



상업 운항 중인 대형 컨테이너선의 항차 중 속력 시운전을 통한 선속-동력 특성 연구 Part I

김호^{1,†}·이준형²·장진호²·안해성²·강대열³·변상수⁴
자율운항선박기술개발사업 통합사업단¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소²
삼성중공업³
에이치엠엠오션서비스⁴

Study on the Speed-Power Characteristics Through a Speed Trial of a Large Container Vessel During a Commercial Voyage Part I

Ho Kim^{1,†}·Joon-Hyoung Lee²·Jin-Ho Jang²·Hae-Seong Ahn²·Dae-Youl Kang³·Sang-Su Byeon⁴
Korea Autonomous Surface Ship Project Office¹
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering²
Samsung Heavy Industries³
HMM Ocean Service⁴

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.

This paper presents the analysis of the speed-power performance in the real sea using a large container vessel data provided as a test bed from a shipping company. To perform a speed trial of the vessel during a commercial voyage, the on-board measuring device and various operation data acquisition systems were mounted on the vessel for long-term performance monitoring and the voyage operated under the container loading condition close to the design draft was adopted. The content of this paper consists of Part I and Part II. Part I, such as this paper, contains the speed trial method and analysis results of the operating vessel. Part II contains the analysis of the speed-power characteristics change over time and before and after hull cleaning using operation data measured from the voyage operated under a condition similar to the speed trial.

Keywords : Sea trial(시운전), Operating vessel(운항 중인 선박), Large container vessel(대형 컨테이너선), Speed-power characteristics (선속-동력 특성)

1. 서 론

전 지구적으로 선박에서 배출되는 온실가스(Green House Gas, GHG)의 배출량 감축을 위한 규제가 강화되고 있다. 특히 MARPOL Annex VI는 선박에서 배출되는 온실가스에 대하여 선박의 에너지효율에 관련된 가이드라인을 제시하고 있다. 대표적인 에너지효율 지수로는 선박의 설계단계에서 적용되는 EEDI(Energy Efficiency Design Index), 선박의 운항단계에서 적용되는 EEOI(Energy Efficiency Operational Indicator) 등이 있으며, 최근에는 현존하는 모든 선박에 적용되는 EEXI(Energy

Efficiency Existing Ship Index)와 CII(Carbon Intensity Indicator)의 적용을 MEPC 75차에서 승인하였고, MEPC 76차에서는 그 채택을 신중하게 검토하고 있다 (IMO, 2020).

온실가스 배출 관련 요구조건을 만족시키지 못하면 선박 인도 및 운항에 제약을 받게 되므로, 온실가스 배출량과 관련된 지수들을 정확히 산정하기 위해 조선·해운 분야의 관심은 자연스럽게 실해역을 항해하는 선박의 운항성능에 집중되고 있다. 또한, 각종 선박 성능 모니터링 장비의 개발과 더불어 선박 운항 관련 Big data 분석을 위한 다양한 성능 해석 기법의 개발과 적용이 활발하게 이루어지고 있으며, 운항 중인 선박의 연비 지표를 확립하고 선박의 실해역 운항성능을 향상시키기 위한 연

구 개발 활동이 활발히 진행되고 있다. 하지만 실해역 운항 선박의 실선 성능 분석에 대한 기존 연구 사례는 국내외를 통틀어 공개된 연구 결과가 많지 않은 실정이다.

본 논문은 해운사로부터 테스트 베드(test bed)로 제공받은 약 13,000TEU급 대형 컨테이너선을 활용하여 실해역 실선 선속-동력 성능 분석을 수행한 내용을 다루고 있다. On-board 계측 장치 및 각종 운항 데이터 취득 시스템을 선박에 탑재하여 장기간 성능 모니터링을 수행하였으며, 설계흘수에 근접한 컨테이너 적재 조건으로 운항하는 항차를 선정하여, 정상 운항 중 속력 시운전을 수행하였다. 본 논문은 Part I과 Part II로 구성되어 있는데, Part I은 운항선의 속력 시운전 수행 방법과 해석 결과를 주요 내용으로 하고 있다. 추후 Part II에서는 운항선 속력 시운전이 수행된 조건과 유사한 조건으로 운항하는 항차에서 계측된 운항 데이터를 활용하여 시간의 경과 및 선체 청소(hull cleaning) 전후의 선속-동력 특성의 변화를 분석하고자 한다.

2. 운항선 실선 성능 관련 연구 동향

현재 운항 중인 상선에 대한 성능 분석 결과는 해당 선사에 미치는 영향이 지대하므로 공개하기 어려운 것이 현실이다. 또한, 연구 목적에 적합한 대상 선박을 선정하기 위해서는 선박의 선종과 운항 항로, 그리고 선령에 따른 정기 입거 시기의 예측과 선내 탑재 장비의 성능 확인 및 운항 데이터 취득기간 확보 등, 다양한 요구조건을 만족시킬 수 있어야 한다. 이와 같은 이유로 실해역 운항 선박의 성능 분석에 관한 연구는 국내의 경우 조선소 및 해운사에서 자체적으로 수행하거나, 국가연구개발과제 등을 통해 수행되고 있다. 이러한 실해역 운항 선박의 실선 계측 자료는 선박의 고유한 성능을 분석하기 위한 연구 및 유럽 연합 등 선진국에 의한 모형선-실선 해석 기법의 재정립에 대응하기 위한 연구에도 활용되고 있다.

Jung et al. (2007,I)은 한국해양대학교 실습선 ‘한바다호’를 테스트 베드로 활용하여 선교에 선체 감시 장치(hull monitoring system)를 설치하여 여러 항차의 연안 항해와 국제 항해에서 취득한 운항데이터를 토대로 모형시험 및 이론계산 결과와 상호 비교하여 내항성능을 평가하였으며, 이후 상·하가속도와 승선감의 상호 관계에 대한 연구 (Jung et al., 2008,II)를 수행하였다. 또한, 수차례의 선회시험을 통해 조종성능을 분석하여 정량화하였다 (Jung et al., 2008,III).

