

# 선박 기관의 경제적 운전에 관한 연구 - 실습선 새누리호를 중심으로 -

김홍렬\* · 김부기\*\*† · 임금수\*\* · 김득봉\*\*\*

\*, \*\* 목포해양대학교 실습선, \*\*\* 한국해양대학교 대학원

## A Study on Economical Operation of a Ship's Main Engine - The case of Training Ship SAENURI -

Hong-Ryeol Kim\* · Bu-Gi Kim\*\*† · Geung-Su Rim\*\* · Deug-Bong Kim\*\*\*

\*, \*\* Training Ship, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

\*\*\* Graduate school of Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

**요 약 :** 선박의 운항에 소요되는 운항비는 선박의 종류, 크기, 속력, 항행구역 등에 따라 다를 수 있지만, 연료비가 차지하는 비율은 50~60%에 달하는 것으로 알려져 있다. 최근 국제 유가의 상승으로 인한 선박 운용비를 절감하기 위하여 중소형 선박에서도 저질 연료유의 사용이 검토되고 있는 추세이다. 더 나아가 해운선사들은 연료소모량을 줄이기 위한 방법으로 감속운항을 취하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 실선을 이용하여 해상에서의 선속대비 주기관의 연료소모량을 측정하고, 부하에 따른 전진계수 대비 속력과 연료소모량의 관계를 통해 상용연속출력보다 낮은 주기관 부하의 70% 영역이 최적의 운항조건이라고 제안하였다.

**핵심용어 :** 연료소모량, 전진계수, 실선, 주기관, 상용출력

**Abstract :** Operation Abstract : Operational cost required for navigating a ship may differ from according to type, scale, economic speed, navigation area and other factors. However, it is known that the fuel oil price ratio takes 50~60%. It is the current trend because of the use of poor quality fuel and it is reviewed even for small to medium sized ships to save the operational costs due to the recent rise of international oil price. Furthermore, ocean carriers are taking action to low speed navigation as the alternative method of reducing fuel consumption. Hence, in this study, fuel consumption of main engine was measured by using actual operating ship data compared with sea speed at sea. It was suggested that the area of M/E's load(70%) lower than NCR is the optimal navigating condition through the relation between speed and fuel consumption compared with advance ratio together with the load.

**Key words :** Fuel oil consumption, Advance ratio, Actual ship, Main engine, NCR(Normal Continuous Service Rating)

### 1. 서 론

1912년 건조된 SELANDIA호에는 8실린더 4행정(530 mm 구경 × 730 mm 행정) 140 RPM에서 920 kW를 출력하는 디젤 엔진이 세계최초로 탑재되어 원양항해가 시작되었다. 제 1, 2차 세계대전 사이에는 내연기관 탑재율이 원양항해선박의 1.3%에서 25%로, 그리고 1920년대 4%에 불과하던 전세계

조선소 전체 선박량 중 내연기관 추진 선박이 1939년에는 60%로 팽창되었다(SAMJUNG, 2013).

선박의 운항 지출 비용을 줄이기 위해 1987년 크루즈 정기선인 커나드 라인(Cunard line)의 Queen Elizabeth 2호선(QE2)은 증기터빈에서 디젤엔진으로의 교체를 계기로 선박의 추진장치로 디젤기관을 채택한 후 꾸준한 연구와 성능 개선이 진행되고 있는 중이다. 특히, 화석연료의 유한성과 환경규제의 강화로 인하여 선주와 엔진개발자들은 새롭고 효율이 우수한 제품의 개발에 사활을 걸고 있다.

지속적인 선박 기관을 연구개발함에 따라 낮은 회전속

\* First Author : kimhy@mmu.ac.kr, 061-240-7460

† Corresponding Author : kim60091@mmu.ac.kr, 061-240-7462

도, 높은 최고 연소압력, 터보과급기의 결합 등으로 54% 이상 높은 엔진의 열효율을 가져왔고 연료소비율은 155 g/kWh까지 낮추어 질 수 있게 되었다(Jeon and Lee, 2005).

