

군수지원함의 CODAD, CODLOD 및 CODLAD 추진체계에 따른 연료 소비량 비교 및 분석

김민욱¹ · 오진석^{2*}

Comparison and Analysis of Fuel Consumption by CODAD, CODLOD and CODLAD System for Combat Support Ship

Min-wook Kim¹ · Jin-seok Oh^{2*}

¹Underwater Vehicle Research Center, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

²Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

천안함 피격사건 이후 대한민국 해군은 함정에 복합 추진체계를 탑재하여 운항 시 발생하는 진동 및 소음 문제를 줄이기 위한 노력을 기울이고 있다. 복합 추진체계는 함정의 저속 운항 구간에서 추진용 전동기를 이용하여 추진할 수 있는 장점을 가진다. 이는 기존의 내연기관만으로 이루어져 있는 기계 추진체계보다 우수한 정숙성을 가질 수 있고, 내연기관의 연료 효율이 불량한 저속 구간에서 전동기를 이용하기 때문에 보다 경제적이다. 이에 본 논문에서는 대한민국 해군에서 운용하고 있는 군수지원함을 바탕으로 가상함정을 설정하였으며 기존의 추진체계와 복합 추진체계의 연료 소비량을 시뮬레이션 하여 경제성 측면에서 비교 및 분석하였다. 그 결과 전동기를 겸하여 운용할 수 있는 복합 추진체계의 연료 효율이 상대적으로 개선된 것을 확인하였다.

ABSTRACT

After patrol corvette Cheonan was hit and sank on duty, the Republic of Korea Navy has tried to install hybrid propulsion system on naval ship to reduce vibration and noise problems during navigation. The hybrid propulsion system has advantage that propulsion motor can be propelled in low speed operation of the vessel. This can be a better quietness than a mechanical propulsion system which consists of a conventional internal combustion engines. And more economical operation is possible by using a propulsion motor in a low speed operation where a fuel efficiency of the internal combustion engine is poor. In this paper, we set up virtual ship on the basis of a combat support ship in the Republic of Korea Navy, economically compared and analyzed fuel consumption between conventional and hybrid propulsion system. As a result, it was confirmed that the fuel efficiency of hybrid propulsion system which use electric motor had been relatively improved.

키워드 : 해군 함정, 복합 추진체계, 군수지원함, 연료 소비량, 시뮬레이션

Key word : Naval vessel, Hybrid propulsion system, Combat support ship, Fuel consumption, Simulation

Received 29 December 2016, Revised 02 February 2017, Accepted 28 February 2017

* Corresponding Author Jin-Seok Oh(E-mail: ojs@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4283)

Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.5.1049>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

2010년 3월 26일, 백령도 근처 해상에서 경계 임무를 수행하고 있던 천안함이 북한의 잠수정이 발사한 어뢰에 피격되어 침몰하는 사건이 발생하였다. 이에 대한민국 해군은 함정 운항 시 추진체계에 의해 발생하는 진동 및 수중 방사소음을 감소시킴으로써 함정의 대잠능력을 향상시키는 방안을 마련하고 있다. 그 방안 중 하나는 내연기관만을 이용한 기존의 추진체계에 전동기를 추가하는 복합 추진체계를 함정에 탑재하는 것이다. 이를 통하여 함정의 저속 운항 구간에서 상대적으로 진동 및 수중 방사소음이 큰 내연기관 대신 추진용 전동기를 기동하여 함정의 정속성을 향상시킬 수 있다.

한편, 미국 해군에서는 유가 상승에 대비하고 국방예산을 감축하기 위하여 함정 운용 시 발생하는 막대한 양의 연료 소비량을 절감하기 위해 많은 연구를 진행하고 있다. 대표적인 사례로는 1990년대 초반에 DDG-51 Arleigh Burke급 구축함에 추진용 전동기를 탑재하여 연구를 진행했던 HED(Hybrid Electric Drive)가 있으며, 그림 1은 DDG-51에 HED가 탑재된 추진체계 구성을 나타내고 있다[1,2]. 감속기어를 통해 추진용 전동기와 가스터빈의 동력을 축계에 전달할 수 있도록 설계되었다.