KRISO (2019)는 온실가스 저감 및 실해역 에너지 효율 향상을 위한 운항선 선속-동력 고정도 해석 기반 기술개발 국책과제를 통하여 실해역 운항 선박의 해상 상태 및 운항 상태에 따른 실시간 운항 데이터 계측(on-board) 및 부가저항 해석을 수행하였다. 또한, Park et al. (2019)은 대상 선박의 표준 운항 상태의 기준 선속에서 선속-동력 해석 수행을 위한 프로그램(SPA, Ship Performance Analysis)을 개발하였으며, Lee et al. (2019)은 운항 중인 175K 산적화물선의 운항 데이터를 취득하여, 선속, 파고, 바람에 대한 유효성을 검토하고, 모형 시험 결과와 표준 운

항 상태에서의 선속-동력 성능을 비교 분석하였다.

또한, KRISO (2020)는 실선의 추진 성능 계측을 기반으로 한 모형선-실선 상관관계 정확도 향상 기술개발 국책과제를 통하여 총 82척의 시운전자료를 확보하고, 국내외 총 8개 기관에서 적용하고 있는 모형시험 해석법 관련 문제점을 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 다양한 흘수 조건에서 모형선-실선 상관관계의 정립 및 확장 방안을 제시하였다.

Yoo et al. (2019)은 선박의 운항 데이터와 기상 데이터를 이용하여 머신러닝 기법을 통해 실선의 선속-동력 성능을 모델링하기 위한 새로운 절차를 제시하였다.

국외의 운항선 실선 성능 분석 관련 대표적인 연구 사례를 정리하면 다음과 같다,

2008년도부터 3년에 걸쳐 일본 해상기술안전연구소(NMRI)는 컨테이너선, 자동차 운반선, 유조선, 벌크선 네 가지 선종의 실해역 성능을 평가 및 예측하기 위하여 “Development of Ship Performance Index Project(10 mode at Sea)”를 수행하였다. NMRI (2009)는 실해역 해상 상태를 10단계로 구분하고, 대상 해역을 운항할 때 발생하는 선속 감소율을 예측하는 하이브리드 계산식을 개발하였다.

Kuroda et al. (2012)은 280 m 길이의 컨테이너선 운항 데이터를 이용하여, 컨테이너 적재 조건이 실제 해상에서 선속 감소에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

최근 2017년부터 3년간 일본의 국립연구개발법인 해상·항만·항공기술연구소와 해상기술안전연구소가 대표적인 실해역 실선 성능 평가 공동연구인 “OCTRAVIA Project”를 주관하여 수행한 바 있다. 해운사와 조선소를 포함하는 25개의 기관 및 기업이 참여하였으며, 여섯 가지 선종, 열 척의 선박에 대하여 해상 상태에 따른 선속 감소율 및 연료 소모량 등 실해역 실선 성능을 정확하게 평가하는 방법을 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

이 외에 실해역 운항 선박의 성능 모니터링 및 계측 방법과 성능 분석에 관한 연구도 지속적으로 수행되고 있다.

Yu et al. (2016), Kim & Kim (2016), Lee et al. (2016)은 ISO15016:2015 시운전 수행 및 해석 절차를 적용하여 속력 시운전 해석프로그램들과의 상호 비교를 통해 탱커, 산적화물선, 컨테이너선, LNG 운반선에 대해 최적화된 시운전 해석 방법을 검토하였다.

한편, 2016년 ISO19030 성능 모니터링 절차의 표준화를 통하여 운항선의 성능을 분석하고 모니터링 할 수 있는 기준이 마련되었는데, 이는 수집된 운항 데이터를 보정과 필터링 작업을 통해 정수 중의 상태로 동력을 보정하고, 보정된 동력으로부터 얻을 수 있는 신조 상태의 선박과 현재 선박의 속도 차이를 구하는 방식이다. Kim et al. (2020)은 ISO19030을 실제 운항 선박 3척의 장기간 운항 데이터에 적용하여 ISO19030의 효용성과 개선점을 제시한 바 있다.

운항선의 실해역 계측 자료는 상기 서술한 연구 목적 이외에도 EU MRV(EU Monitoring, Reporting, and Verification of CO₂ emission) 및 IMO DCS(IMO Data Collection System on fuel consumption) 평가를 위한 중요한 자료로써 활용될 수 있다.

3. 운항선의 속력 시운전

3.1 운항선 속력 시운전 준비

운항선 속력 시운전은 신조 선박 건조 후 조선소에서 수행되는 시운전과 달리, 실제 운항 조건에서 시운전 중에 발생할 수 있는 다양한 사고에 대한 책임과 보상, 보험 가입, 법률적인 문제 등으로부터 보호 받을 수 있는 안전장치가 제도적으로 정비되어 있지 않다. 그러므로 운항선 속력 시운전을 수행하기 위한 사전 준비 작업은 그 어느 것 하나 소홀히 할 수 없으며, 시운전 수행 중 사고발생 시 그 법적 책임이 막중하다는 사실을 항상 명심해야 한다.