그러나 최근 해운 산업의 환경은 저운임 고유가 시대에 선박대형화와 선사 경쟁이 심화되고 대기배출물의 규제는 강화되어(Choi et al., 2000) 운항여건이 악화되는 등 연료유 절감은 선택이 아닌 필수가 되었다. 선박 운용비를 절감하기 위하여 중소형 선박에서도 저질연료유의 사용이 검토되고 있는 추세이다(Han et al., 2007) 더 나아가 해운선사들은 연료소모량을 줄이기 위한 방법으로 감속운항(Low Speed Navigation)을 취하고 있다.

미래 엔진의 핵심 개발목표는 저급 연료유 사용, 유해 배기가스 배출의 저감, 운전과 유지보수 과정을 단순화 시키는데 있고 연료소모량 저감을 위한 전자제어 기능을 갖춘 지능형 엔진을 개발하는 것이다.

Kim et al.(2012) 등은 실제 해상에서 선박의 연료소모량 절감을 위해 선속대비 연료소모량을 예측하여 속력 14~15 노트, 140~150 RPM이 대상 선박의 최적운항 조건으로 보고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 대상선박을 이용하여 해상에서 주기관의 회전수와 부하에 따른 선속과 연료소모량 및 전진계수를 분석하여 선박 기관운전의 경제적 운항조건을 제시하고자 한다.

## 2. 연료유 절감 방안

### 2.1 연료유 소모현황

상선의 기관실에는 주기관과 보조기관으로 대별되는 연료유 사용기가 있고, 보조기관에는 발전기관과 보일러가 대표적인 장치이다. 일반적으로 알려진 전체 연료유 소모량중 주기관이 차지하는 비중은 매우 크다. 특히 컨테이너선은 90% 이상을 차지하고 있다.

이러한 주기관에서 사용되는 연료유 절감방안으로는 정속 및 저속운항, 과급기 컷-오프 운전, 연료변 개조, 저마찰 선체 외판 도료, 연료첨가제 사용 등의 방법이 알려져 있다. 특히, 아이피케이(International Paint Korea)사의 Intersleek 900 외판 방오도료 사용으로 6% 이상의 연료절감 효과가 있는 것으로 발표하였다(Kim, 2009).

이러한 여러 가지 방법 중 저속운항이 가장 효과적인 방법이라 할 수 있으나 정시의 신뢰성 있는 서비스와 운항계획에 따른 선박의 특성상 마냥 저속운항을 할 수는 없다. 따라서 연료유의 소비는 절감하고 효과성은 극대화할 수 있는 주기관의 적정운전점이 필요하다.

### 2.2 주기관의 성능

기관 성능을 구성하는 요소는 효율, 출력, 토크 그리고 연료소모량 등의 비중이 크다고 할 수 있다. 선박의 추진 효율은 규정된 속도로 배를 추진하도록 출력을 달성하는 것이라 할 수 있다. 열효율은 공급된 전체의 일에 대한 유용한 일로 전환된 일의 비율을 뜻하고, 기계효율은 실린더에서의 출력에 대한 크랭크축에서의 출력의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_e = \frac{bhp}{ihp} \times 100 \quad (1)$$

출력은 행한 일의 시간 비율로 선형적인 측정에서 피스톤에 작용하는 힘에 주어진 시간에 피스톤이 움직이는 거리를 곱한 것이다. 즉, 피스톤의 상하운동이 프로펠러의 회전운동에 의해 선체를 추진하는 것이다.

토크는 출력을 프로펠러 회전속도로 나눈 것으로 단위 시간당 사이클의 반복수로 직선상으로 피스톤에 작용하는 운동에 기초하고 실린더를 따라서 움직이는 전체 거리를 계산하기 때문에 엔진속도를 포함한다. 즉, 출력은 회전의 향으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$bhp = \frac{F \times 2\pi rn}{K} \quad (2)$$

힘 F는 축의 축심으로부터 주어진 반경에 접선으로 작용한다고 가정한 하나로 합성한 유효한 힘이다. 여기서 r은 F를 계산하는데 있어 지정된 반경이고, n은 구정된 축의 단위시간당 회전수(rpm), K는 출력(kW)의 상수로 K=1,000 이다.

