speed, Real ship experiment

1. 서론

선박용 엔진의 유효 마력은 선박의 저항과 선속의 곱으로 표현되고, 선박의 저항이 선속의 제곱에 비례하므로 연료소모량은 선속의 3승에 비례하고, 속력이 일정할 경우 배수량의 2/3에 비례한다(Kim et al., 2012). 또한 엔진의 연료소모량을 계산할 경우에는 외부의 환경 변화를 입력 변수로 선정하고 그 변화량에 대한 변수를 이용하여 모델식을 유도하는 것이 엔진 연료소모량을 계산하는데 더 유리할 것으로 사료된다(Oh and Yang, 2017). 특히 연료소모량에 영

향을 미치는 외부요인으로는 운항속도와 선박의 경년노화, 외판의 오손, 파랑, 바람, 해류 등과 같은 저항과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Tsujimoto and Nait, 1998).

이와 같이 연료소모량에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 오민석 등(2019)은 선박의 주요제원을 이용하여 선박에 가해지는 외부부하력을 계산하고, 선박이 최대 속도로 운항할 때 필요한 선박의 엔진 동력(kW)을 산정한 후 선박의 부하율(속도)을 고려하여 엔진의 연료소모량을 계산하였다. 하지만 연료소모량 계산에 사용한 입력값은 다수의 엔진 제조사 카달로그를 통해 정리한 수치로 이론적인 연

구에 그쳤다. 또한 김순갑 등(2012)은 실질적인 연료소모량 절감 방안으로 실제 해상에서 선속대비 연료소모량을 계측하여 육상 엔진 실험과 비교·분석함으로써 대상 선박의 연료소모량을 최소화 할 수 있는 최적의 운항 속도와 RPM을 제시하였다. 다만 선박 연료소모량에 영향을 미칠 수 있는 외부요인인 해양기상 조건을 고려하지 못하였다. Jing (2020)는 상선을 대상으로 선종별로 엔진, 발전기 사용량을 이용해 연료소모량 계산 모델을 및 선박 에너지 소모 평가 지수식을 개발하였지만, 선박 속도를 고정값으로 설정하였기 때문에 선박 속도 대비 연료소모량에 대한 연구가 부족한 실정이다. Qizhi(2017)은 선박 내 센서로부터 획득되는 엔진 사용량, 보일러 사용량, 선박 속도, 엔진 마력, 발전기 정보를 기반으로 실시간으로 연료소모량을 계산하는 모니터링 시스템을 설계하고 상관성을 분석해 자가 진단 기능 알고리즘을 개발하였지만, 실제 데이터를 이용한 상관성 분석결과를 제시하지 못했다.

이에 본 연구에서는 선행연구의 미비점을 개선하기 위해 선박 항해 실험을 수행하고 실측자료를 기반으로 선박 속도 및 해양 환경 기상 조건을 고려한 연료소모량(Fuel Oil Consumption, FOC)과 실증적인 상관성 분석을 수행하였다. 특히 우리나라에 등록된 전체 선박의 엔진 중 약 45%가 출력 500g/kW 이하이며, 어선 및 소형선은 대부분 선박용 경유(Marine Gas Oil, MGO)를 사용하고 있어, 이러한 요건을 만족하는 선박을 실험선박으로 선정하였다(Lee et al., 2018). 실선 실험은 MGO를 사용하는 선박을 이용해 7월 5일부터 9월 4일까지 부산항, 울산항 및 울릉도를 기점으로 총 5회를 항해하였다. 원활한 상관성 분석을 위해 수집 주기, 데이터 포맷이 다른 4종의 자료를 보간 및 통합하는 전처리 작업을 수행하고, FOC와 선박속도(Speed of Ground, SOG) 및 해양기상 요인(바람, 해류, 파랑) 간의 상관성 분석을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 실험 선박 및 해역

실험 선박은 총톤수 115ton, 길이 34.0m, 폭 6.4m, 흘수 2.9m 제원의 선박으로 MGO 연료를 사용하며 FOC는 시간당 190g/kw이다. Fig. 1은 실험선인 등대호의 측면사진과 상세 제원을 나타낸 것으로, 선박운항자가 주기관 최대출력 1710HP, 최대 RPM 1800까지 사용하였을 때 최대 속도는 18kts까지 상승한다.

연구 수행 및 분석을 위한 기초 자료는 대상 선박의 실험 항해 결과를 기반으로 진행된다. 실험 선박은 주로 부산항을 기항지로 두고 해양자료 획득 혹은 연구 보조를 목적으로 부정기적으로 항해한다. 실험 선박은 시계열 FOC 및 외부 자료의 획득을 위해 2020년 7월 5일부터 9월 4일까지 부산항, 울산항 및 울릉도를 기점으로 한 이동경로로 총 5회 항해를 수행하였다. 7월 5일 실험선은 부산항을 출항해 울산항으로 이동하였으며, 약 2시간 자료를 수집하였고, 7월 9일은 울산을 출항해 부산항으로 이동해 약 2시간 자료를 수집되었다. 8월 19일 실험선은 부산을 출항해 울산항으로 이동하였고 약 2시간 자료를 수집하였으며, 8월 20일은 울산항 내에서 정박지를 이동해 약 3시간 자료를 수집할 수 있었다. 9월 4일 울산과 울릉도를 왕복해 약 11시간의 장기간 자료를 수집하였다. Fig. 2는 실험선의 항차별 이동 항적과 이동항적에 따른 FOC 사용량을 구름맵 상 도식화한 것으로, 각 지점에서 FOC 사용량은 낮을수록 노란색으로 표시하고 높을수록 빨간색으로 표시하였다.