운항 중인 대형 컨테이너선의 속력 시운전을 성공적으로 수행하기 위해서, 운항선 시운전 수행 2년 전부터 관련 해운선사와 정기적인 협의를 진행하고 사전 시뮬레이션을 반복해서 수행하였다. 사전 준비 내용 및 필수 점검 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 시운전 계측 항목 선정
- 기존에 탑재 되어있는 항해 장비 및 시스템 점검
- 시운전 계측 장비와 시스템의 설치 및 점검
- 선체 표면 거칠기 및 추진기 상태 점검
- 흘수, 트림, 배수량 및 화물 적재 상태 확인
- 시운전 시험조건 선정
- 해상 상태에 대한 정보 확인
- 시운전 해역 및 시운전 코스 선정

3.1.1 운항선 속력 시운전 계측 항목

24차 ITTC에서는 속력 시운전을 수행하기에 앞서 계측 장비를 본선에 설치하고 캘리브레이션을 수행해야하며, 그 이상 유무를 반드시 확인하도록 권고하고 있다. 본 운항선 속력 시운전의 경우, 기존에 설치 되어있는 각종 계측기기 및 신규 설치 장비에 대한 이상 유무는 운항선 속력시운전 수행 전 정상 항해를 통해 점검하였으며, 신규 설치 장비에 대해서는 설치 시 해당 장비에 대한 캘리브레이션을 수행하였다. Table 1에 운항선 속력

Table 1 Measurement items of speed trial during voyage

Measurement item	Measurement device
Speed over ground	GPS, Speed log
Speed through the water	
Shaft rpm	Shaft torque power meter / Thrust meter
Shaft torque	
Thrust	
Ship heading	Gyro compass
Course of ground	GPS
Latitude position	
Longitude position	
Trim	Draft gauge
Wind speed, direction	Ultrasonic anemometer
Sea water temperature	Sea water thermometer
Wave height, direction, period	Voyage radar / Forecast weather data

시운전 수행 계측 항목과 계측 장비를 나타내었으며, Fig. 1에 계측 장비와 데이터 취득 시스템의 전체적인 구성도를 개념적으로 나타내었다. 속력 시운전을 수행함에 있어서 선박에 작용하는 외부교란의 종류로 바람과 파도 성분이 주요하며, 파도 계측의 경우 선박에 탑재 되어있는 항해용 레이더의 송출 주파수를 변경하여 계측을 수행하였으나, 그 정확도가 불분명하여 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 해양기후 정보 예측 데이터를 이용하여 파도로 인한 외부교란 영향을 보정하였다.

3.1.2 선체 외판 및 추진기의 표면 오손

운항선 속력 시운전의 경우에도 신조 속력 시운전과 동일하게 시운전 수행에 앞서 선체와 프로펠러의 표면 거칠기 상태는 신조 선박의 선체 표면 거칠기와 유사한 조건을 유지해야한다. 본 선박의 경우, 인도 이후 약 4년간 지속적인 운항 조건에 선체가 노출되어있었기 때문에, Fig. 2와 같이 선체 외판 및 프로펠러 표면 전반에 걸쳐 슬라임(slime)과 조류(algae), 따개비(barnacle)에 의한 오손(fouling)이 발생된 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 선체와 프로펠러 표면에 오손이 발생하면 표면 거칠기가 증가하여 선박의 마찰저항 증가 및 추진효를 저하 요인으

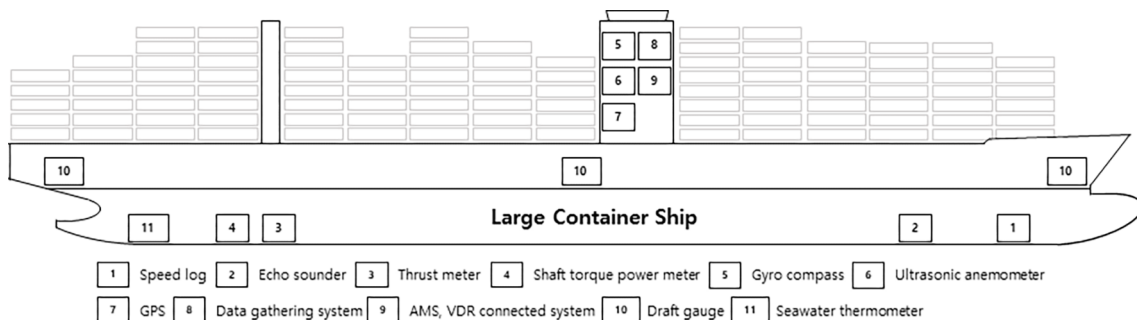


Fig. 1 Ship data logging system and devices

로 작용하게 된다. 따라서 설계흘수(14 m) 이하에서 신조 선박의 선체 표면 거칠기 상태와 가급적 차이를 줄이기 위하여 대상 선박의 선체 외판 및 프로펠러에 대해 수중 선체 세척 (underwater hull cleaning) 작업을 수행하였다.

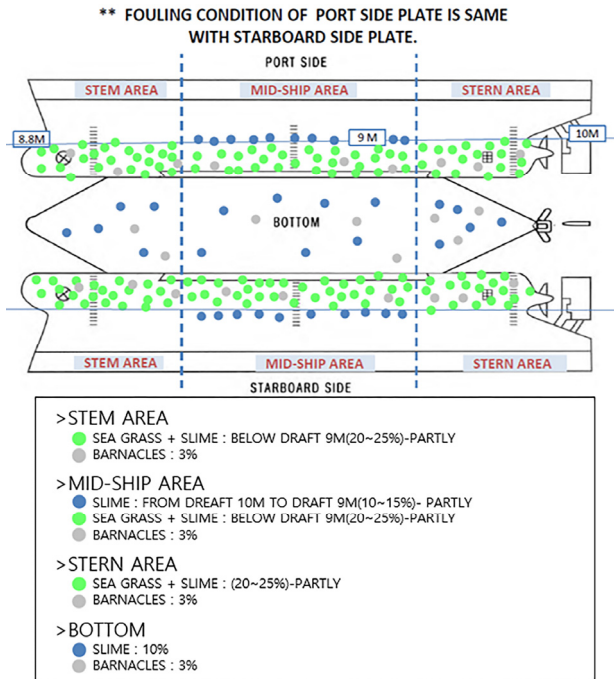


Fig. 2 Hull fouling condition of the large container vessel



(a) Before (b) After

Fig. 3 Propeller condition before and after propeller cleaning and polishing



(a) Before



(b) After

Fig. 4 Hull condition before and after underwater hull cleaning

Fig. 3은 대상 선박의 프로펠러에 대하여, Fig. 4는 대상 선박의 선체 외판에 대하여 세척 작업 수행 전후의 상태를 보여주는 일례이다. 하지만 선체 세척 작업 시 대상 선박의 컨테이너 하역 작업으로 인한 흘수 상승으로 11 m 흘수 이하에서만 선체 세척 작업을 수행할 수 있었다. 선체 세척 작업을 수행하지 못한 수면 상부 설계흘수 이하 선체 외판의 면적은 선체 침수표면적의 약 10%정도이다.

