

선체 해양생물의 선저오염이 엔진성능과 출력에 미치는 영향

정균식[†]

(Received October 10, 2014 ; Revised March 24, 2015 ; Accepted April 19, 2015)

Influences of the Surface Pollution Cause by the Marine Growth on Ship Hulls on Engine Performance and Output

Kyun-Sik Jung[†]

요약: 최근 국제 원유가의 폭등으로 선박의 연료비 부담이 상대적으로 가중되고 있으며, 또한 연료의 연소과정에서 발생하는 온실가스에 대한 국제적 규제 움직임도 가속되고 있다. 이에 따라 에너지 효율 개선을 위해서 선체의 설계변경, 마찰저항을 줄이기 위한 도료개발, 엔진의 열효율을 개선하기 위한 첨가제 개발, 연료를 절감하기 위하여 저속운전 등 다양한 방법들이 적용되고 있다. 따라서 최근 고유가 시대에 선박의 고속화와 대형화 및 에너지 절감형 선형의 개발이 필수요건이 되고 있다. 또한 선체 표면의 국부 영역에서 저항 값들의 정성 및 정량적인 변화와 보다 세밀한 분석은 불가피하다고 판단되어진다. 따라서 본 연구는 에너지 효율 개선을 위한 기초연구로서 현재 운항중인 선박의 선체에서 자생하는 해양생물로 인한 마찰저항을 확인하기 위하여 도크 전·후의 엔진성능을 분석하고 그 결과를 도크와 도크사이 2.5년의 데이터와 비교함으로써 주기판의 성능, 마찰저항과 부하변화 및 연료소비량과 선속에 미치는 연구 결과 등을 보고한다.

주제어: 해양생물, 마찰저항, 저속운전, 선형, 연료소비량

Abstract: The cost of fuel in ships has recently increased due to a rapid increase in international oil prices and international restrictions regarding the greenhouse effect generated from the burning of fuel. Therefore, different methods for changing the hull designs for improving energy efficiency, developing coating for reducing friction resistances, developing additives for improving engine thermal efficiency, and low-speed operation for reducing fuel consumption have been considered. The developments of high-speed, large-scale, and energy-saving vessels are deemed essential to adapt to the recent high oil price era. Therefore, it is important to analyze Precisely the qualitative and quantitative changes in the resistance value of the local areas of the hull surface. In this study, the engine performance before and after docking was analyzed to examine friction resistance caused by marine growth on the hull as a basic study for improving the energy efficiency. The result was then presented by comparing it with the previous data for 2.5 years between docks to investigate the performance of the main engine, the change in friction resistances and loads, the fuel consumption and ship speed.

Keywords: Marine growth, Friction resistance, Low-speed operation, Hull design, Fuel consumption

1. 서 론

최근 국제해사기구 해양환경보호위원회에서 그린하우스 가스(GHG)의 주범인 CO₂ 배출량 감축을 위해 선박에서 대기로 방출하는 CO₂의 양을 지수화 하고자 활발한 논의가 진행되고 있다. 대표적인 지수로서 에너지효율 지수(EEDI: Energy Efficiency Design Index for new ships), 에너지효율 운전자표(EEOI: Ship Energy Efficiency Operational Indicator), 에너지 효율관리 계획(SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan) 등이다. 특히 에너지 효율관리

계획은 2013년 1월부터 시행되고 있다. 이에 따라 에너지 효율 개선을 위해서 선체의 설계변경, 마찰저항을 줄이기 위한 도료개발, 엔진의 열효율을 개선하기 위한 첨가제 개발, 연료를 절감하기 위하여 저속운전 등 다양한 방법들이 연구 적용되고 있다[1]. 선박의 고속화와 대형화 및 고유가 시대에 필수요건인 에너지 절감형 선형의 개발뿐만 아니라 선체 표면의 국부 영역에서 저항 값들의 정성 및 정량적인 변화와 보다 세밀한 분석은 불가피하다고 판단되어진다. 선박은 5년을 주기로 정기검사와 그 중간에 중간검사를

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0025-2772>): Training Ship HANNARA, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-080, Korea, vikings99@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4477

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.