연료소모율 w를 계산하면 1일 연료소모량 FOC(Fuel Oil Consumption)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$FOC = \frac{w \times kW \times 24}{1,000} [kg/kwh] \quad (3)$$

선박의 기관은 연속해서 계속 운전할 수 있음을 보증하는 최대출력이 중요한 성능의 값으로 통상 주어진 회전수에서 실린더당 제동마력(bhp)이나 출력(kW)으로 표시되는 정격 값으로 나타내지만, 상용연속출력(NCR)와 최대연속출력(MCR)는 만재상태에서 원하는 항해속도를 유지해야 하므로 기관제작에 있어서 중요한 요소이다.

### 2.3 연료계수

기계의 성능을 평가할 경우에 적용할 수 있는 용이한 판단 기준으로 연료계수가 있고 일반적으로 선박의 연료비는 운항비중 약 50~60%에 이를 만큼 큰 비중을 차지하고 있다. 최근 화석연료의 의존도를 낮추는 기후변화협약, 현존선과 신조선 에너지 효율지수, 이산화탄소 배출 저감을 위한 선박운항법 등 다양한 규제와 국제 유가의 폭등과 더불어 연료비 부담이 가중되고 있다.

운항하는 선박의 엔진에 대한 연료소모량에 관한 체계적인 실선 실험이 현실적으로 곤란하므로 육상 공장에서의 엔진 실험(Official shop test result)과의 비교 연구도 어려운 실정이다. 이에 따라 실선에 적용하여 선속 대비 연료소모량과 전진계수(J, Advance ratio)에 따른 선속, 연료소모량 및 출력을 비교·분석함으로써 대상 선박의 연료소모량을 최소화하는 등 최적의 운항조건을 제시하고자 한다.

일반적으로 선박용 엔진의 유효 마력은 선박의 저항과 선속의 곱으로 표현되고, 선박의 저항이 선속의 제곱에 비례하므로 결국 연료소모량은 선속의 세제곱에 비례한다. 선박의 배수량과 해상상태, 같은 질의 연료를 사용하고 항해속도가 비슷할 경우 연료계수는 아래의 비교법을 적용할 수 있다.

$$C = \frac{F}{D^{2/3} \times V^3} \quad (4)$$

C : 연료계수

D : 선체의 배수톤수

V : 선박의 속도

F : 24시간당 소모되는 연료의 양

Table 2. General particulars of Training Ship

Items	Dimensions
Length O. A.	abt. 103.0 m
Breadth (mld)	15.6 m
Draft (design, mld)	5.40 m
Displacement (design)	abt. 4.6 m
M/E MCR	6,060 BHP × 173.0 RPM
M/E NCR	5,150 BHP × 163.9 RPM
Max. Speed	17.69 KTS
Service Speed	17.06 KTS
Number of Blade	4 EA
Dia of Propeller	3,800 mm
Pitch of Propeller (mean)	3,525.35 mm

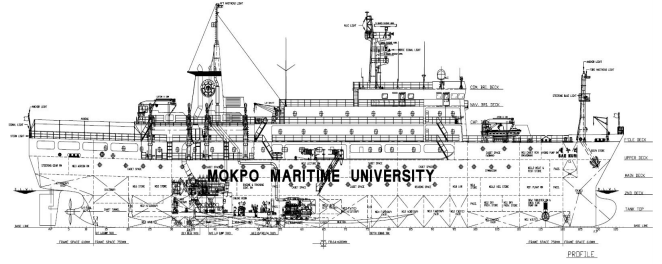


Fig. 1. General arrangement of T/S SAENURI.