3.1.3 흘수와 트림 및 배수량 확인

운항선 속력 시운전 수행 시 필수로 확인해야 하는 여러 항목 중에 가장 중요한 것은 출항 전 선박의 흘수이다. 흘수의 확인은 대상 선박의 배수량 및 트림이 모형시험 수행 조건과 일치하는지를 판단하기 위해 필요하며, 선수, 선미, 선체 중앙부의 좌현, 우현에 설치된 흘수표(draft mark)를 이용하여 그 값을 기록하고 로드 컴퓨터(load computer)의 보정치 값을 사용하였다. 출항 전 흘수는 Fig. 5에 보인 바와 같이 선수 13.65 m, 선체 중앙부 13.2 m, 선미 13.65 m이며, 설계흘수 조건에서 시운전을 수행하기 위하여, 운항선 속력 시운전 직전에 Ballast수를 추가로 주수하여 설계흘수 조건(14 m)을 확보하였다.

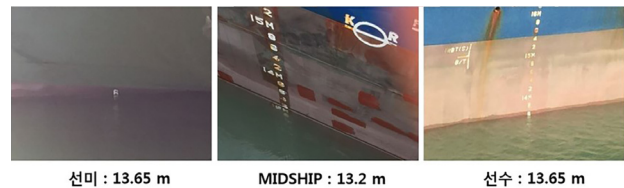


Fig. 5 Draft condition check before speed trial test

3.2 운항선 속력 시운전 수행

3.2.1 운항선 속력 시운전 해역 및 코스

일반적으로 시운전 해역 선정은 수심, 조류, 기온, 풍속, 파도 및 해상 교통량의 영향을 크게 받기 때문에, 속력 시운전 해역은 신중하게 선정되어야 한다. 특히 운항선 속력 시운전의 경우, 실제 화물을 선적하여 정해진 항로와 시간에 맞게 운송을 완료해야 하기 때문에 운항선 속력 시운전을 수행할 수 있는 시간은 매우 제한되어 있으며, 지연 발생 시 선사로부터 시운전 수행에 관한 양해를 얻기 어려워진다. 만약 시운전 해역에서 기상상태가 갑자기 악화되어 안전상 시운전을 수행할 수 없게 되면, 다른 시운전 후보 해역으로 이동 후 시운전을 수행해야 한다. 하지만, 선사 입장에서는 시운전 수행 지연으로 지체된 시간을 회복하기 위해서는 고속으로 운항해야 하는데, 이는 유류비 추가 발생 및 주로 저속 운항을 해 온 기관부에 손상을 줄 수 있기 때문에 부담을 가지고 있다.

그러므로 파도, 바람 등의 영향을 가급적 최소화한 상태로 운항선 속력 시운전을 선정된 해역에서 계획된 시점에 지연 없이 수행하기 위하여 시운전 해역 선정에 앞서 대상 해역의 기상

상태를 장기간 모니터링 할 필요가 있다. Fig. 6은 운항선 속력 시운전 수행 전, 후 기간에 해당하는 파도와 바람에 대한 기상 데이터를 NOAA에서 제공받아 모니터링 한 결과이다. 붉은색 점선의 사각 박스 구간에 해당하는 시기에 운항선 속력 시운전이 수행되었으며, ISO15016에서 권고하는 Beaufort 풍력 계급 (Beaufort scale) 6 이하의 기준에 매우 적합한 기상환경 조건에서 시운전이 수행된 것을 알 수 있다.

운항선 속력 시운전 수행 해역은 Fig. 7과 Fig. 8에 보인 바와 같이 설계흘수에 근접한 흘수 조건으로 운항하는 항차 (Malaysia 출항, United Arab Emirates 입항)의 운항 항로 중 Fig. 9의 노란색 사각형 점선으로 표시한 해역으로, 운항선 속력 시운전은 기존 운항 항로에서 3시간 정도 벗어나, 인도양 스리랑카 동부 약 300NM 지점(위도 $5^{\circ}00.6' N$, 경도 $87^{\circ}11.8' N$)에서 수행하였다.

24차 ITTC에 따르면, 속력 시운전 시 계측 구간에서 배가 정상상태(steady state)에 도달할 수 있도록 접근 구간을 충분히 확보해야하며, 시운전 해역에서 시운전 코스 진입 후, 선속과 동력이 일정하게 유지될 수 있도록 정상접근(steady approach) 조건을 유지해야한다. Fig. 10에 보인 바와 같이 시간을 단축시키기 위하여 Double run 수행을 위한 선회 횟수를 줄일 수 있도록 본 운항선의 속력 시운전 코스를 구성하였다. 통상적으로 타 선박에 비해 상대적으로 선속이 빠른 컨테이너선의 경우,