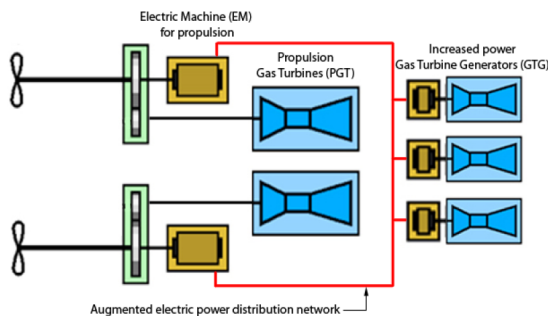


Fig. 1 The general concept of a hybrid system [2]

이는 낮은 부하에서 연료 효율이 현저하게 저하되는 가스터빈, 디젤엔진 등의 내연기관이 가지는 단점을 보완하기 위한 효과적인 방안이다. 즉, 함정의 저속 운항 구간에서는 내연기관의 연료 효율이 저하되기 때문에 추진용 전동기를 기동하여 함정을 추진하는 것이다. 실제로 상당수의 함정을 순항 속도보다 낮은 속도로 운

항하고 있으며, 그 비율이 연간 운항 시간 중 상당한 비율을 차지하고 있어 이때의 연료 효율을 향상시킴으로써 함정의 연간 연료 소비량을 감축할 수 있는 것이다. 그림 2는 미 해군에서 운용하는 DDG-51 Arleigh Burke급 구축함의 운항 프로파일을 나타내고 있으며, 순항속력인 20 knots보다 낮은 속력으로 운항되는 비율이 상당히 높은 것을 알 수 있다.

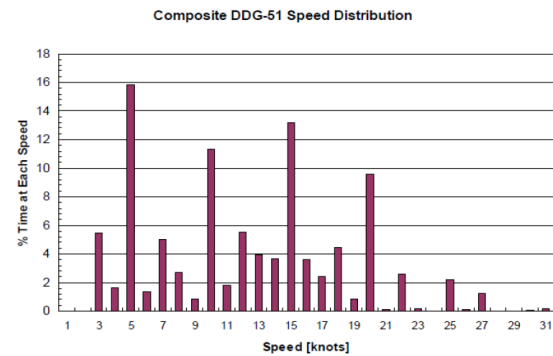


Fig. 2 Operational profile for USS Arleigh Burke[2]

이렇듯 함정 운항 시 발생하는 소음 및 수중 방사소음 문제에 따른 생존성 문제, 그리고 낮은 연료 효율을 개선하기 위한 방안으로 선진국들은 복합 추진체계와 전기 추진체계에 주목하고 있다. 본 논문에서는 특별히 연료 소비량에 중점을 두고 기계 추진체계와 복합 추진체계의 연료 소비량을 시뮬레이션 하여 비교하였다. 그리고 시뮬레이션을 위하여 대한민국 해군에서 운용하고 있는 AOE-57 천지급 군수지원함의 제원을 바탕으로 가상함정을 설정하였다.

II. 함정 추진체계

2.1. 종류 및 특징

해군 함정에 탑재되는 추진체계는 크게 기계 추진체계, 복합 추진체계, 전기 추진체계로 분류할 수 있다. 먼저 기계 추진체계는 디젤엔진이나 가스터빈 같은 내연기관을 운전함으로써 함정의 추진력을 발생시키는 방식을 가리킨다. 현재 대한민국 해군에서 운용하고 있는 함정들은 대부분 기계 추진체계를 탑재하고 있으며, 함정의 저속 및 고속 운항 구간에서 모두 디젤엔진 또

는 가스터빈을 주로 운용하고 있다. 이에 따라 저속 운항 구간에서 연료 효율이 악화되는 문제점을 안고 있다. 기계 추진체계의 종류에는 디젤엔진만 탑재하는 CODAD(Combined Diesel And Diesel), 가스터빈만 탑재하는 COGAG(Combined Gas turbine And Gas turbine), 그리고 디젤엔진과 가스터빈을 모두 탑재하는 CODOG(Combined Diesel Or Gas turbine) 및 CODAG(Combined Diesel And Gas turbine)가 있다. 함정을 최고속력으로 운항할 때 두 가지 추진기관을 모두 운전하는 경우에 'And'로 표현하고, 한 가지 추진기관만 운전하는 경우에 'Or'로 표현한다[3]. 아래 표 1은 내연기관만으로 이루어진 기계 추진체계의 종류와 구성을 나타내고 있다.