실선 적용 대상 선박인 새누리호는 목포해양대학교 실습선으로 Table 1에 새누리호의 주요 제원을 나타내고, Fig. 1은 선박의 배치도를 보여주고 있다. 특히, 대상 선박은 실습선으로서 일반 상선이 운항일정을 맞추기 위해 필요시 주기관의 운전 조건을 과도하게 운전해야 하는데 반해 실습선의 경우 선박의 운항일정에 비교적 여유가 있으므로 실선의 성능분석 및 추가적인 연구를 통해 선박별 최적의 운전조건을 제안할 수 있다.

### 3. 실선계측 및 자료 분석

#### 3.1 프로펠러 추진

선박은 피스톤의 상하운동을 프로펠러의 회전운동으로 변환하여 유체를 밀어내고 그 반발력에 의해 선박을 추진시키는 형태이다. 특히 추진기로서 프로펠러는 연료효율에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 주기관의 설계시 평균유효압력과 회전수의 결정은 자유로우나 엔진 출력, 프로펠러 회전수 및 배의 속도 사이의 관계는 프로펠러 곡선에 따라 결정된다. Table. 2에서는 새누리호의 주기관(Main engine) 텔레그래프의 단계별 RPM과 조종선속을 나타내었다.

Table 3. RPM & Speed table of Main Engine

Step	D.Slow	Slow	Half	Full	NCR	MCR
RPM	69	87	116	144	163.9	173
SPD	7.75	9.55	12.45	15.30	17.06	17.69

#### 3.2 전진계수

실선의 프로펠러 날개 매수는 4매이고 직경은 3,800 mm, 스크류 앵글은 24도, 솔리디티는 0.71278, 피치(Pitch)는 3,525.35 mm 이다. 여기서 솔리디티는 프로펠러의 회전면적에 대한 투영면적(AP, Area of Project)의 비로서 아래의 식으로 정의된다.

$$Solidity = \frac{AP}{\pi r^2} \quad (5)$$

선박의 프로펠러는 선체에 의해서 발생된 불규칙적인 반류 분포로 인하여 자항시험에서 정확한 특성을 파악하기 어려우므로, 균일한 유동장 조건에서 프로펠러 단독으로 성능 시험이 수행된다. 프로펠러의 단독 성능을 파악하기 위한 방법은 많은 시간과 비용이 소요되는 모형시험을 통해서 결정 할 수 있으나 최근 컴퓨터의 성능과 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)의 비약적인 발전으로 인해 프로펠러의 단독성능에 대한 수치해석이 활발하게 이루어지고 있으며(Jo et al., 2010), RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용한 점성유동 해석 방법이 제시된 바 있다.

프로펠러의 성능을 평가하는 방법으로 프로펠러의 회전수에 따른 전진계수가 중요한 요소이며 프로펠러 설계 시 기본 자료로 사용된다. 그러므로 전진계수에 따른 연료소모량, 선속 및 출력을 비교·분석하였으며, 전진계수(Park et al., 2011)에 대한 정의는 다음의 식에 서술하였다(ANZINE, 2012).

$$Advance\ ratio\ (J) = \frac{V}{nD} \quad (6)$$

여기서  $V$ 는 선속이며  $n$ 은 RPS(Revolution Per Second)이고  $D$ 는 프로펠러 직경이다. 연료의 소모량과 선속은 새누리호의 건조과정에서 실시된 프로펠러 성능분석표(Ship speed-power table / Calculation result), 육상 엔진 실험 자료(Shop test) 및 해상시운전 결과보고서(Result of sea trial)를 참조하여 상관관계를 분석하였으며 Table 3과 같다.

Table 4. Sea trial data of Main Engine

Case	Load (%)	SPD [m/s]	rps	Adv. Ratio [J]	BHP	FOC [ $\ell$ /h]
1	25	6.073	1.83	0.874	1,426	214.6
2	50	7.524	2.29	0.864	2,766	425.5
3	75	8.415	2.60	0.851	4,227	568.7
4	85	8.668	2.73	0.835	4,857	676.2
5	100	9.007	2.89	0.821	5,795	787.6

### 3.3 연료소모량 계측 및 분석

실선을 이용하여 정량적인 연료소모량을 계측하고 최적의 운항조건을 제안하는 실험적인 접근방법에는 여러 문제점을 안고 있다. 특히, 기상 변수가 항존하는 해상이라는

특수한 공간에서 장시간 같은 조건을 유지하여 실측한다는 점은 불가능한 일이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 외력(Kim and Song, 2009)에 의한 변수를 최소화 하기위한 방법으로 30분 간격으로 다수의 케이스를 평균화하여 분석하는 방법을 선택하였다.