Fig. 8 Voyage route from Malaysia to Dubai

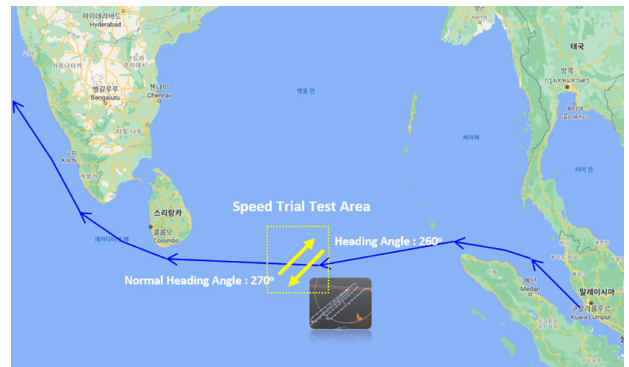


Fig. 9 Area for the speed trial test during voyage

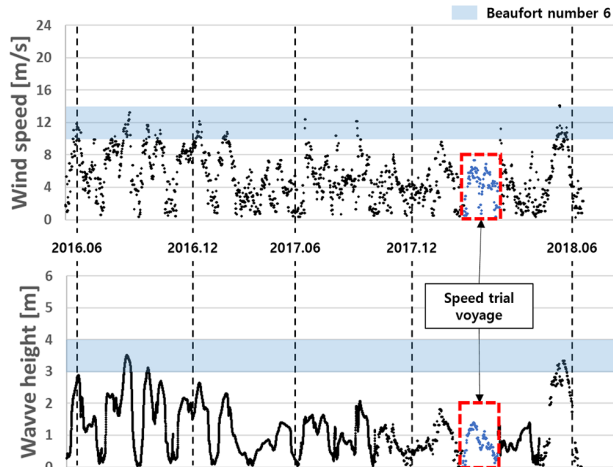


Fig. 6 Weather data for the selected sea area

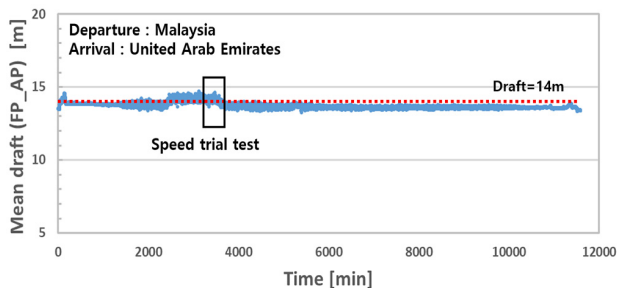


Fig. 7 Selection of a voyage route operating at similar draft conditions to the design draft

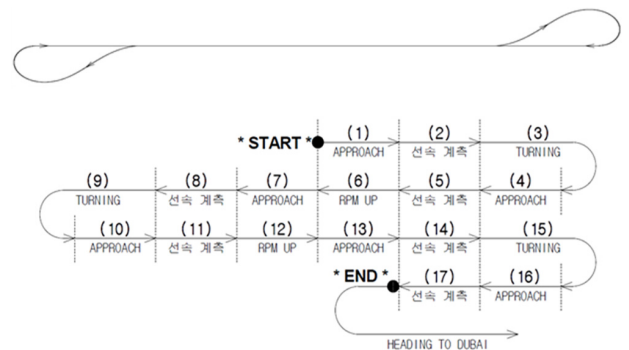


Fig. 10 Course configuration for the speed trial test

약 5해리 내외의 시운전 구간을 확보할 것을 권장하지만, 본 운항선 속력 시운전에서는 Fig. 10의 시운전 코스 구성을 고려하여 약 20해리 정도의 안정적인 시운전 구간을 확보할 필요가 있었다.

3.2.2 운항선 속력 시운전 수행 조건

속력 시운전에서 선박의 속도 계측은 선박 계약 시 명시된 기관 출력에서 실시하고 있으며, 고속선이나 군함의 경우는 6개의 기관 출력 조건에서 시운전을 수행할 것을 권장하고 있다.

본 운항선 속력 시운전의 경우 Table 2에 나타낸 바와 같이 DMCR의 50 %, 70 %, 80%에 해당하는 세 가지 주 기관 부하 조건에서 각각 Double run을 수행하였으며, 총 8시간 정도가 소요되었다. ISO15016에서는 Beaufort 풍력 계급 6 이하에서 시운전을 수행

하도록 권고하고 있으며, 가능하면 해상 조건이 좋은 상태에서 시운전을 수행하는 것이 바람직하다. 본 운항선 속력 시운전 수행 당시 선교에서 촬영한 해상 상태를 Fig. 11에 나타내었으며, 그림에서 확인할 수 있듯이 시운전 수행 시 해상 상태는 파도가 거의 없는 Beaufort 풍력 계급 3에 해당하는 것으로서 운항선 속력 시운전

Table 2 Main engine load conditions for the speed trial test

No	상세항목	소요시간	비고
(1)	Approach for 50% 1st Run	20 min	5~7 mile
(2)	50% 1st Run	10 min	3~4 mile
(3)	Turning for 50% 2nd Run	60 min	속도 조절 시간 포함
(4)	Approach for 50% 2st Run	20 min	5~7 mile
(5)	50% 2st Run	10 min	3~4 mile
(6)	RPM Up for 70% Double Run	30 min	66.7 → 74.6 RPM
(7)	Approach for 70% 1st Run	20 min	5~7 mile
(8)	70% 1st Run	10 min	3~4 mile
(9)	Turning for 70% 2nd Run	60 min	속도 조절 시간 포함
(10)	Approach for 70% 2st Run	20 min	5~7 mile
(11)	70% 2st Run	10 min	3~4 mile
(12)	RPM Up for 80% Double Run	30 min	74.6 → 78.0 RPM
(13)	Approach for 80% 1st Run	20 min	5~7 mile
(14)	80% 1st Run	10 min	3~4 mile
(15)	Turning for 80% 2nd Run	60 min	속도 조절 시간 포함
(16)	Approach for 80% 2st Run	20 min	5~7 mile
(17)	80% 2st Run	10 min	3~4 mile
(18)	Turning for Voyage	60 min	RPM down 시간 포함
	총	8시간	



Fig. 11 Photographs of the sea state during the speed trial test

수행에 적합하였다. ITTC 및 ISO에서는 시운전 수행 표준법의 개정이 지속적으로 이루어지고 있으며, 선회 시 타각을 10° 이내로 사용할 것을 권고하고 있다.