2.2 연구데이터

연구데이터는 실험선박의 이동을 중심으로 각기 다른 방법 또는 기기를 통해 획득할 수 있으며, 선박에 설치된 전자식 유량계에서 측정되는 FOC와 AIS 및 모바일에서 획득한 선박 위치(Lon, Lat) 및 속도(SOG) 정보, 한국해양과학기술

Classification	Ship specification
Ship name	Deungdaeho
Gross tonnage	115ton
Maximum speed	18kts
Length over all	34.0m
Beam	6.4m
Main engine Maker	Caterpillar
maximum power	1710HP
maximum RPM	1800
FOC rate	190g/kw · h
Number of engine	2 units
Fuel oil type	MGO

Fig. 1. Experiment ship (Deungdaeho) and detailed specification

술원에서 운용하는 운용해양예보시스템(Korea Operational Oceanographic System, KOOS)의 격자형태 바람, 해람, 파랑 정보로 구성된다.

최근 선박 관측 자료 기반 분석연구는 외부 관측 자료보다 자체적으로 획득하는 데이터를 이용하고 있고, 실험선박의 FOC 데이터는 선박 내에서 수집하고자 하였다(Lee et

al., 2020). 등대호에 설치된 유량계는 Analog 형식으로, 데이터를 수집하기 위해서는 운항자의 육안을 통한 주기적인 기록이 필요하다. 하지만 등대호에 탑승하는 운항자의 수는 한정되어 있어, 주기적인 관측이 어려울뿐만 아니라 데이터의 신뢰성도 보장할 수 없다. 데이터의 정확도를 높이기 위해 Fig. 3과 같이 등대호 기관실에 설치된 Analog 유량

Fig. 2. Ship's track and FOC of 5 voyages during the period Jul. 5th to Sep. 4th 2021

Fig. 3. Installation of the digital flow meter

계를 제거하고 유량의 적산량 데이터를 저장 및 출력 가능한 Digital 유량계 FC2000 GAS & Steam Flow Computer(OVAL Engineering INC.)를 설치하였다. 등대호의 연료유는 기관실 상부(Upper deck) 서비스 탱크에서 기관실 하부(Floor deck)의 발전기 및 주기관으로 이동되며, 유량을 측정하기 위해 기관실 하부에 설치된 유량계를 교체하였다. Digital 유량계는 실시간 사용 유량을 유량계 컴퓨터에 삽입된 SD 카드에 자동 저장하고, 사용자는 SD 카드의 파일을 옮겨 데이터 추출이 가능하다. Digital 유량계는 시계열의 누적 유량 자료를 txt 파일로 제공하고, 자료 수집 주기는 1분에서 10분, 시간대는 KST(Korea Standard Time)로 제공된다.

화물선에서는 레이더 또는 GPS와 같은 항해장비를 통해 선박운항자에게 선박의 속도 및 위치를 제공한다. 하지만 등대호는 화물선과 달리 선박 위치를 자동으로 기록하는 기능은 없기 때문에 자료 형태로 제공 가능한 선박자동식별시스템(Automatic Identification System, AIS) 정보를 활용하였다. AIS 정보는 한국해양과학기술원에서 포항 및 부산에 설치한 안테나로부터 수집하였으며, AIS에서 수집되는 정보는 정적정보(선박식별번호, 선박 길이, 선박제원 등)와 동적정보인 선박의 위치(Lon, Lat), 속도(SOG), 침로(COG)로 구성된다(Kim et al., 2016). 다만 AIS 신호 수신 범위를 벗어나는 해역에서 항해하는 선박의 위치 및 속도 정보를 수신하기 위해 2차적인 방법으로 선박에 모바일 폰을 설치하였다. 모바일 폰의 GPS 정보를 자동으로 수집하는 어플리케이션(GPS Logger)을 설치해 구글 드라이브로 자료를 자동 전송할 수 있도록 하였다. AIS는 KST 시간대의 자료를 0.1~5분 주기의 json 파일 형식으로 제공하며, 모바일 폰의 GPS Logger는 UTC(Coordinated Universal Time) 시간대의 자료를 gpx 파일 형식으로 제공한다.

해양기상 정보(바람, 해류, 파랑)는 open source로 기상청 및 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, KHOA)에서 제공하지만, 기상청 자료의 경우 공간 해상도가 너무 낮으며, KHOA에서는 관측지점 시계열 자료만 제공한다. 본 연구에서는 등대호 이동위치에 따른 정확도 높은 해양기상 자료를 획득하기 위해 시계열의 고해상도 해양기상 자료가 제공 가능한 KOOS의 생산 자료를 활용하였다. KOOS란 체계적인 관측시스템을 통해 장기간에 걸쳐 연속적으로 운영되는 실시간 해양관측, 자료통신 및

관리, 수치모델링 및 정보 전달의 종합된 시스템이다(Lee et al., 2015). 시스템은 1시간 간격으로 우리나라 근해의 350m x 350m 공간해상도의 바람, 해류, 파랑 실시간 자료를 생산하고, 바람 및 해류는 24시간 동안의 격자별 U component (Eastward wind)와 V component (Northward wind) 형태로, 파랑은 72시간 동안의 파고(m) 및 파향(°)의 자료 형태로 제공된다. 해양기상 자료는 NetCDF 포맷이며 시간대는 UTC로 생산되어, 자료들의 시간정보를 KST로 통합하였다.

Table 1은 자료 분석에 사용된 4가지 종류의 연구데이터가 생산되는 기기, 시스템과 플랫폼 및 각 데이터별로 상이한 형태, 종류, 데이터 수집주기 및 시간대를 표로 나타낸 것이다.

2.3 연구방법

연구데이터는 생산되는 기기, 시스템이 다르기 때문에 생산되는 결과물의 포맷, 주기, 시간대의 차이가 발생한다. 결과자료의 시간적 비통일성은 자료 간 비교, 상관성 분석을 수행하기에 어려움이 있다. 이에 각 자료 간 비교 분석, 즉 FOC와 외부요인과의 상관성 분석을 위해 Fig. 4와 같이 시간대 통일, 시간 기준 자료 보간, KOOS 해양 자료 추출을 수행하고 선박 중심의 상대 풍향, 유속 및 선박에 미치는 외력을 계산하여 FOC 변화에 영향을 미치는 외부요인을 식별하였다. 자료 처리에는 R(Version 4.03)과 관련 편집기인 R studio 및 Python(3.8)과 관련 편집기인 VS code를 사용하였다.