연료유의 계측은 2012년 새누리호 운항일정에 따라 2012년 10월 11일부터 11월 29일까지 256시간 3,250 km를 항해하는 동안 RPM별 연료소모량을 실측하고 선속 또한 동시에 GPS로 선위를 측정하여 거리를 구하였다. 데이터 수집은 운항일정 중 입출항이나 정박시간을 제외한 7일이었으며 비교적 안정적인 11케이스만을 계산하였다.

RPM은 Dead Slow에서 Maneuvering Full, 상용출력(NCR)까지 핸들노치를 이용하여 4 RPM씩 미세 조정하였다. 신뢰성 높은 데이터를 얻고자 동일한 홀수조건, 소각도 변침 항행 구역과 해상상태를 고려하였으며, 측정 당시의 기상과 해상조건은 파고 0.5 m, 풍속 10 m/s 이하일 때 측정된 데이터만 이용하였다. 기관실에서는 주기관 가버너를 고정하여 연료주입량을 일정히 유지하였다. 실선계측 장소 및 대상 선박은 Fig. 2에 나타내었고, 계측시 사용된 유종은 중질중유이며 유량계는 Table 4와 같다.

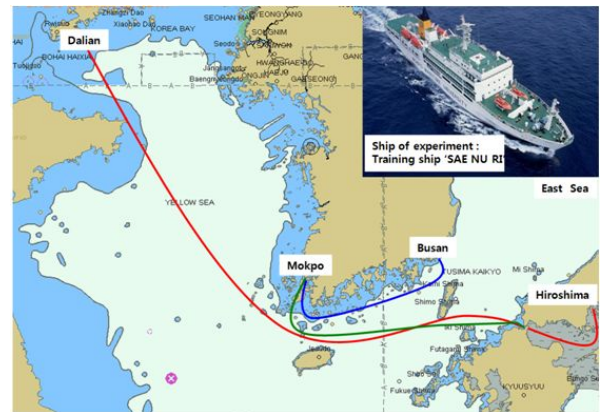


Fig. 2. Position of actual ship's test.

Table 5. Specification of F.O Flowmeter

ITEM	DESCRIPTION
Type	POSITIVE DISPLACEMENT RING PISTON
Model	ARD25 F18-IN
Flow Rate	MAX 2,300L/H, NOR 1,200L/H, MIN 500L/H
Connection	10K-25A

## 4. 결과 및 고찰

선박은 평형수, 윤활유, 연료유 등을 비롯한 수많은 종류

와 대량의 화물을 선적하여 해상에서 유체를 헤치고 나아가야 하기 때문에 많은 저항을 받게 된다. 동일한 연료계수 조건하에서 선속을 2배로 가속할 경우 유체의 저항은 3배로 늘어나고 연료소모량은 속력의 세제곱에 비례하므로 이를 계산하면 연료는 약 8배가 더 늘어나게 된다.

연료소모량에 영향을 주는 인자로서 연료유 가열온도, 연료 분사변, 터보차저, 피스톤 정비불량 등의 내부적 요소와 바람, 조류, 해상상태, 선체 외관 오손 등의 외부적 저항이 있다.

일반적으로 일정한 거리를 항해하는 선박의 경우 최대속력으로 항해하는 것이 감속하여 항해하는 것보다 항해시간을 단축시킬 수 있으나 연료소모량은 증가한다고 보고되지만 정량적인 평가는 부족하였다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 4는 주기관의 부하와 전진계수 대비 연료소모량 및 선속의 축값을 자동 지정방식에 따라 나타낸 것이다. 전진계수 대비 연료소모량은 부하 70%에서 가장 높은 것으로 나타났고 선속은 부하 70% 약간 아래에서 전진계수 대비 가장 높게 나타났다.