본 운항선 속력 시운전의 경우, 대상 선박에 컨테이너가 만재 적하 상태와 유사하게 적재되어 있기 때문에, 선회 시 타각을 과도하게 사용하면 축 토크의 증가 및 선속 저하에 큰 영향을 미치게 되며, 선박 복원성과 관련된 많은 위험 요소가 증대될 수 있다. 반면에 너무 작은 타각을 사용하게 되면, 선회 반경이 커짐에 따라 시운전 소요시간이 증가하게 된다. 따라서 선회 시 선장과 기관장의 권고에 따라 타각을 알맞게 조절하여 시운전을 수행하였다. 대상 선박의 운항 특성을 가장 잘 파악하고 있는 선장과 기관장의 노하우와 판단은 효율적이고 안전한 운항선 속력 시운전 수행 조건에 매우 중요한 요소로 작용하게 된다.

4. 운항선 속력 시운전 해석

4.1 운항선 속력 시운전 해석법

통상 선박을 설계할 때는 바람과 파도가 없는 잔잔한 조건에서 선박이 운항한다고 가정하며, 모형시험 역시 동일한 조건에서 이루어진다. 하지만, 속력 시운전은 실제 해상에서 수행하기 때문에, 외란에 대한 영향을 보정해 줄 필요가 있다. 바람, 파도, 조류 등으로 인한 외란의 영향을 보정해주는 방법은 크게 ISO15016과 ITTC 지침에 의한 방법이 있는데, 2015년 9월 1일 이후 수행되는 시운전의 수행 및 해석은 ISO15016:2015를 따르도록 규정되어 있다.

현재 ISO15016:2015에 따라 속력 시운전 결과를 해석하는 프로그램은 선박해양플랜트연구소에서 개발한 i-STAP 및 네덜란드의 MARIN에서 제공하는 STA-IMO와 일본 선급(Class NK)에서 개발한 PrimeShip-GREEN/ProSTA 등이 있다.

본 연구에서는 Shin et al. (2016)이 개발한 i-STAP을 사용하여 운항선 속력 시운전 결과를 해석하였다. Table 3에 운항선 속력 시운전 해석 조건을 나타내었다. 모형시험의 추진효율계수를

Table 3 The analysis condition of the speed trial test

Ship type	Container carrier
Superstructure	With container
Loading condition	14.0 m(even)
Power correction	Direct power method
Current correction	Iterative
Temperature method	ITTC conventions
Displacement method	None
Wind method	ITTC Chart(Container carrier, Laden with container)
Wave method	STAWAVE II

사용하여 직접 동력을 보정하는 DPM(Direct Power Method)법을 기반으로 바람, 파도, 조류, 수온 등 외부교란 인자에 대해 보정을 수행하였다.

4.2 운항선 속력 시운전의 불확실성 해석

운항선 속력 시운전의 계측 항목은 Table 1에 나타난 바와 같이 다양하며, 계측된 데이터의 물리량 또한 방대하다. 계측된 데이터의 신뢰도는 선속-동력 성능 해석 결과에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 시운전 계측 장비에 대한 계측 정밀도를 높이고, 정수 중 상태와 유사한 해상 조건에서의 시운전 수행이 요구된다. 하지만 실제 해상에서 수행되는 운항선 속력 시운전의 경우, 이상적인 해상 조건에서의 시운전 수행이 쉽지 않기 때문에, 모든 시운전 계측 결과에는 계측 장비와 시운전을 수행하는 해상 조건에 기인하는 불확실성이 포함되어 있다고 할 수 있다.

Seo et al. (2019)은 ISO15016:2015에 제시된 방법을 바탕으로 시운전 계측에 사용된 축 동력 계측시스템에 대한 불확실성 요소를 조사하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 전달동력에 대한 불확실성 해석을 수행하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 모델식에 대한 제한이 없으며, 중심극한정리에 따라 입력변수들이 가우시안 분포를 따르지 않더라도 반복횟수를 증가시켜 그 평균값을 정규분포로 수렴시킬 수 있는 장점을 가진다. 이 방법의 가장 큰 핵심은 표본의 개수를 증가시킴에 따라 보다 정확한 추정결과를 얻을 수 있다는 개념을 바탕으로 가상의 반복적 시행을 통해 결과를 예측하는 것이다. 불확실성 해석을 수행한 결과 전달동력에 대한 불확실성 요소 중 가장 큰 비율을 차지하는 요소는 축 동력 계측 시스템으로 전체 불확도 중 약 60%의 비중을 차지하는 것으로 밝힌 바 있다.

본 운항선 속력 시운전의 경우에도 Seo et al. (2019)이 제시한 불확실성 해석 방법을 동일하게 적용하여 DMCR 50 %, 70 %, 80 %의 주기관 부하 조건에서 불확실성 요소 중 가장 큰 비율을 차지하는 축 동력 계측 시스템의 불확도와 이상적인 해상 조건에서의 전달마력(PD_{id}) 추정에 대한 불확도를 계산하였다.

또한, 이상적인 조건에서의 전달동력과 확장 불확도를 산정하기 위해서는 계측된 축 동력 값과 외란에 의한 부가저항의 총합 그리고 각각의 확률분포 자료가 필요하지만, 본 운항선 속력 시운전은 상당히 온화한 해상 조건 및 기상상태에서 이루어짐에 따라 외란에 의한 보정량이 매우 작기 때문에 파도, 바람에 의한 부가저항의 불확도 해석 결과는 본 논문에서 별도로 다루지 않았다.

먼저 축 동력 계측 시스템의 불확도를 산정하기 위해서, 계측된 토크와 축 회전수의 확률 분포를 입력 자료로 하고 몬테카를로 시뮬레이션을 10,000여회 수행한 결과를 Table 4에 나타내었다. DMCR 50 % 조건의 경우, 95 % 신뢰구간에서 축 동력 계측 시스템의 불확도는 약 ± 1.6 %로 나타났으며, DMCR 70 %, 80 %에서도 유사한 불확도를 갖는 것으로 나타났다.