위하여 입거(dry docking)를 하게 된다. 즉 2.5년에 한번 씩 입거하게 되는 것이다. 입거 시 가장 중요한 작업 중 하나는 선체의 이물질을 제거하고 새로 도료(painting)를 입히는 작업과 프로펠러(propeller) 연마(grinding)를 하게 된다.

그래서 선체에 자생하는 해양생물의 마찰저항은 입거를 기점으로 전후가 가장 큰 차이가 나는 것으로 생각된다. 따라서 이러한 특징을 잘 활용하면 연료절감 뿐만 아니라 도료개발의 기초자료로 활용하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 해상에서는 고려해야할 변수가 상당히 존재하고 있기 때문에 비교대상의 상태와 변수에 대하여 최대한 정확한 분석과 데이터 비교가 필요하다.

본 연구는 에너지 효율 개선을 위한 기초연구로서 현재 운항중인 선박에서 선체에 자생하는 해양생물로 인한 마찰저항이 주기관의 성능, 부하변화 및 연료소비량과 선속에 미치는 영향을 연구하기 위하여 입거 전·후의 연소분석을 수행하였으며, 그 결과를 출거(dock out)에서 다음 입거까지 2.5년의 데이터와 비교 분석하고, 그 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험 장치와 방법

Figure 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있으며, 실험대상 선박의 엔진은 Table 1에 주요 사양을 나타낸다. 엔진의 실린더 번호는 선수 측을 기점으로 1번 실린더로 정하였으며, 윤활유 주유기(lubricator) 끝단에 각도센서를 장착하고, 1번 실린더의 동적 TDC 위치에 1회전에 1회 펄스를 발생하는 각도센서의 Z 펄스를 일치시켰다.

또한 윤활유 주유기와 크랭크 샤프트의 회전수는 1:2 이므로 회전 당 3600펄스를 발생하는 엔코더의 트리거 신호는 0.2°CA의 데이터 수집 간극(sampling interval)을 가지게 된다. 따라서 엔코더의 A펄스(3600 PPR sampling interval: 0.2°CA)를 트리거로 압력 데이터를 수집하는 ‘각도기준 계측방법’을 이용하였다[2].

연료의 소비량을 측정하기 위해서는 무엇보다 출력측정이 중요하다. 기관의 출력을 얻는 방법으로는 실린더 내 압력을 직접 측정하여 얻는 방법과 추진축에서 토크를 직접 측정하는 방법이 있다[3]. 본 실험에서는 연소압력 분석 장치를 이용하여 실린더 내 압력을 직접 측정하는 방법을 사용하였으며, 이 연소압력 분석 장치는 엔진의 연소실에서 연소의 과정을 직접 눈으로 확인하기 어렵기 때문에 연소과정의 압력 데이터를 크랭크 각도별로 수집하여 직접정보(평균유효압력, 압력상승률, 체적에 대한 압력변화, 사이클 변화, 녹킹 및 실화 등)와 간접정보(열발생률, 연소가스온도 등)를 해석하는 장치이다[4]. 본 실험에서 출력은 연소압력을 수집하여 지시마력으로 계산하였다.