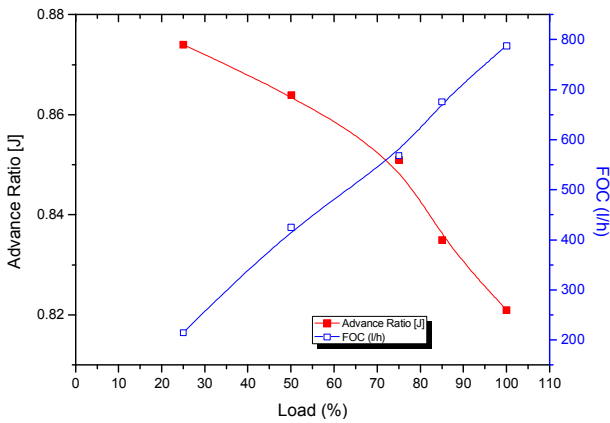


Fig. 3. Advance ratio & FOC with main engine's load.

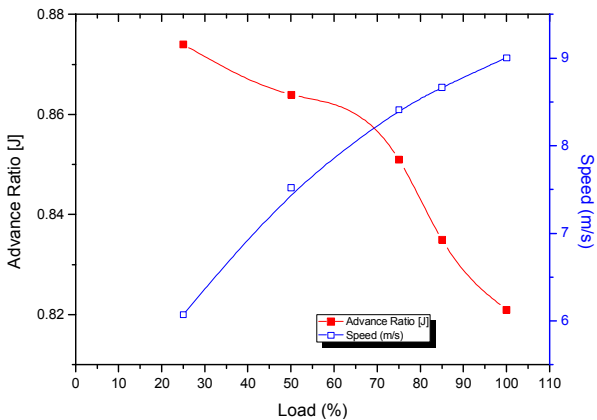


Fig. 4. Advance ratio & Speed with main engine's load.

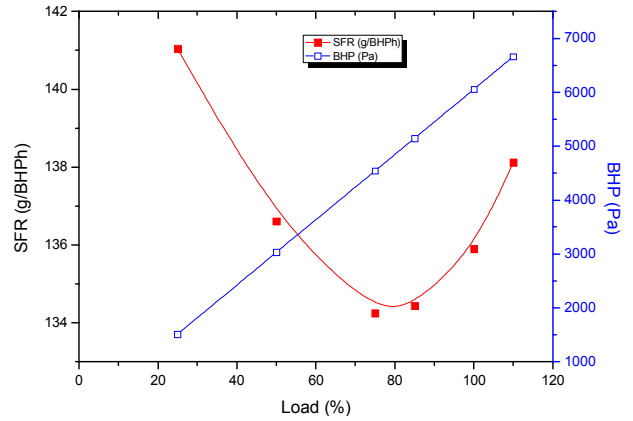


Fig. 5. SFR & BHP with main engine's load.

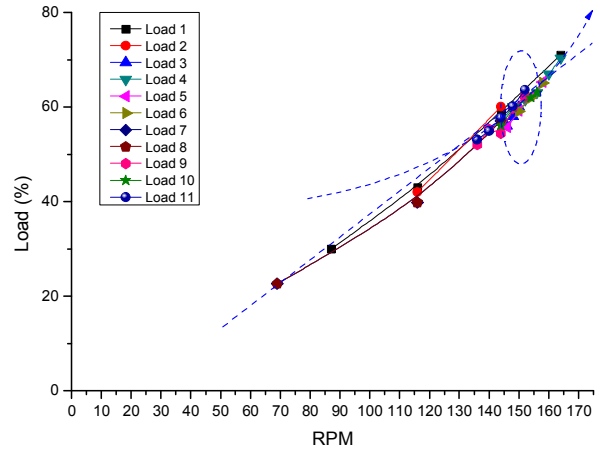


Fig. 6. Main engine's load with RPM.