Table. 1 Type of mechanical propulsion system[4-7]

Classification	Configuration
CODAD system	
COGAG system	
CODOG system	
CODAG system	

복합 추진체계는 내연기관이 저속으로 운전될 때 발생하는 진동 및 수중 방사소음, 그리고 낮은 연료 효율을 보완하기 위하여 추진용 전동기를 탑재한 방식을 가리킨다. 'I. 서론'에서 언급했듯이 내연기관은 낮은 부하율에서 연료 효율이 나빠지기 때문에, 낮은 부하율에서 비교적 양호한 효율을 갖는 전동기를 기동하면 소음

및 수중 방사소음이 줄어 적 잠수함에 의해 탐지될 위험을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 함정의 연료 효율 또한 개선할 수 있다. 표 2에서 볼 수 있듯이 복합 추진체계의 종류에는 CODLOD(Combined Diesel-Electric Or Diesel), CODLAD(Combined Diesel-Electric And Diesel), CODLOG(Combined Diesel-Electric Or Gas turbine), CODLAG(Combined Diesel-Electric And Gas turbine) 등이 있다[3]. 다소 차이는 있지만 복합 추진체계는 순항 속력 이하의 저속 운항 구간에서는 전동기를, 그 이상의 속력에서는 디젤엔진 또는 가스터빈을 운전한다.

Table. 2 Type of hybrid propulsion system[8]

Classification	Configuration
CODLOG system	
CODLAG system	
CODLO system	
CODLAD system	

복합 추진체계와 관련된 연구로는 미 해군의 DDG-51에 탑재된 HED 이외에도 영국의 Type-23(CODLAG), 이탈리아의 FREMM(CODLAG) 등 다양한 사례가 있다.

전기 추진체계 같은 경우, 아직까지 해군 함정에 탑재된 사례가 많지 않은 실정이며, 미국의 DDG-1000 Zum Walt급 구축함과 영국의 TYPE-45 Daring급 구축함이 대표적인 사례이다. 이는 내연기관의 폭발에 의해 직접 추진력을 얻는 종래의 추진체계와 달리, 함정의 모든 운항 구간에서 대용량의 추진용 전동기를 기동하여 추진력을 얻는 방식이다.

전력 수요와 운항 프로파일이 불규칙적으로 변하며, 이를 예측하기 어려운 해군 함정의 특성 때문에 전력 품질 개선, 전력 변환 시스템의 효율 개선, 전기 추진 계통의 중량 감축 등을 위한 연구가 계속해서 진행되고 있다.

아래 그림 3은 TYPE-45 구축함의 추진체계를 간략하게 나타내고 있다.

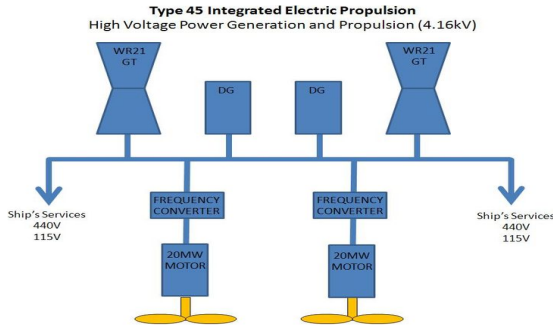


Fig. 3 Integrated Electric Propulsion[8]

2.2. 운용 현황

일반적으로 전투가 주된 목적인 함정은 단위 중량당 고출력을 얻을 수 있도록 고속 운항 시 가스터빈을 운전하고, 수송함이나 지원함 같은 비전투함은 디젤엔진을 운전한다. 현재 대한민국 해군은 복합 추진체계를 탑재한 함정을 보유하고 있지 않으며, 차기 호위함인 FFG-818 대구함과 차기 군수지원함인 AOE-51 소양함이 2018년에 취역을 앞두고 있다고 알려져 있다.

표 3은 이지스 구축함인 울곡 이이함과 군수지원함인 화천함의 모습을 나타내고 있다.