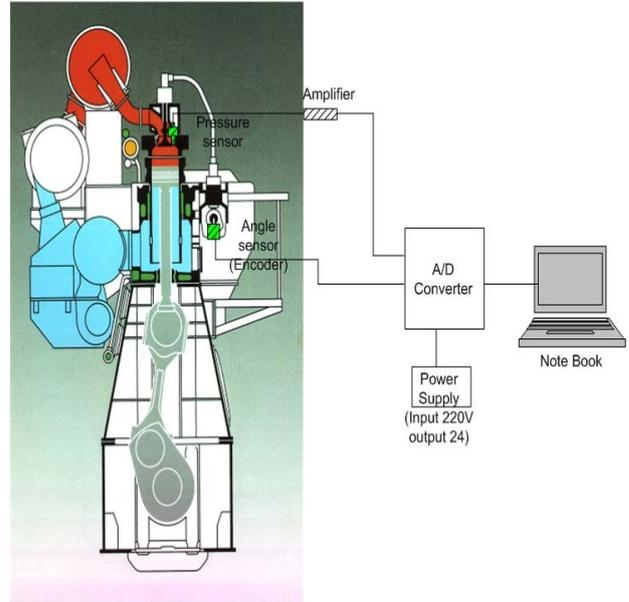


Figure 1: Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1: Specifications of a test engine

Item	Specification
Engine Type	2-Stroke, single acting Diesel Engine with T/C
NO. of Cylinder	6
Bore/Stroke	350/1050 mm
Compression Ratio	12.96
MCR	4000BHP/200rpm
NCR	3400BHP/190rpm

연료소모량은 본 실험 선박에서 사용되는 유량계(flowmeter)를 이용하였으며, 30분 동안에 사용된 연료의 양을 계측하였다. Figure 2는 병커를 사용하는 선박의 연료유 공급 계통도를 보여주고 있다. 선박엔진에 사용되는 연료는 점도를 유지하기 위하여 점도 검출기와 연료유 가열장치(F.O heater)를 가지고 있다. 또 연료유 공급탱크에서도 연료를 가열하게 되며, 엔진에 사용되는 연료와 공급탱크의 온도가 일치하지 않는다. 본선은 연료유 공급탱크의 온도를 약 80℃정도 유지하고 있으며, 엔진에 공급되는 연료는 연료의 점도에 따라 차이가 있으나 점도 11cst ~ 13cst를 유지하기 위해서 연료유 가열장치는 105 ~ 115℃ 정도 유지하게 된다. 따라서 본 실험에서는 유량계 입구의 온도 즉 연료유 공급탱크의 온도를 기준으로 연료소모량을 계산하였다[5]. 또한 연료 소모량 측정과 동시에 연소분석장치로 지시마력과 연소상태를 분석하였다. Table 2에서는 사용된 연료의 사양을 보여주고 있다.

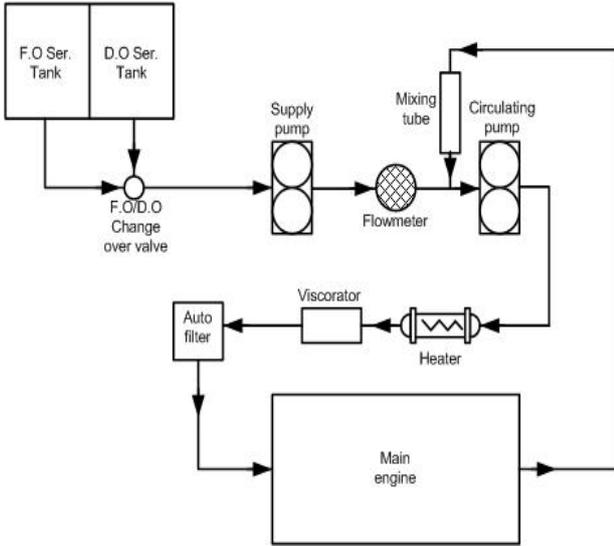


Figure 2: Diagram for the fuel oil flow measurements

Table 2: Specifications of the Bunker

Item		Specification
Products		L.R.F.O
Gravity	API@60°F	19.9
	S.G.@15/4°C	0.9341
Viscosity Kin.cst		@ 50°C 31.7
Flash point		84°C
Sulfur		2.35 %
Water & Sediment		0.03 %

주 추진 기관은 선체의 저항을 이겨 배를 추진하기 위한 목적이기 때문에 출력 측정과 연료소모량의 기준은 선체가 가지는 저항이 기준이 된다.