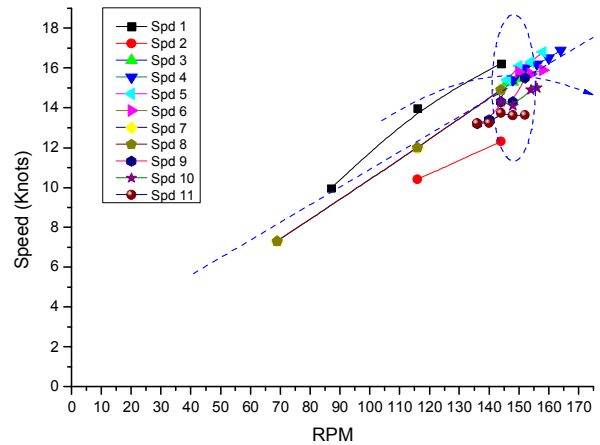


Fig. 7. Ship's speed with main engine RPM.

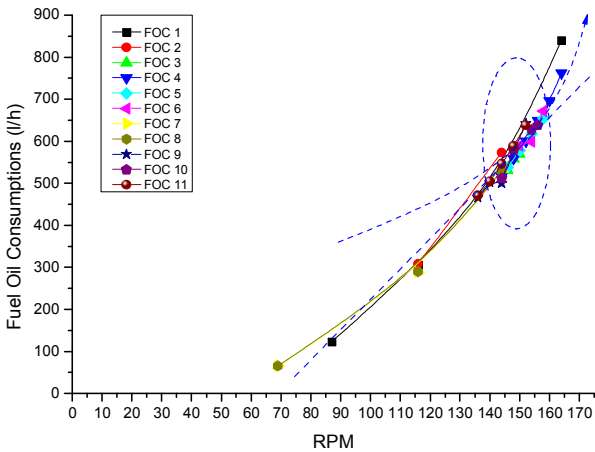


Fig. 8. Fuel oil consumption with main engine's RPM.

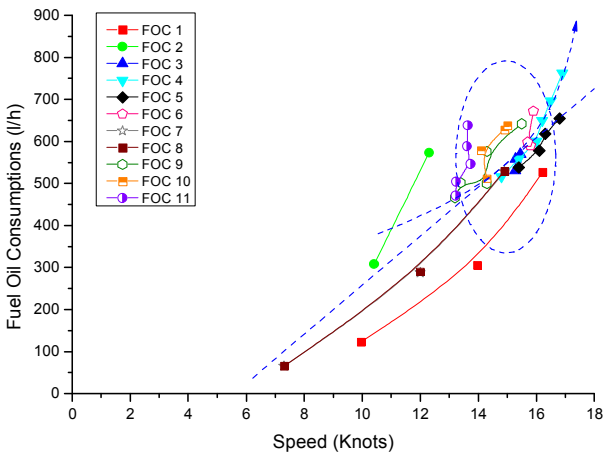


Fig. 9. Fuel oil consumption with ship's speed.

연료소모량은 주기관 부하 75%에 비해 70%에서 시간당 244리터 적게 계산되었다. 전체적으로 부하 70% 전후에서 부하와 전진계수 대비 연료소모량이 적고 선속은 빨랐으며 출력 또한 높은 영역으로 나타났으므로 대상선박의 주기관은 부하 70% 부근에서 출력효율이 가장 좋은 지점으로 보인다.

Fig. 5는 실선인 새누리호의 부하별 연료소비율(SFR, Specific Fuel Rate)과 제동마력(BHP, Brake Horse Power)을 나타낸 그래프로 일반적인 2행정 대형 디젤 저속기관과 전형적인 성능 곡선과 유사하게 나타났으며 특히 최고부하 보다 75%에서 연료소비율이 1.65(g/BHP) 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6~8은 주기관의 회전수에 따른 부하량 증가를 실측하여 나타낸 것으로 앞 절에서 언급한 바와 같이 운항일정에 따라 RPM별 연료소모량을 실측하고 GPS를 이용하여

선속을 계산하였다. 신뢰성 높은 데이터를 얻고자 동일한 조건에서 각기 다른 11케이스를 통해 전체적인 동향을 파악할 수 있었다. 주기관 회전수에 따른 부하와 선속은 비례적으로 증가하지만 연료유 소모량은 기울기가 급격히 커지면서 비례하고 있다. 이는 연료소모량이 속도의 세계급에 비례한다는 이론과도 잘 일치하는 결과이다.