Table 4 Uncertainty of shaft power measurement system

DMCR	U(95 %, K=2) (%)
50 % 1 st	± 1.6
50 % 2 nd	± 1.6
70 % 1 st	± 1.6
70 % 2 nd	± 1.3
80 % 1 st	± 1.7
80 % 2 nd	± 1.7

Table 5 Uncertainty for corrected ideal power

DMCR	U(95%, K=2) (%)
50 %	± 1.3
70 %	± 1.1
80 %	± 1.4

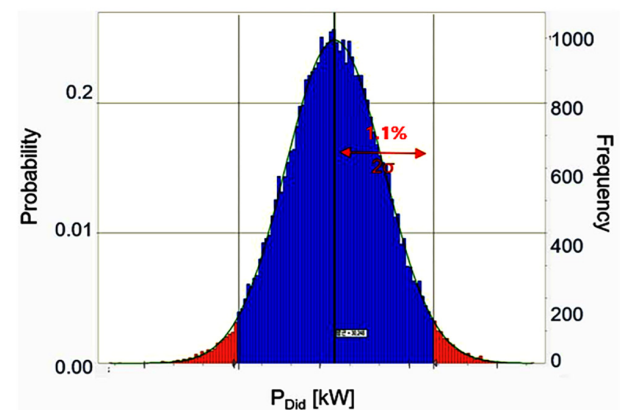


Fig. 12 Probability distribution of corrected ideal power at a main engine load, 70% of DMCR

Table 5는 DMCR 50 %, 70 %, 80 %의 주기관 부하 조건에서 산정한 이상적인 해상 조건에서의 전달마력의 불확도 해석 결과를 나타내며, Fig. 12는 DMCR 70 %의 주기관 부하 조건에서 이상적인 해상 조건에서의 전달마력의 확률분포를 보여주고 있다.

각 주기관의 부하 조건에 대하여 95 % 신뢰구간에서 최대 약 ± 1.4 %의 불확도가 포함되어 있는 것으로 나타났으며, 특히 DMCR 70%의 주기관 부하 조건에서는 ± 1.1 %의 불확도가 포함된 것으로 나타나서 상당히 신뢰할 만한 운항선 속력 시운전 시험이 수행된 것을 확인할 수 있다.

5. 운항선 속력 시운전 결과

운항선 선속 시운전을 통하여 획득한 외란 보정 전 결과와 시운전 해석을 통해 얻어진 결과를 모형시험 결과와 중첩하여 나타낸 대상 선박의 선속-동력 성능을 Fig. 13에 도시하였다. 각 그림에 있어 선속은 Froude number로, 동력은 DMCR 80 % 동력을 기준으로 무차원화 하였다. DMCR 80 % 동력에서의 운항선 속력 시운전의 선속 변화율은 약 4 % 정도 발생하여, 모형시험 결과 대비 약 0.9 knots 정도의 선속 감소가 나타났다.

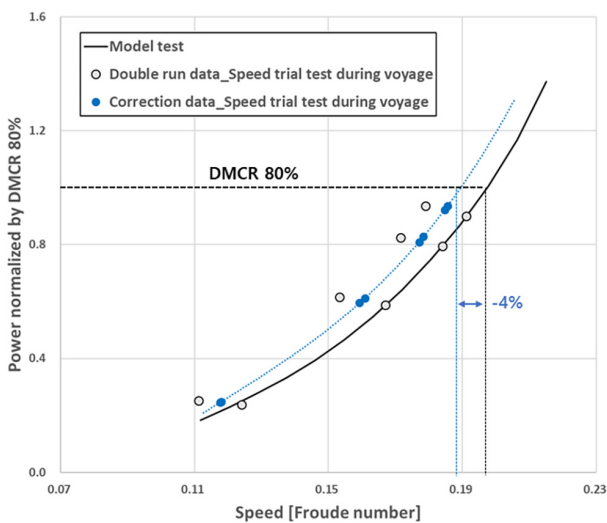


Fig. 13 Speed-power performance obtained from the speed trial test during voyage and the model test

이와 같은 선속 감소의 주원인은 속력 시운전 시점까지 대상 선박이 인도된 지 약 4년이 경과 되었으며, 2.1.2절에서 언급한 바와 같이 수중 선체 세척(underwater hull cleaning) 작업을 설계 흘수(14 m)까지 완벽하게 수행하지 못하여 선체 표면에 남아있는 오손(fouling)으로 인한 마찰저항의 증가로 추정된다. 선체 표면 오손이 선속과 엔진 성능에 미치는 영향에 대해서는 Townsin et al. (1980), Kwon & Choo (1996), Kwon & Kim (2005) 등에 의하여 연구가 수행된 바 있다. 또한, 선체 외판의 슬라임(slime) 만으로도 선체저항이 10 % 이상 증가 할 수 있다는 연구 결과들도 다수 보고된 바 있다 (Townsin, 2003).

후속 논문(Part II)에서는 운항선 속력 시운전 결과에서 나타난 선속 감소현상의 원인을 조사하기 위해 운항 데이터를 활용하여 ISO19030 및 ISO15016 방법에 따른 기준 선속에서 수중 선체 세척 작업 전후의 속도 손실률과 동력 상승률을 산정한 후, 운항선 속력 시운전 결과와 모형시험 결과의 상호 비교를 통한 정량적인 분석 내용을 다룰 예정이다.

6. 결 론

2014년에 인도되어 운항 중인 대형 컨테이너선에 대한 설계 흘수에서의 속력 시운전을 수행하였다. 대상 선박은 인도된 지 약 4년의 시간이 경과되어 수중 선체 세척 작업이 수행되었다.