따라서 기본 선체저항은 다음 식으로 표현된다[6].

$$R_H = 1.25 \times R_{H/\Delta} \times \Delta \quad (1)$$

이 때, $R_{H/\Delta}$ 는 선체저항 계수이고, Δ 은 배수량(Long Ton)을 나타낸다.

여기서, 선체저항 계수는 동일한 선박에서의 비교 이므로 같다. 따라서 기본 선체저항은 배수량에 의해서 결정된다.

또한 해상에서는 저항으로 작용하는 변수들이 상당히 있으며, Table 3에 배수량과 선체의 저항에 영향을 미치는 해상상태에 대한 변수들을 비교하였다.

선체저항에서 가장 중요한 배수량은 입거전의 상태가 약 2ton 많으나 전체 중량에 비하여 0.05% 차이 이므로 오차 범위 내에 있다고 볼 수 있다.

해상상태에서 Force 3은 바람의 세기가 7 ~ 10knots(3.6 ~ 5.1m/s)이며, 파고(Wave)가 1 ~ 1.5m를 나타낸다. 이는 항해사의 시각의 견지에서 바다의 상태를 보고 판단하게 되며, 양호한 해상상태임을 알 수 있다[7].

조류는 없는 상태였으며, 타기의 조종 상태도 자동조타 (Autopilot) 상태에서는 3°범위 내에서 움직이기 때문에 전반적으로 양호한 해상상태임을 알 수 있다. Table 4에서는 실험의 각 엔진 회전속도별 선속을 나타내고 있다. 여기서 선체의 배수량이 동일하고 해상상태가 동일하다면 동일한 엔진회전속도에서는 같은 선속을 가지는 것으로 생각되며, 약간의 선속의 차이는 바람의 방향이 다르기 때문으로 생각된다.

또한, 본 연소분석 실험은 실험대상 선박에서 가장 많이 사용되는 속도인 160rpm (Maneuvering Full)과 175rpm의 두 모드에서 수행하였으며, 입거 전·후 항해 중 연소분석장치를 통하여 연소압력을 수집하였다. 여기서 해양생물로 인한 선저오염의 영향을 비교하기 위하여 최대폭발압력, 출력, 부하변동, 연료소모량과 선속의 변화 등을 분석하였다. 또 입거 전·후의 분석 결과를 출거(Dock out)에서 입거까지 2.5년 동안의 운항시간에 따른 부하변동과 연료소모량 및 선속의 변화와 비교하였다.

Table 3: Comparison of parameters before and after docking

Parameter	Before Docking	After Docking
Displacement (ton)	3,966	3,964
Sea Status	Force 3	Force 3
Wind direction	Rear	Front
Current	Nil	Nil
Staring Status	Autopilot	Autopilot

Table 4: Comparison of ship speed before and after docking

Item	Before docking		After docking	
Engine speed (rpm)	160	175	160	175
Ship speed (knots)	13.2	14.5	13.0	14.4

3. 연소분석과 고찰

Figure 3은 입거 후의 프로펠러와 선체 일부의 사진이다. 여기서 프로펠러와 선체에 많은 해양생물이 붙어 있는 것을 알 수 있다. 또한, Figure 4에서는 선체에 부착된 해양생물의 확대 사진을 보여주고 있다. 선체에 부착된 해양생물에 의해 표면이 상당히 거친 상태이며, 선체의 저항에 많은 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Figure 5 - 8은 동일한 선속을 유지하기 위하여 선체의 마찰저항을 이기고 추진력을 만드는 엔진의 출력과 연소상태에 대하여 연소분석장치를 이용하여 분석된 결과를 보여주고 있다.

Figure 5와 6은 각각 160rpm, 175rpm에서 입거 전후의 $P-\theta$ 선도의 비교를 보여주고 있다. 여기서 동일한 선속을 내기 위한 엔진은 출거 후 입거 전과 비교하여 최고폭발압력(Pmax)이 160rpm에서는 약 2MPa 감소하였으며, 175rpm

에서는 약 1.5MPa로 상당한 감소를 나타내고 있다.