첫 번째로 유량계의 FOC는 시간정보와 선박의 유량정보를 txt 포맷으로 생산하고, AIS는 json 포맷, GPS Logger는 GPX 포맷, KOOS는 nc 포맷으로 자료를 생산해, 자료의 원활한 처리를 위해 R의 Data reading 라이브러리를 이용해 동일한 포맷(Data frame)으로 재구성하였다.

두 번째로 자료간 상이한 시간대의 통일을 위해 GPS Logger 및 KOOS의 UTC 시간 자료를 KST로 변환해 FOC 및 AIS의 KST 시간 자료와 통일하였다.

세 번째로 자료의 상관분석을 수행하기 위해 서로 다른 자료 수집 주기를 가진 데이터를 동일한 시간간격으로 보간하였다. 특히 본 연구에서는 FOC와 외부요인과의 비교를 수행하기 때문에, 최소 FOC 시간 주기인 1분을 간격 기준으로 보간하였다. 보간 방법은 Python 라이브러리 기반으로

Table 1. Production devices, systems, platforms and data-specific types, types, data collection cycles and time zones of multi-type data acquired by ship experiments

Source	Flowmeter	AIS	GPS logger	KOOS
Source and platform	Deungdaeho	PostgreSQL	Mobile	FTP
Format	.txt	.json	.gpx	.nc
Contents	FOC	Lon, Lat, SOG, COG		Current UV, Wind UV, Wave height, direction
Data period	1~10 minutes	0.1~5 minutes		60 minutes
Time zone	KST(+9 hours)	KST(+9 hours)	UTC	UTC

불규칙적인 시계열 자료를 이용해 선형적으로 누락자료를 보간하는 선형보간법을 사용하였다. 보간 자료는 AIS 및 GPX의 1분 간격 선박 위치(Lon, Lat), 선박 속도(SOG), 선박 침로(COG)이다. 다만 1시간 간격으로 제공되는 KOOS 자료는 보간 해야할 자료 수가 너무 많아 보간 자료의 신뢰성을 확보하기 어려워, 시간 단위의 Raw data를 그대로 사용하였다.

네 번째로 선박 이동 위치 중심의 해양 자료를 획득하기 위해 선박의 위치와 가장 가까운 KOOS의 격자 위치를 검색하였다. 하지만 AIS로부터 획득하는 선박 위치 자료는 점(Point) 자료이며, KOOS는 격자(Polygon) 자료이기 때문에

Fig. 4. Data processing procedure

두 자료는 정확하게 매칭되지 않는다(Lee et al., 2020). 본 연구에서는 R 라이브러리에서 제공하는 Nearest function을 사용해 두 자료의 가장 최근접 위치를 찾고, 해당 위치의 해양 자료를 Fig. 5와 같이 선박 위치별, 시간별로 추출하였다. 다만 KOOS는 격자 내 육상으로 Masking 된 정보가 존재하면 Nan 값을 반환하여 선박이 항내 육지 근처에서 항해 시 자료를 제공받지 못했다.

선박운항자는 설치된 풍향계, 도플러 로그 등을 통해 선박에 미치는 영향을 상대적으로 판단한다. 하지만 KOOS에서는 선박의 방향과 관계없는 U component(Eastward wind)와 V component(Northward wind) 값과 절대파향의 자료를 제공한다. 다섯 번째로 FOC에 영향을 미치는 요인을 정확히 파악하기 위해서는 선박 중심의 상대적인 외력방향이 필요하므로, Fig. 5와 같이 KOOS 자료와 선박의 속도, 침로를 이용해 선박 중심 상대풍향/풍속, 유향/유속, 파향을 계산하였다. 우선 바람과 해류의 경우 U component와 V component를 이용해 절대 풍향/풍속과 절대 유향/유속을 구하고, 선박의 침로와 속도와 절대 풍속/풍향의 차이를 계산해 상대 풍향/풍속, 상대 유향/유속, 상대 파향을 구하였다.

여섯 번째로 선박 제원과 선박과 외력의 교각을 고려해 선박이 받는 힘(Force)의 크기를 파악하기 위해 바람, 해류, 파랑 자료를 이용해 풍압력, 유압력, 파랑력을 구하였다. 풍압력은 바람에 의해 선체에 미치는 영향을 힘으로 나타낸 것이며, Blendermann(1990-1991)은 풍동실험을 통해 공기밀도, 풍속, 풍압면적, 풍압계수로 풍압력을 산출하였다. 풍압력을 계산하기 위해 공기밀도는 대기압 조건으로 가정하고 풍압면적은 등대호의 전장 및 갑판별 높이 및 길이를 이용해 수면상면적(m)을 구하였다. 그리고 풍압계수는 풍동실험에 사용한 22가지 선종 중 등대호와 가장 유사한 소형연구선 선종의 계수를 사용하였다. 유압력은 유동적인 유체의 흐름이 선박에 영향을 미치는 마찰력을 의미하며, 해수 밀도, 유속, 선박의 길이, 현재 흘수 및 유압계수로 구할 수 있다(Froude, 1927; Oortmerssen, 1976). 파랑력은 불규칙적

U component: Eastward component (vector)

V component: Northward component (vector)

UV component = True component (vector)

$Velocity (m/s) = \sqrt{U^2 + V^2}$

$Direction (^\circ) = \arctan2(U, V) \times (180/\pi)$

$COG (^\circ)$: Course over ground

$\alpha (^\circ)$: Relative direction between True component(Direction) and COG

Fig. 5. Calculation for relative direction using ocean environmental data

인 파랑이 수면하 선체에 미치는 저항력을 의미하며, 해수 밀도, 중력가속도, 선박의 길이, 파고 및 파랑계수에 의해 구해진다(Remery, 1973). 유압력과 파랑력의 경우 외력의 교각에 따른 힘의 크기를 다르게 적용하기 위해, Fig. 6과 같이 교각(0~180도) 따라 선수에서 외력을 받을 경우 가중치 1, 선미에서 외력을 받을 경우 1로 하는 cos 함수를 적용해 가중치를 설정하였다.