본 논문에서는 상업 운항 중인 선박의 속력 시운전을 수행하기 위한 준비, 점검 사항과 수행 방법에 대하여 소개하였다. 또한, 운항선 속력 시운전 결과를 모형시험 결과와 함께 비교함으로써, 설계흘수에서 대상 선박의 선속-동력 특성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 상업 운항 중인 선박으로 속력 시운전을 수행함에 있어 수행 시간을 단축시키고, 연료비 증가를 최소화하고자 대상 선의 운항 루트에서 테스트가 적절한 구간을 정의하고 속력 시운전을 수행하였다.

둘째, 불확도가 가장 크다고 알려진 전달동력에 대하여 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 불확실성 해석을 수행한 결과, 시운전이 수행된 주기관 부하 조건에 대하여 95 % 신뢰구간(K=2)에서 약 ± 1.4 %의 불확도가 포함되어 있는 것으로 나타났다. 특히 DMCR 70 %의 주기관 부하 조건에서는 불확도가 ± 1.1 %로 신뢰할 만한 운항선 속력 시운전이 수행되었다.

셋째, 모형시험 결과를 기준으로 DMCR 80 % 동력에서 약 0.9 knots의 선속 감소가 나타났다. 이는 수중 선체 세척 작업을 수행했음에도 불구하고 선체 표면에 남아있는 오손으로 인한 마찰저항의 증가가 주원인인 것으로 추정된다. 향후 운항 데이터를 활용한 분석 내용을 후속 논문으로 발표할 계획이다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 조선해양핵심기술개발사업(10063575)의 지원을 받아 수행한 연구결과 중 일부이며, 운항선 속력 시운전 결과에 대한 불확실성 해석을 수행해 주신, 군산대학교 서대원 교수, 한국선급 김준규 수석에게 감사의 말씀을 드립니다. 또한 시운전 수행을 위해 테스트 베드를 제공해 주신 HMM Ocean Service 관계자 분들과 대상 선박의 선장, 기관장 및 모든 승조원 분들의 노고에도 감사의 말씀을 전합니다.

Reference

- IMO, 2020. *Report of the marine environment protection committee on its seventy-fifth session*, MEPC 75/18.
- Jung, C.H., Lee, H.K. & Lee, Y.S., 2007. A study on the ship's performance of T.S. Hanbada(I), the evaluation of seakeeping performance by HMS measuring data. *Journal of Navigation and Port Research*, 31(10), pp.905-910.
- Jung, C.H. & Lee, Y.S., 2008. A study on the ship's performance of T.S. Hanbada(II), The evaluation of boarding comfort with vertical acceleration. *Journal of Navigation and Port Research*, 32(5), pp.333-339.
- Jung, C.H., Lee, H.K. & Kong, G.Y., 2008. A study on the ship's performance of T.S. Hanbada(III), The evaluation of maneuvering performance with actual ship trials. *Journal of Navigation and Port Research*, 32(6), pp.439-445.
- Kim, D.H., Jung, B.K. & Han, S.J. 2020. A study on the monitoring of ship hull and propeller performance by operation ship. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 26(1), pp.15-21.
- Kim, J.G. & Kim, D.U. 2016. Analysis and verification of speed trial test in accordance with ISO15016:2015(tanker, bulk carrier). *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(1), pp.35-38.
- Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

- (KRISO), 2019. *Development of advanced speed-power analysis technology to attain high energy efficiency and GHG reduction of operating ships under real sea condition*, Korea: KRISO.
- Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), 2020. *Accuracy enhancement of model-ship correlation based on the ship performance measurement*, Korea: KRISO.
- Kuroda, M., Tsujimoto, M. & Sogihara, N., 2012. Onboard measurement for a container ship in view of container load condition. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 15, pp.29–35.
- Kwon, Y.J. & Choo, D.K. 1996. A research on ship hull roughness: estimation method and effect on ship performance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(2), pp.30–35.
- Kwon, Y.J. & Kim, D.Y., 2005. A research on approximate formula for the speed loss at sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(2), pp.90–93.
- Lee, G.J., Shin, M.S., Park, B.J. & Ki, M.S., 2019. Validity analysis of speed, wave height, and wind speed for the operational performance of a bulk carrier. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 43(3), pp.183–196.
- Lee, T.I., Ahn, G.S., Ok, Y.B., & Kim, M.W. 2016. Analysis and verification of speed trial test in accordance with ISO15016:2015(Container). *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(1), pp.22–27.
- National Maritime Research Institute (NMRI), 2009, *Development of ship performance index(10 mode at Sea)*, Japan: NMRI.
- Park, B.J., Shin, M.S., Lee, G.J. & Ki, M.S., 2019. A new method to analyse the speed power performance of operating ships and its implementation. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 43(10), pp.822–829.
- Seo, D.W., Kim, M.S. & Kim, S.Y., 2019. Uncertainty analysis for speed and power performance in sea trial using Monte Carlo simulation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.242–250.
- Shin, M.S., Park, B.J., Lee, G.J. & Ki, M.S., 2016. ISO15016 revision and analysis program(i-STAP) for EEDI baseline speed analysis. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(1), pp.17–21.
- Townsin, R.L., 2003. The ship hull fouling penalty. *Biofouling*, 19(S1), pp.9–15.
- Townsin, R.L., Byrne, D., Melne, A. & Svensen, T.E. 1980. Speed, power and roughness: the economics of outer bottom maintenance. *Trans. RINA*, 122.
- Yoo, B.H. & Kim, J.H., 2019. Probabilistic modeling of ship powering performance using full-scale operational data. *Applied Ocean Research*, 82, pp.1–9.
- Yu, K.B., Han, Y.S. & Kang, D.Y. 2016. Analysis and verification of speed trial test in accordance with ISO15016:2015COT, LNGC). *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(1), pp.28–34.



김 호



이 준 형



장 진 호



안 해 성



강 대 열



변 상 수