Table. 3 Republic of Korea Navy ships in operation[9]

Figures	Description
	<ul style="list-style-type: none"> · Destroyer · DDG-992 Yulgok Yi I · COGAG system
	<ul style="list-style-type: none"> · Combat support ship · AOE-59 Hwacheon · CODAD system

III. 가상함정 설정

3.1. 가상함정의 제원 및 소요마력

본 논문에서는 대한민국 해군의 군수지원함인 ‘화천함’을 바탕으로 가상함정의 배수량, 최고속력, 운항속력을 같거나 비슷한 수준으로 설정하였다.

화천함에는 두 대의 디젤엔진이 두 개의 축계에 각각 한 대씩 연결되어 있는 CODAD 시스템이 탑재되어 있다. 먼저 가상함정의 소요마력을 추정하기 위하여 해군 계수에 의한 방법을 이용하였다. 이는 해군계수, 배수량, 최고속력을 대입하여 소요마력을 산출하는 방법이다[10].

$$IHP = D^{\frac{2}{3}} \times \frac{V^3}{C_{adm}} \quad (1)$$

식 (1)에서 IHP 는 소요마력, D 는 배수량(displacement), V 는 최고속력(maximum speed), C_{adm} 는 해군계수(admiralty coefficient)를 의미한다. 표 4는 화천함의 제원을 나타내고 있다.

Table. 4 Specification of AOE-59 Hwacheon

Classification	Description	
Displacement(ton)	Light	4,200
	Full	9,113
Propulsion system	CODAD	Diesel Engine*2sets
	CODLOD	Diesel Engine*2sets
	CODLAD	Propulsion Motor*2sets
Speed(knot)	Cruising	15
	Maximum	20

표 4에 나타내고 있는 화천함의 제원을 식 (1)에 입력하여 295의 C_{adm} 를 얻었다. 그리고 295를 다시 식 (1)에 입력하여 16,085의 IHP 를 얻었다. 이를 출력 단위로 환산하면 약 12,000이며, 이에 따라 추진용 전동기의 용량을 한 대당 1,500kW, 디젤엔진의 용량을 한 대당 6,000kW로 산정하였다. 그림 4는 위에서 언급한 가상함정의 소요마력 산출 과정을 나타내고 있다.

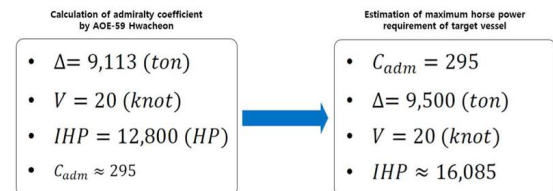


Fig. 4 Calculation of maximum horsepower requirements

3.2 운항 프로파일

가상함정은 전투함정의 연간 운항 프로파일을 바탕으로 설정하였다. 일반적으로 함정은 연간 약 9개월의 운용 기간을 가지고, 약 3개월의 정비 기간을 가진다. 9개월의 운용 기간 중 절반은 해상에서 기동하고, 나머지는 항내에서 대기한다. 또한 해상 기동 시에는 운항 시간 중 80% 정도를 순항속력 이하로 운용하며, 20%를 순항속력 이상으로 운용한다[11]. 본 논문에서는 앞서 언급했던 전투함정의 연간 운항 프로파일을 바탕으로 가상함정의 운항 프로파일을 설정하였으며, 그림 5는 전투함정의 연간 운항 일(개월)수를 나타내고 있다.

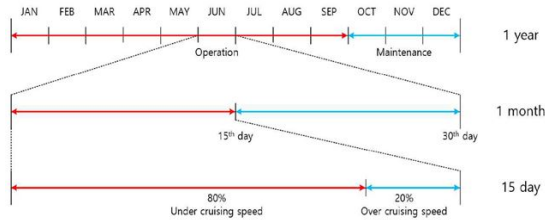


Fig. 5 Operating profile of naval vessel[11]

현재 대한민국 해군에서는 모두 3척의 군수지원함을 운용하고 있으며, 이 3척의 함정들이 4개월 간격으로 번갈아가며 작전을 수행하는 것으로 가정하였다. 또한 9개월의 운용 기간 중 4개월은 장기 작전을, 5개월은 단기 작전을 수행하는 것으로 가정하였다. 4개월의 장기 작전의 앞, 뒤 각 1개월은 준비 및 정리 기간으로 보았으며, 5개월의 단기 작전은 한 달을 기준으로 보름은 해상 기동을, 나머지 보름은 항내에서 대기하는 것으로 설정하였다. 그림 6은 본 논문에서 설정한 가상함정의 연간 운항 일(개월)수를 나타내며, 표 5는 본 논문에서의 가상함정의 연간 운항 프로파일을 가정한 것이다.