3. 분석 결과

3.1 FOC 및 외부요인 간 상관관계 분석

본 연구에서는 7월 5일부터 9월 4일까지 총 5회의 항해실험의 결과를 분석하였다. 1차 항해 실험(7월 5일)과 2차 항해 실험(7월9일)에서 FOC 데이터 측정이 10분 간격으로 수

행되었고, 과도한 보간(1분 간격 보간)으로 인한 데이터의 과적합을 예방하기 위해서 5분 간격의 1회 보간만을 수행하였다. 3차 항해실험(8월 19일), 4차 항해실험(8월20일), 5차 항해실험(9월4일)은 FOC 데이터의 측정이 1분 간격으로 수행되었지만 디지털 유량계에서 측정 가능한 최소 유량의 한계로 인해 측정유량이 0으로 기록되는 노이즈 현상이 발생하여 노이즈 처리를 위해 시간간격을 3분으로 보간하였다. 보간된 최종 연구데이터의 샘플수는 1차 항해실험 24개, 2차 항해실험 21개, 3차 항해실험 35개, 4차 항해실험 66개, 5차 항해실험 222개로 FOC와 외부 요인 분석의 상관성 분석에 사용되었다. 또한 바람, 파랑과 같은 해양환경요인은 기본적으로 시계열 자료로 제공되기 때문에 비교하고자 하는 데이터가 동일하게 시계열 자료의 형식을 가진다면 상관관계 분석에 주로 이용된다(Cho and Lee, 2016).

Fig. 6. Calculation method of each force using relative direction and intersection angle of ocean environmental factor. Left: Intersection angle between ship's COG and true wind component. Middle: cosine function for applying to weight. Right: Wind force, wave force, and current force equation

(a) Comparison between FOC and components such as SOG, wind vector, current vector and wave height

(b) Comparison between FOC and components such as SOG, current force, wave force and wind force

Fig. 7. Time series of FOC and other factors on Aug 20th

Fig. 7은 4차 항해실험의 FOC와 외부요인과의 시계열 비교 그래프를 나타낸 것이다. 왼쪽 그림은 x축을 시간으로 하고, y축을 FOC와 SOG, 파고 및 풍속 벡터, 유속벡터로 하는 시간별 그래프를 도식화한 것이며, Fig. 7(b)는 FOC, SOG 및 풍압력, 유압력, 파랑력을 비교한 것이다. 실험선박은 울산항내에서 이동하였고, 해류 및 파고의 변화는 거의 없었다. 그리고 FOC와 SOG의 변화정도를 살펴봤을 때, 12시 12분에서 24분까지 약 10분간 SOG는 0kts(0%)에서 13kts(81%)까지 상승함에 따라 FOC도 그에 따라 1kg/3분(20%)에서 4kg/3분(80%)까지 동일하게 상승하는 경향을 보여, FOC의 대부분 변화는 SOG의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

1차 항해실험에서 선박은 부산에서 울산으로 이동했으며, SOG는 5kts에서 9kts로 서서히 증가하였다. 특히 선박이 항외로 나가는 순간(부산항 방파제 통과)부터 FOC 수치가 급격히 상승하고, 동시에 파고/유속이 증가해 FOC는 두 요인에 의해 영향을 받았을 것으로 예상된다. 2차 항해실험에서 선박은 울산에서 부산으로 이동했으며, SOG가 7kts에서 10kts 사이로 비교적 속도 변화는 없었다. 또한 동일 시간동안 파고는 0.2m, 풍속은 3m/s 내로 거의 변화가 없었고, FOC도 큰 변화가 없어 FOC에 대한 외부 환경의 영향을 파악하기가 어려운 것으로 판단된다.

3차 항해실험에서 선박은 부산에서 울산으로 이동했으며, SOG는 출항 후 10분 이내 0kts(0%)에서 15kts(75%)까지 상승하였고 FOC도 0kg/3분(0%)에서 6kg/3분(66%)으로 동반 상승하였다. 또한 선박이 항외(부산항 방파제 통과)로 나가는 시점부터 파고는 0m(0%)에서 0.6m(100%)로 높아지고, 풍속은 3.8m (56%)에서 6.7m (100%), 해류는 0.1m (25%)에서 0.4m (100%)로 증가하였고, FOC는 6kg/3분(66%)에서 9kg/3분(100%)로 상승하였다. 비록 동 시간에 SOG 또한 15kts(75%)에서 18kts(90%)까지 상승하는 경향을 보였지만, 출항 시점의 FOC와 SOG의 동반 상승량과 비교했을 때 SOG의 상승폭은 크지 않아 FOC는 외력의 변화에 의해 영향을 받았을 것으로 예상된다.

5차 항해실험에서 선박은 울산항에서 울릉도로 이동하였으며, SOG는 5kts에서 13kts 사이로 유지하면서 항해하였고, SOG는 FOC의 변동에 가장 큰 상관성이 있는 것으로 보이

지만, 다른 외력 요인에 대한 영향은 찾아보기 어려웠다.

4차 항해실험을 포함한 전체 5회의 항해실험을 살펴봤을 때, FOC와 SOG가 변화하는 전체적인 경향은 유사한 것으로 확인되었다. 하지만 외부 환경 요인의 경우 크기 변동이 있음에도 불구하고 FOC의 변화가 거의 없는 구간이 존재하였다. 이는 외력의 절대적인 크기가 일정 이하일 경우 선박에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 판단되어, 조건별 분석을 수행해야 할 필요성이 있다.