Figure 3: State of the Hull and propeller in dry dock.



Figure 4: Enlargement of the marine growth attached in the hull

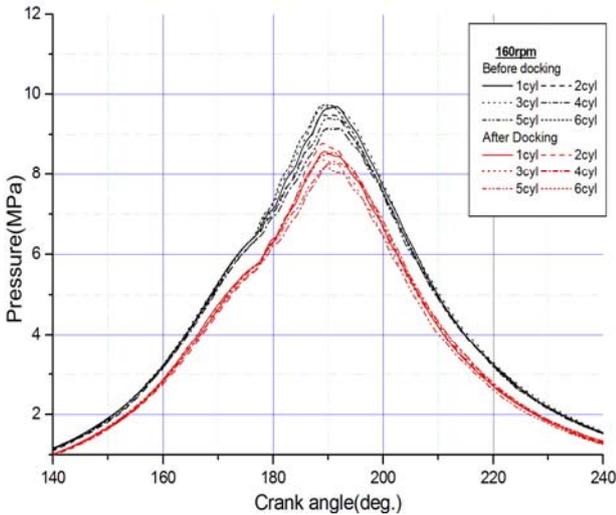


Figure 5: $P-\theta$ diagram of before and after dry docking at 160rpm

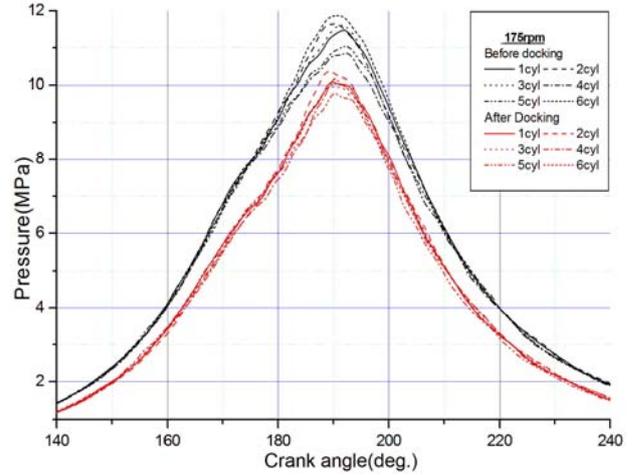


Figure 6: $P-\theta$ diagram of before and after dry docking at 175rpm

Figure 7과 8에서는 입거 전후의 $P-V$ 선도를 보여주고 있다. Figure 7의 160rpm에서의 출력은 출거 후 약 17.4% 감소하였으며, Figure 8에서 175rpm에서는 약 18% 감소하였다.

Figure 9에서는 T/C(Turbocharger)의 회전수와 소기압력의 관계를 보여주고 있다. 여기서는 엔진의 부하상태를 나타내는 변수로 T/C 회전수와 소기압력의 변화가 부하의 증감을 대변할 수 있다고 생각된다. 엔진의 회전속도(부하)가 증가할수록 T/C의 회전속도가 높아지고 소기압력도 증가한다. 또한 입거 전의 상태가 후의 상태보다 부하가 높기 때문에 T/C의 회전속도가 높고 소기압력이 높은 것을 알 수 있다.

Figure 10은 선속과 연료소모량을 입거 전·후 엔진 회전수별로 나타내었다. 같은 속력을 내는 엔진의 연료 소모량을 단위 시간으로 나타내었다. 입거 전의 선체에 해양생물이 많이 붙어 있는 상태와 비교하여 출거 후는 160rpm에서 연료소모량이 시간당 약 16.6% 감소하였으며, 175rpm에서는 약 12.1% 감소하였다. 이 결과로부터 선체에 붙어 있는 해양생물의 마찰저항이 상당함을 확인 하였다. 또한 160rpm보다 175rpm에서 연료소모량의 감소율이 적은 것은 Equation (2)와 같이 선속은 부하의 3승에 비례하기 때문으로 생각된다[8].

$$R = V^2 D^{2/3} \rightarrow RV = V^3 D^{2/3}$$

$IHP = RV$ 이므로 배수량이 일정할 때, 아래의 식과 같다.

$$IHP = V^3 \text{ 또는 } Q = V^3 \quad (2)$$

이때 R 은 선박의 전체 저항, V 는 속력, D 는 배수량, IHP 는 지시마력, Q 는 연료소모량을 나타낸다.