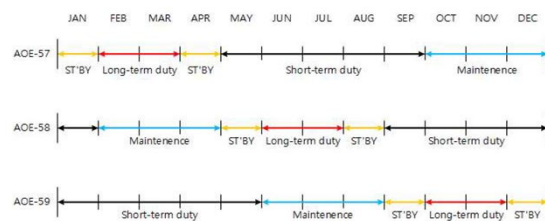


Fig. 6 Operating profile of virtual vessel

Table. 5 Operating profile of combat support vessel

Speed (knot)	Time (%)	
0 ~ 6	5	5
6 ~ 10	35	25
10 ~ 16	40	50
16 ~ 18	15	15
18 ~ 20	5	5
Classification	Long-term duty (Total 60 days) = 1,440 hours	Short-term duty (Total 15 days) = 360 hours

IV. 시뮬레이션

4.1. 연료 소비량 산출 방법

연료 소비량은 함정의 운항 중에 소비되는 연료의 양을 의미한다. 식 (2)는 연료 소비량을 산출하는 공식이다.

$$Fuel\ Consumption\ X_n [g] = P \times H \times SFC \quad (2)$$

$P[kW]$ 는 엔진의 출력, $H[h]$ 는 운항 시간을 의미하고, $SFC[g/kW \cdot h]$ 는 출력당, 시간당 연료 소비량으로써 연료 소비율(Specific Fuel Consumption)을 의미한다. 먼저 출력 $P[kW]$ 를 구하기 위해서는 표 4에서 나타내고 있는 함정의 속력(knot)을 참조해야 한다. 일반적으로 선박이나 함정이 해상에서 전진할 때는 배수량과 속력에 비례하는 엔진의 출력을 필요로 하며, 이를 프로펠러 법칙(propeller's law)이라고 한다. 식 (3)은 프로펠러 법칙을 수식으로 나타낸 것이다[10].

$$IHP \propto D^{\frac{2}{3}} \times V_a^3 \quad (3)$$

IHP 는 소요마력, D 는 배수량, V_a 는 함정의 속력을 의미한다. 여기서 배수량 D 를 고정시키면 소요마력 IHP 는 속력 V_a 의 세제곱에 비례함을 알 수 있다. 그리고 운항 프로파일에서 나타내고 있는 함정의 속력을 식 (3)의 V_a 에 대입하여 함정의 소요마력을 얻은 후에 이를 출력 단위로 환산하면 엔진 출력 $P[kW]$ 를 구할 수 있다. 그림 7은 프로펠러 법칙에 따른 곡선을 나타내고 있다.

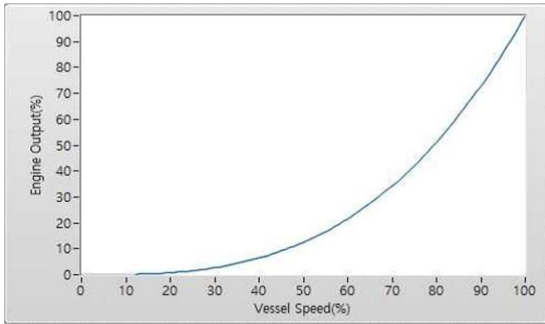


Fig. 7 Propeller's law

함정의 속력에 따른 엔진 출력(kW)을 구한 후에는 디젤엔진의 연료 소비율 곡선으로부터 연료 소비율을 구하게 된다. 연료 소비율 곡선은 약간의 차이는 있지만 대체로 비슷한 형태를 띠며, 본 논문에서는 ‘3.2 가상함정의 제원 및 소요마력’에서 산출한 결과에 따라 비교적 근사한 출력을 가지는 MAN V28/33D 모델의 연료 소비율 곡선을 이용하였다. 그림 8은 연료 소비율 곡선을 NI사의 LabVIEW를 이용하여 보간(fitting)한 것이다.