Table 2는 일자별로 FOC와 SOG, 유속, 유압력, 파고, 파랑력, 풍속, 풍압력 간 상관관계 분석 결과를 표로 나타낸 것이다. 다만 실험 결과 중에서 유의미한 결과를 도출하기 위해 상관계수 중 양의 상관관계의 요소만을 기술하였다. 1차 항해실험에서는 FOC와 SOG, 유속, 파고, 파랑력이 0.8 이상의 높은 상관관계를 보였다. 2차 항해실험에서는 모든 외부요인과 상관계수 0.5 이하의 낮은 상관관계를 보였는데, 이는 FOC의 변화가 거의 없기 때문에 외부 요인과 비교가 어렵기 때문이라 판단된다. 3차 항해실험에서는 SOG, 풍속, 파고가 FOC와 상관계수 0.7 이상의 높은 상관관계를 보였다. 4차 항해실험에서는 SOG만이 FOC와 상관계수 0.8 이상의 높은 상관관계를 보였다. 5차 항해실험에서는 모든 외부 요인이 상관계수 0.4 이하로 측정되어 낮은 상관성을 보였다. 이는 장기간의 항해로 일정한 속력을 유지하면서 많은 변동이 없었기 때문에 외부요인과 상관성을 띄는 특징이 나타나지 않았기 때문이라 판단된다, 다만 갑작스런 속도 변화가 발생 시 FOC도 유사한 변화를 보이는 것으로 나타났다. 각 외부요인별 최대 상관계수는 SOG 0.93, 유속 0.93, 파랑력 0.91, 파고 0.86, 풍속 0.77 순으로 FOC에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.2 조건별 FOC 및 해양기상 요인 간 상관관계 분석

Fig. 8은 1차 항해실험(7월5일) 비교 그래프를 나타낸 것으로 4차 항해실험과 동일하게 FOC는 SOG의 크기에 따라 변화하는 경향을 가지는 것으로 보인다. 하지만 바람 및 유속의 크기가 상대적으로 상승한 구간에서는 FOC의 변화 없이 SOG가 증가하는 것을 확인할 수 있어, 특정조건하에서 FOC와 해양기상 요인과의 상관관계 분석이 필요한 것으로 판단된다.

Table 2. Average and maximum correlation coefficient table of FOC and SOG, current velocity, wave height, wind velocity, current force, wave force, and wind force by each day

Classification	SOG	Current velocity	Current force	Wave height	Wave force	Wind velocity	Wind force
1 st Experiment (2020.07.05.)	0.80	0.93	-	0.86	0.91	0.20	-
2 nd Experiment (2020.07.09.)	0.44	-	-	0.36	0.4	0.41	-
3 rd Experiment (2020.08.19.)	0.80	0.08	0.03	0.68	0.52	0.77	-
4 th Experiment (2020.08.20.)	0.93	0.63	-	0.61	0.46	-	-
5 th Experiment (2020.09.04.)	0.40	0.03	-	0.08	-	0.17	0.12
Maximum coefficient	0.93	0.93	0.03	0.86	0.91	0.77	0.12

Fig. 8. Time series comparison graph on July 5th with FOC and the other factors.
SOG increase without FOC change due to increase of wind and current speed

Table 3. Correlation coefficient table of FOC and current velocity, wave force, and wind velocity by mean filtering condition

Filtering condition	Current velocity > 0.3 m/s	Wave force > 50 kg · f	Wind velocity > 3 m/s
Correlation coefficient	0.75	0.56	0.44

3.2.1 평균값 조건 상관관계 분석

FOC에 대한 해양기상 요인의 영향을 다각도로 파악하기 위해 풍속, 유속, 파고, 풍압력, 유압력, 파랑력 자료 기반 각 요인의 크기를 필터링하여 FOC와의 상관관계를 분석하였다. 필터링의 기준을 정하는데 있어, 어느 정도의 값이 명확하게 선박에 영향을 미치는지 확인할 수 없기 때문에 확률론적 방법을 이용하고자 하였다. 확률론적 방법은 정규분포 신뢰구간, 사분위수, 최빈값, 평균값 등이 존재하지만 대부분의 방법은 많은 데이터를 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 한정된 데이터 수를 기반으로 상관관계 분석 시 해석 오류에 대한 발생을 최소화하고 각 요인별 상관성에 대한 특징을 부각할 수 있는 일반적인 방법(평균)을 사용하고자 하였고, 필터링 조건은 아래와 같다.

(1) 유속 0.3m/s 초과, (2) 유압력 6톤 초과, (3) 파고 0.5m 초과, (4) 파랑력 50kg · f 이상, (5) 풍속 3 m/s 초과, (6) 풍압력 50kg · f 이상으로 6가지 조건을 설정하였다.

Table 3은 위 조건이 충족하는 데이터를 기반으로, FOC와 상관분석을 수행한 결과 중 양의 상관계수를 표로 나타낸 것이다. 또한 유의미한 결과를 추출하기 위해 각 필터링을 수행한 요인에 대한 상관계수만을 살펴보았다. 상관성 분석 결과, 유속이 강할 때 유속과 FOC의 상관계수는 0.75로 분석되었고, 유압력이 강한 경우 유압력과 FOC는 음의 상관성을 띄는 것으로 나타났다. FOC는 유속의 방향을 포함한 유압력에 영향을 받기 보다는 유속과 더 큰 상관성이 있는 것으로 판단된다. 풍압이 강할 때 풍압과 FOC의 상관

계수는 0.44로 분석되었고, 풍압력이 강할 때 풍압력과 FOC의 상관계수는 음수로 산출되어 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다. 파고가 높을 때 풍속과 FOC의 상관계수는 0에 가까워 FOC와 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났으며, 파랑력과 FOC의 상관계수(0.56)가 더 높은 것으로 분석되었다.