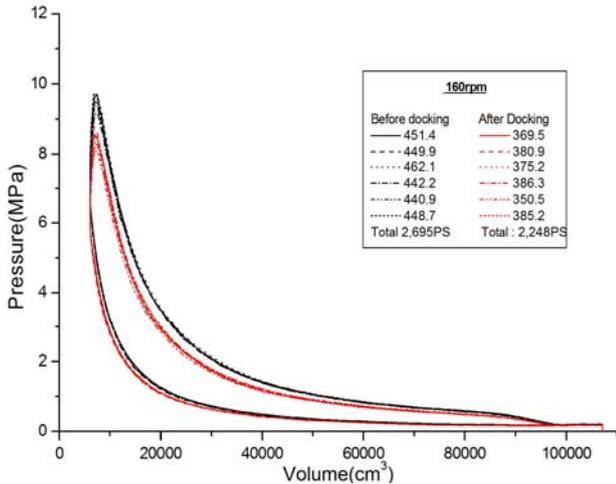


Figure 7: P-V diagram of before and after dry docking at 160rpm

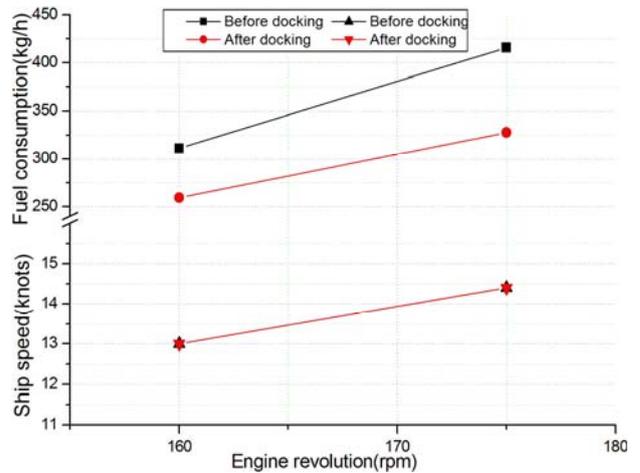


Figure 10: Comparison of the fuel consumption and ship speed according to before and after dry docking