Fig. 9는 선속별 연료소모량을 계측한 결과 선속이 빠를수록 연료소모량이 완만하게 증가하였으나 대상선박의 경우 15.5노트 이상시 연료소모량이 급증하는 경향을 보였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실선을 이용하여 주기관 부하에 따른 선속, 전진계수와 연료소모량을 계산하여 대상선박에서 최적의 운항조건을 제안하고자 하였다.

대상선박은 주기관의 부하에 따라 연료소모량과 선속은 비례적으로 증가하였으나 프로펠러 전진계수는 감소하다 부하의 70% 부근에서 연료소모량과 선속의 교차점이 나타났다. 또한 주기관 회전수별 부하와 선속에서는 비례적으로 증가하는 추세를 보이다 150 RPM 이후부터는 부하 증가 대비 선속의 증가는 완만히 증가하고 연료의 소모량은 급속한 증가추세를 보이고 있다. 따라서 대상선박에서는 주기관 부하 70%, 150 RPM 부근에서 선속 15노트로 계산되는 영역이 연료소모량과 선속을 고려한 최적의 운항조건으로 판단된다. 향후 부하별 연료소모율과 유종의 변화에 따른 대기오염물질의 배출정도 및 연료유 절감을 위한 다양한 연구가 추가적으로 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] ANZINE(2012), ANSYS Workbench R14.0 Design Exploration, ANSYS FLUENT R14.0 Update - Reacting Channel Model, A Study on the Analysis of Propeller cavitation using FLUENT Mixture Model, Vol. 21, pp. 41-45.
- [2] Choi, J. S., T. I. Park, M. H. Bae, J. H. Lee and J. H. Kim(2000), Ships by Air Pollution regulations of international trends and NOx removal technology development direction, Journal of The Korean Society Marine Environment and Energy, Vol. 3 No. 1 pp. 76-79.
- [3] Han, W. H., J. G. Nam and D. C. Lee(2007), A Study on the Variation of Physical & Chemical Properties with Refining Treatment and Additive Mixture for Marine Fuel Oil, Journal of the Korean Society of Marine Environment

- & Safety, Vol. 18, No. 1, pp. 39-45.
- [4] Jeon, H. J. and D. C. Lee(2005), Marine Diesel Engines and Gas Turbines, DONGMYUNGSA, Ninth Edition., pp. xxiv
- [5] Jo, H. S., J. H. Kim, Y. J. Jo and J. H. Jeong(2010), Performance Analysis of PBCF Propeller, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 451-454.
- [6] Kim, D. Y. and Y. S. Song(2009), The Case Study of the Violation of Speed and Bunker Consumption Rate at the Time Chartered Vessel(Focused on the Bulk Carriers), Journal of Korea Port Economic Association, Vol. 25, No. 2, pp. 231-246.
- [7] Kim, K. M.(2009), Eco-friendly anti-fouling hull coatings were painted, Monthly Maritime Korea, Vol. Sep., pp. 38-41.
- [8] Kim, S. K., Y. S. Lee, G. Y. Kong, J. P. Kim and C. H. Jung(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 & Safety, Vol. 18, No. 1, pp. 41-47.
- [9] Park, H. S., H. S. Yoon., M. C. Kim and H. H. Chun(2011), Study on the Resultant Vorticity Numerical Model of the Propeller Wake, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 2, pp. 141-146.
- [10] SAMJUNG(2013), Business company, <http://www.bksilver.co.kr/>.

---

원고접수일 : 2012년 12월 03일

원고수정일 : 2013년 01월 06일

게재확정일 : 2013년 02월 25일