특정조건하에서 외부 요인과 FOC의 상관 분석 결과, 바람과 해류는 방향을 고려한 풍압력, 유압력보다 속도만을 고려한 요인에 상관관계가 높은 것으로 분석되었고, 파랑은 파고의 높이보다 파랑의 방향까지 고려한 풍압력과 더 높은 상관성을 보였다. 이는 선박에 미치는 외력의 방향이 일정하지 않고, 짧은 시간 내 방향 변화의 정도가 높아 상관성 분석에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 외부 요인별 FOC와 상관계수 크기 비교 결과, 유속이 0.75로 상관성이 가장 높았고 다음으로 파랑력이 0.56, 풍속이 0.44 순으로 나타났다. 일자별 상관관계 분석 결과와 비교했을 때, FOC에 영향을 미치는 요소는 유속, 파랑, 풍속의 동일한 순서로 나타났지만 상관계수 수치 크기는 상이하였다. 특정조건 하 상관계수의 일자별 상관계수 최대값 대비 감소율은 유속 19%, 파랑 32%, 풍속 42%로 분석되었는데, 이는 유속이 일정 이상 크기일 경우 FOC에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2.2 선수 정면 외력 영향 분석

선박이 외력의 영향을 받을 때 해양기상 요인의 방향에 따라 선박에 미치는 힘은 달라진다. 실선 실험을 통한 선행

Table 4. Correlation coefficient table of FOC and current velocity, wave height, and wind velocity against ship's heading

Filtering condition	Current velocity -30° < Relative direction < 30°	Wave height -30° < Relative direction < 30°	Wind velocity -30° < Relative direction < 30
Correlation coefficient	0.65	0.74	0.70

Table 5. Correlation coefficient table of FOC and current velocity, wave height, wave force, and wind velocity, wind force by each one knot of SOG

Classification (kts)	Current velocity	Wave height	Wave force	Wind velocity	Wind force
6 ≤ SOG < 7	0.92	0.63	0.31	-	-
7 ≤ SOG < 8	0.69	0.02	0.52	-	-
8 ≤ SOG < 9	0.14	-	0.51	0.07	-
9 ≤ SOG < 10	-	0.35	-	0.27	-
10 ≤ SOG < 11	0.39	0.61	-	-	0.42
Maximum coefficient	0.92	0.63	0.52	0.27	0.42

연구는 선박 선수 정면에서 좌우로 30도일 때 선박에 미치는 힘이 가장 강한 것으로 제시하였고, 선행연구의 결과를 이용해 선박 투묘 시 외력에 따른 주요 가능성에 대한 연구가 다수 진행되었다(Honda, 1995; Jung et al., 2009). Table 4는 선박에 가장 강할 때 해양기상 요인에 대한 영향을 파악하기 위해 선수 정면에서 좌우 30도까지 방향의 자료를 필터링하여 FOC와 상관관계 분석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 각 해양기상 요인에서 방향이 -30도에서 30도인 데이터는 유속 124개, 파고 78개, 풍속 45개로 분석에 사용하였다. 상관 분석 결과, 파고 상관계수가 0.74, 파고 0.70, 유속 0.65 순으로 계산되었고, 일자별 상관분석 결과인 유속, 파고, 풍속 영향 순서와 다르게 나타났다. 일자별 상관계수 최대값 대비 감소율을 살펴보면, 유속 30%, 파고 13%, 풍속 9%로, 이는 유속보다 풍속, 파고가 선수 정면과 같은 외력 방향에 대한 영향을 더 받는 것으로 판단된다.

3.2.3 선박속도별 상관관계 분석

일자별 FOC와 외부요인의 자료와 그래프 분석을 통해 FOC는 SOG에 가장 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 여기서 해양기상 요인이 선박에 미치는 영향을 세부적으로 파악하기 위해서는 SOG 수치가 일정할 때 해양환경 요인의 변화를 파악하고 상관관계 분석을 수행할 필요가 있다. 이를 위해 0~20kts까지 분포되어 있는 SOG를 각 kts별로 범위를 지정하고 20개 집합으로 필터링하였다. 다만 자료 수의 부족으로 상관관계 분석에 사용할 수 있는 데이터 수의 속도별 데이터 집합(데이터 수 10개 이상)만 추출하였다. Table 5는 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11kts 속도구간에 해당하는 유속, 파고, 파랑력, 풍속, 풍압력과 FOC와의 상관관계 분석결과를 나타낸 것이다. 상관 분석 결과, 6kts 일 때 유속(0.92)이 FOC에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 파고는 6-7, 10-11kts에서 상관계수가 가장 높았다. 파고는 7-8, 8-9kts에

서 상관계수 약 0.5로 분석되었고, 풍압력은 10kts에서 상관계수 0.42로 상대적으로 낮은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 분석 범위를 6~10kts로 한정할 때, 유속은 비교적 저속인 6-7kts에서, 풍속은 10kts에서, 파랑력은 속도와 관계없이 전반적으로 영향을 주는 것으로 판단된다. 해양기상 요인별 최대 상관계수는 유속 0.92, 파고 0.63, 파랑력 0.52, 풍속 0.42 순으로 나타났다.

3.2.4 운항특성별 상관관계 분석

국내 연근해를 운항하는 연안화물선은 운항(cruising), 접안(manuevering), 정박(hotelling) 모드의 운항 특성을 지니고 있다(Kim et al., 2015). 소형선 및 어선은 화물선과 동일한 운항 형태로 이동하지 않지만 항내에서 입출항을 목적으로 하는 운항과 항외에서 장시간 최대 속력으로 이동하는 운항 특성은 다르다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 각 항만의 방파제를 기준으로 항내의 접안(manuevering) 항해와 항외의 운항(cruising) 항해로 구분해 FOC와 외부요인 간 상관관계를 분석하였다. 접안 항해에서 사용한 데이터는 8월 19일 부산항 내, 8월 20일 울산항 내에서 이동한 40개 데이터를 사용하였고, 운항 항해에서는 접안 항해 외에서 사용한 데이터 외 276개 데이터를 사용하였다. Table 6은 접안 및 운항 항해별 FOC와 외부 요인간 상관분석을 수행한 결과를 나타낸 것으로, 접안 항해 시 풍속(0.67)이 FOC에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 항만의 방파제가 파랑과 해류의 침입을 방지하는 역할을 하기 때문에 상대적으로 풍속의 영향이 증가한 것으로 판단된다. 운항 항해에서는 파랑력이 상관계수 0.42로 FOC에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었고, 선박이 일정한 속력으로 항해 시 풍속, 해류속도보다 파고의 영향을 좀 더 크게 받는 것으로 판단된다.