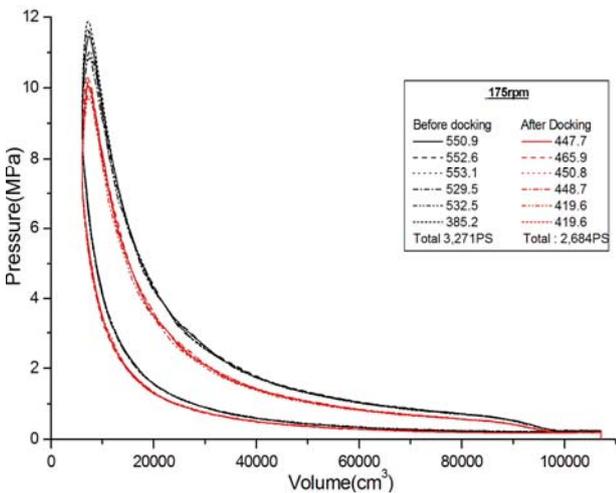


Figure 8: P-V diagram of before and after dry docking at 175rpm

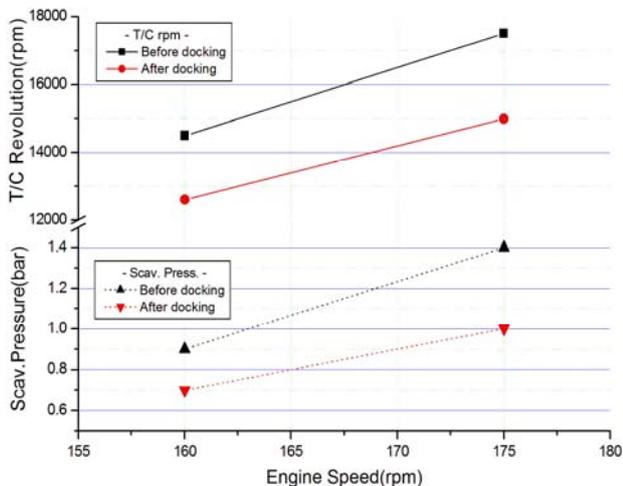


Figure 9: Comparison of the turbocharger revolution and scavenging air pressure according to between before and after dry docking

Figure 11과 12는 출거와 입거 사이 2.5년의 운전시간에 따른 부하의 변화와 연료소모량 및 선속의 변화를 보여주고 있다. 이는 기관 로그북(engine log book)과 항해 로그북(deck log book)을 기준으로 작성되었으며, 로그북 작성자의 작성시간의 기준에 있어서 약간의 오차가 있을 수 있으나 로그북 작성 기준이 24시간으로 그 오차는 크지 않을 것으로 생각한다. 또한 해상상태의 조건은 Force 3 ~ 4, 자동조타 상태이며, 바람의 방향과 조류의 상태는 고려되지 않았다. 또한 Figure 9와 10의 입거 전의 상태는 2.5년의 연장선상에 있으며, 출거 후 측정된 결과를 시작 데이터로 대입하여 분석한 결과이다.

Figure 11에서는 2.5년 동안의 운전시간에서 가장 많이 운전되는 영역인 175rpm에서의 T/C 회전수와 소기압력의 변화를 나타내고 있다. 동일한 엔진회전수에서 운전시간이 증가할수록 T/C 회전수와 소기압력은 비례하여 증가하고 있다. 이는 동일한 엔진 회전수를 내기위해 부하가 증가하였음을 잘 나타내고 있으며, 이 부하 증가는 선체의 마찰저항의 증가로 판단된다.

Figure 12에서는 Figure 11과 동일한 방법으로 시간당 연료소모량과 선속의 변화를 운전시간의 변화에 따른 결과로 보여주고 있다. 또한 Figure 10의 측정 결과를 대입하여 분석하였다. 여기서 동일한 엔진회전수를 기준으로 비교한 결과이며, 시간당 연료소모량은 운전시간의 증가에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 선속은 반대로 감소하고 있음을 알 수 있다. 여기서 입거 전후의 측정결과와 출거에서 입거까지 2.5년 동안 운전시간의 변화에 따른 결과는 비교적 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 본선은 선체에 해양생물 자생방지를 MGPS(Marine Growth Protection System)장치가 장착되어 있는 선박임에도 불구하고 선체에 자생하는 해양생물로 인한 선저오염이 주기판의 부하와 연료소모량에 미치는 영향이 상당함을 알 수 있었다.

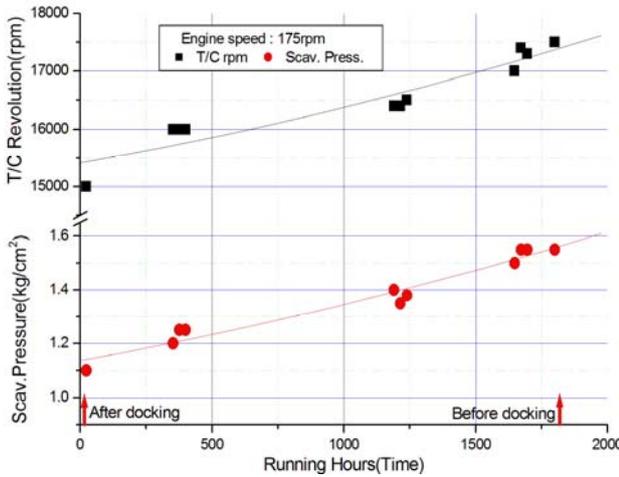


Figure 11: Comparison of the turbocharger revolution and scavenging air pressure according to the running hours during 2.5 years

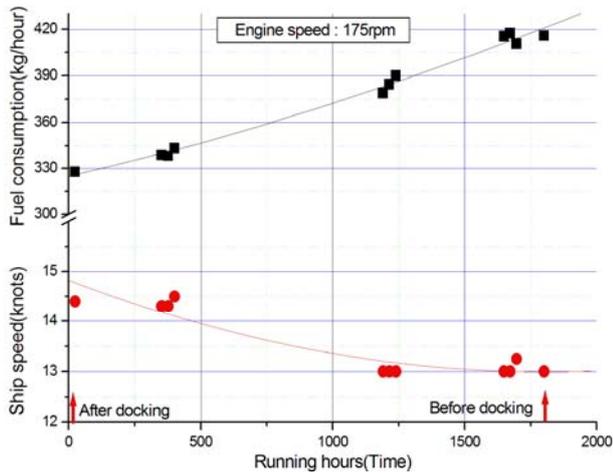


Figure 12: Comparison of fuel consumption and ship speed according to running hours during 2.5 years

4. 결 론

이상의 에너지 효율 개선을 위한 기초연구로서 현재 운항중인 선박의 선체에서 자생하는 해양생물로 인한 마찰저항이 엔진의 연소상태와 연료소비량에 미치는 연구 성과로 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 선체에 마찰손실을 유발하는 해양생물의 영향을 확인하기 위하여 해양생물이 가장 많이 부착하는 입거 전의 경우와 선체저항이 가장 적은 출거 후의 비교에서 최고폭발압력은 160rpm에서 2MPa, 175rpm에서 1.5MPa 차이가 발생하였고, 기관출력은 160rpm에서 17.4%, 175rpm에서 18% 차이가 발생하였다. 또 연료소모량은 시간당 160rpm에서 16.6%, 175rpm에서 12.1%의 차이가 발생함을 알았다.
2. 입거 전후의 측정 결과와 출거와 입거 사이의 2.5년 동안의 운전시간에 따른 분석 결과가 잘 일치하고 있음

을 확인하였으며, 동일한 엔진 회전수에서 운전시간의 경과에 따라 부하 증감을 나타내는 T/C 회전수, 소기압력 및 연료소모량이 선형적으로 증가하고 있으며, 선속은 반대로 감소함을 알 수 있었다.

References

- [1] G. R. Park and K. H. Cho, "A study on the comparison of effects and application of marine fuel reduction methods," Journal of the Korea Society of Marine Engineering. vol. 38 no. 9, pp. 1057-1063, 2014 (in Korean).
- [2] K. S. Jung, J. Y. Choi, E. S. Jeong, and J. S. Choi, "Correction of TDC position for engine output measuring in marine diesel engine," Journal of the Korea Society of Marine Engineering. vol. 36 no. 4, pp. 459-466, 2012 (in Korean).
- [3] K. Iida, K. Akishino, and K. Kido, "IMEP estimation from instantaneous crankshaft torque variation," SAE Paper no. 900617, 1990.
- [4] K. S. Jung, "Improvement of combustion efficiency for marine auxiliary diesel engine," Journal of the Korea Society of Marine Engineering. vol. 38 no. 3, pp. 233-239, 2014 (in Korean).
- [5] C. M. Jeong, "Petroleum measurement tables," Y-J Oil Bank co., LTD, pp. 10-30, 1969 (in Korean).
- [6] US NAVY, "U. S. navy towing manual," SL740-AA-MAN-010, 2002.
- [7] The American Practical Navigator, BOWDICH, Pub. no. 9, pp. 537-543, 2002
- [8] J. Y. Lee, Marine Engineering-Machine Introduction, Dasom Publisher, p. 200, 2006 (in Korean).