Table 6. Correlation coefficient table of FOC and current velocity, wave height, wave force, wind velocity by navigation type

Classification	Current velocity	Wave height	Wave force	Wind velocity
Maneuvering	0.26	0.15	0.13	0.67
Cruising	0.25	-	0.42	0.16

Table 7. External factors and correlation coefficient affecting FOC

Classification		External factors(correlation coefficient)
Maximum value of Daily analysis		SOG(0.93), Current velocity(0.93), Wave force(0.91), Wave height(0.86), Wind velocity(0.77)
Mean filtering of factors		Current velocity(0.75), Wave force(0.56), Wind velocity(0.44)
Receiving factors from ship's heading		Wave height(0.74), Wind velocity(0.70), Current velocity(0.65)
Correlation analysis by SOG		Current velocity(0.92), Wave height(0.63), Wave force(0.52), Wind force(0.42)
Navigation type	Maneuvering	Wind velocity(0.67)
	Cruising	Wave force(0.42)

Fig. 9. Time series comparison graph at Aug 19th with FOC and other factors. SOG increase without FOC change due to increase of wind and current speed

3.3 상관관계 분석 결과 및 외력 영향 분석

3.3.1 상관관계 분석 결과

Table 7은 일자별, 평균 필터링 조건, 운항 형태에 따라 FOC에 상대적으로 큰 영향을 미치는 외부 요인들과 상관 계수 결과를 표로 정리한 것이다. 일자별 분석결과를 살펴 보면, SOG가 FOC에 가장 큰 영향을 미친 것으로 나타났고 평균적으로는 파고의 영향이 컸으며, 일자에 따른 최대 상관 계수는 유속, 파랑력, 파고, 풍속, 모든 종류의 해양기상 요인들이 FOC에 강한 영향을 미친 것으로 나타났다. 각 해양기상 요인 평균값 이상의 필터링 조건하에서 FOC에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 유속으로 분석되었고, 파랑력, 풍속 순으로 FOC에 영향이 있는 것으로 나타났다. 선박 선수 정면에서 받는 해양기상 요인은 파고, 풍속, 유속 순으로 분석되었으나, 상관계수 차이가 크지 않은 것으로 나타났

다. SOG별 상관계수 분석결과, 6~7kts에서 유속의 영향이 컸으며, 10kts에서 풍속의 상관성이 약하게 존재하였으며, 파고는 속도와 상관없이 전반적으로 FOC에 영향을 주었다.

3.3.2 FOC / SOG 변화율 및 외력 영향 분석

Fig. 9는 3차 항해실험(8월19일) 비교 그래프를 나타낸 것으로 Fig. 8과 동일하게 FOC는 SOG의 크기에 따라 변화하는 경향을 가지는 것으로 보인다. 하지만 특정구간에서 FOC의 증가 없이 SOG가 상승하는 현상을 보이는데, 이는 바람 및 유속의 크기가 증가하였을 뿐만 아니라 장시간동안 선미에서 선수 방향으로 진행해, 선박에 외력이 선미에서 밀어주는 방향으로 작용함에 따라 선박의 SOG가 증가한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Fig. 9와 같이 FOC, SOG와 지속적으로 선

Fig. 10. The change rate of FOC and SOG according to total force (sum of current force, wind force, and wave force)

박에 영향을 끼치는 외력의 상관성을 분석하기 위해 7월 5일부터 9월 4일까지 5회 항해실험 중 SOG와 FOC의 변화 양상이 다르고 동일한 방향에서 장시간 불어오는 일정 크기의 외력 자료를 필터링해 추출하였다. 데이터는 138개 자료가 사용되었으며, Fig. 10은 FOG 및 SOG의 변화율과 동일 시간에 작용하는 풍압력, 유압력, 파랑력의 합(Total force)을 비교한 것이다. 단, FOC와 SOG의 서로 상이한 단위의 변화율을 통합하기 위해 각 결과를 표준화(Standardization)하였다. 그래프의 SOG 변화율은 FOC 변화율보다 대부분 높아 기관 사용 마력보다 SOG가 더 가파르게 상승한다고 볼 수 있다. 또한 합력(Total force)은 일부구간을 제외하고 0 이하로 산출되었고, 외력이 지속적으로 선박의 선미를 밀어주는 힘으로 작용하는 것으로 판단된다. 선미 작용하는 힘으로 인해 SOG가 상승한 것으로 판단되며, 선박에 미치는 외력이 FOC에 직접적으로 영향을 미치는 것은 아니지만, 속도를 증가시킴으로써 FOC를 절감시킨다고 볼 수 있다. FOC의 평균 변화율은 0.58, SOG의 평균 변화율은 0.69, 평균 합력은 -65kg·f로 산출되었으며, 선미에서 평균 65kg의 힘이 작용하면 FOC 대비 SOG의 변화율이 11% 더 상승하는 것으로 분석되었다.

4. 결론

선박 연료소모량은 선속과 선박에 미치는 저항인 해양기상 요인에 영향을 받는다. 하지만 실선 데이터 획득의 어려움으로 인해 이론적인 연구가 주로 진행되었고, 선속과 해양기상 요인을 상관성 분석 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 선박에 디지털 유량계를 설치하여 5회 항해에서 측정한 선박 연료소모량과 선박의 속도 및 해양기상 요인과의 상관성을 분석해 선박 연료소모량에 영향을 미치는 요인에 대한 결과를 도출하였다. 상관성 분석을 위해

FOC, 선박속도, 바람, 해류, 파랑 데이터를 보간·통합하는 전처리 작업을 수행하였다. 일자별 FOC와 외부 요소와의 상관성 분석 결과, SOG가 FOC와 가장 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났고, 최대 상관계수는 유속(0.93), 파랑력(0.91), 파고(0.86), 풍속(0.77) 순으로 도출되었다. 각 해양기상 요인의 평균 이상 필터링 조건에서 유속(0.75)이 FOC와 상관성이 가장 높은 것으로 나타나, 외력이 강할수록 FOC에 대한 유속의 영향이 강해지는 것으로 분석되었다. 선박 선수정면에서 외력을 받을 때 FOC와 상관계수는 파고(0.74), 풍속(0.70), 유속(0.65) 순으로 계산되었고, 일자별 최대 상관계수 대비 풍속의 FOC 변화에 영향을 미치는 비율이 가장 높았다. 속도별 상관성 분석결과, 유속은 비교적 저속(6~7kts)에서 FOC에 영향이 높았고 10kts에서 풍속의 상관계수는 0.42로 도출되었으며, 파랑은 전 속도에서 FOC에 영향을 주었다. 선박의 접안 항해 시에는 풍속이 FOC에 가장 큰 영향(0.67)을 미치는 것으로 나타났고, 운항 항해 시는 파랑력의 상관성(0.42)이 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한 선미에서 작용하는 풍압력, 유압력, 파랑력으로 인해 SOG가 상승하고, FOC가 절감되는 것으로 나타났다. 본 연구는 실선실험의 결과를 이용하였다는 측면에서 의미를 가질 수 있지만 한정된 자료로 결과를 도출하였고 제한된 선종에 대해서만 분석하였기 때문에, 추후 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 “부산 항만지역에서 미세먼지 발생과 거동에 대한 모니터링” 및 해양수산부 재원으로 수행된 “동북아 항만간 협력관계 촉진방안 연구용역”의 연구 결과 중 일부이다.

References

- Blendermann, W. (1990-1991). "Chapter 3.1 External Forces, Wind Forces of Manoeuvring Technical Manual." *Schiff & Hafen*, No. 1990:2, pp. 41-43; No. 1990:3, pp. 55-58; No. 1991:4, pp. 39-41.
- Cho, H. Y. and Lee, G. S. (2016). "Statistical Analysis on the Wind and Wave Monitoring Data." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 3, No. 1, pp. 36-41 (in Korean).
- Froude, R. E. (1927). "On the Constant System of Notation of Results of Experiments on Models Used at the Admiralty Experiment Works." *Transaction of the Institution of Naval Architects*, No. 69.
- Honda, K. (2005). "'Guidelines of Maneuvering' Chapter 4 Berthing Maneuvering and Anchoring." *Sungsangdang*, pp. 116-123.
- Jeong, C. H., Lee, Y. S., Kim, J. S. and Kong, K. Y. (2015). "A Study on the Holding Power Coefficient of AC-14 type and ASS type Anchor in Actual Ships." *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 613-618.
- Jing, L. and Yuanming, J. (2020). "Calculation Method of Marine Ship Fuel Consumption." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 571, pp. 1-8.
- Kim, P. S., Lee, J. T., Son, J. H., Choi, S. J., Park, S. K., Hong, H. S. and Kim, J. S. (2015). "A Study on Space Allocation Method of GHGs Emissions from Domestic Coastal Shipping." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 345-355 (in Korean).
- Kim, S. K., Lee, Y. S., Kong, G. Y., Kim, J. P. and Jung, C. H. (2012). "A Study on the Ship's Speed for Reducing the Fuel Oil Consumption in Actual Ships." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safe*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-47 (in Korean).
- Kim, T. H., Jeong, J. H. and Yang, C. S. (2016). "Construction and Operation of AIS System on Socheongcho Ocean Research Station." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 3, No. 2, pp. 74-80 (in Korean).
- KIOST (2013). "Development of Korea Operational Oceanographic System(KOOS)." *Korea Institute of Ocean Science and Technology* (in Korean).
- Lee, D. Y., Park, K. S. and Shi, J. (2009). "Establishment of an Operational Oceanographic System for Regional Seas around Korea." *Ocean and Polar Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 361-368 (in Korean).
- Lee, H. T., Lee, J. S., Cho, J. W., Yang, H. and Cho, I. S. (2020). "A Study on the Pattern of Pilot's Maneuvering using K-means Clustering of Ship's Berthing Velocity." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 221-232 (in Korean).
- Lee, J. S., Son, W. J., Lee, H. T. and Cho, I. S. (2020). "A Study on the Factors Affecting Optimal Site of Offshore Wind Farm from the Perspective of Maritime Traffic using Spatial Analysis." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 2, pp. 85-96 (in Korean).
- Lee, K. Y., Rho, B. S., Lee, W. J. and Choi, J. H. (2018). "A Study on the Effect of Sulfur Content in Fuel Oil on the Emission of Air Pollutants According to Operating Conditions of Small Ship Engines." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 24, No. 6, pp. 834-880 (in Korean).
- Oh, M. S. and Yang, K. U. (2019). "Calculation Method of Fuel Consumption Considering the Hull." *The Korea Fluid Power Systems Society*, Vol. 6, pp. 108-114 (in Korean).
- Oortmerssen, G. V. (1976). "The Motions of a Ship on Shallow Water." *Ocean Engineering*, Vol. 3, pp. 221-255.
- Qizhi, Y., Zhuoran, D., Kaimiao, D. and Guangming, L. (2017). "Design of a Real-time Ship Fuel Consumption Monitoring System with Self-checking Function." *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Banff, Canada, August 8-10, pp. 735-738.
- Remery, G. F. M. and Oortmerssen, G. V. (1973). "The Mean Wave and Current Forces of Offshore Structures and their Role in the Design of Mooring Systems." *Offshore Technology Conference*, pp. 169-180.
- Tsujimoto, M. and Naito, S. (1998). "Evaluation on Ship Performance in Actual Seas - Ship Speed, Fuel Oil Consumption and Main Engine Power." *Journal of Kansai Society of Naval Architects*, No. 229, pp. 69-78.