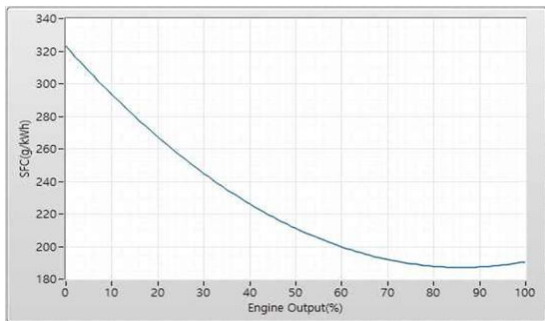


Fig. 8 SFC curve for simulation

보간의 결과로 얻은 곡선은 식 (4)로 나타낼 수 있고, 이때 독립변수 x 는 디젤엔진의 부하율(%), 종속변수 y 는 연료 소비율($g/kW \cdot h$)을 의미한다.

$$y = 322.894 - 3.14841x + 0.01826x^2 \quad (4)$$

위의 과정들을 통해 특정한 속력 구간에서의 엔진 출력과 연료 소비율을 구한 후에 운항 프로파일에 따라

운항 시간을 함께 곱하면 연료 소비량을 얻을 수 있다. 이렇게 구해진 값들을 모두 합하면 연간 연료 소비량을 구할 수 있다. 식 (5)는 연간 연료 소비량을 구하는 방법이다.

$$\begin{aligned} \text{Total Fuel Consumption} &= \sum_{i=1}^n X_i \\ &= X_1 + X_2 + \dots + X_n \end{aligned} \quad (5)$$

4.2. CODAD system

일반적으로 CODAD 추진체계는 2대의 디젤엔진을 탑재하며, 순항속력 이하의 저속 운항 시에는 디젤엔진 1대를 운전하고, 순항속력을 넘어서는 고속 운항 시에는 디젤엔진 2대를 운전한다. 본 논문에서는 함정 운항 시에 발생할 수 있는 다양한 상황, 예를 들어 RAS (Replenishment At Sea) 또는 FAS(Fueling At Sea)와 같은 해상보급 등을 고려하지 않았다.

그림 9는 CODAD 추진체계의 시뮬레이션 과정을 간략하게 도식화 한 것이다. 표 4의 운항 프로파일에 따라 함정의 속력과 운항 시간을 입력하면 ‘4.1 연료 소비량 산출 방법’에서 언급한 방법으로 가상함정의 엔진 출력과 연료 소비율을 구한다. 그 후에 연료 소비량 산출 공식에 따라 운항 구간에서의 연료 소비량을 산출하게 되며, 최종적으로 단기 및 장기 작전에서의 각 연료 소비량을 모두 합산하게 된다. 가상함정에 CODAD 추진체계를 탑재했을 때의 연간 연료 소비량을 산출하게 된다.

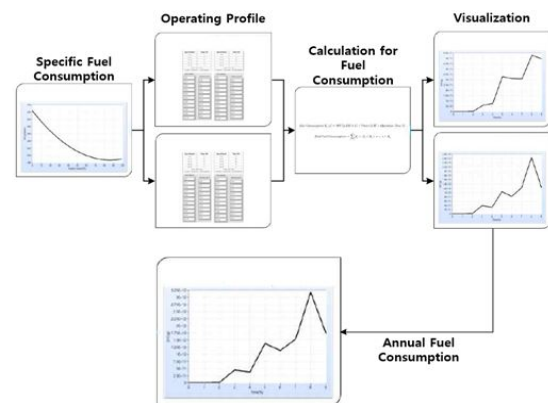


Fig. 9 Flow of simulation for CODAD system

CODAD 추진체계는 디젤엔진만으로 이루어진 기계 추진체계이므로 추진용 전동기에 대한 부분이 없다. 따라서 전력 효율, 손실 등을 다루지 않는다. 시스템 그림 10은 본 논문에서 활용한 NI LabVIEW의 블록 다이어그램을 일부 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전에서 소비된 연료의 양을 각각 산출한 후에 합산하였으며, 동일한 연료 소비율 곡선에 단기 및 장기 작전의 운항 프로파일을 각각 적용하였다.

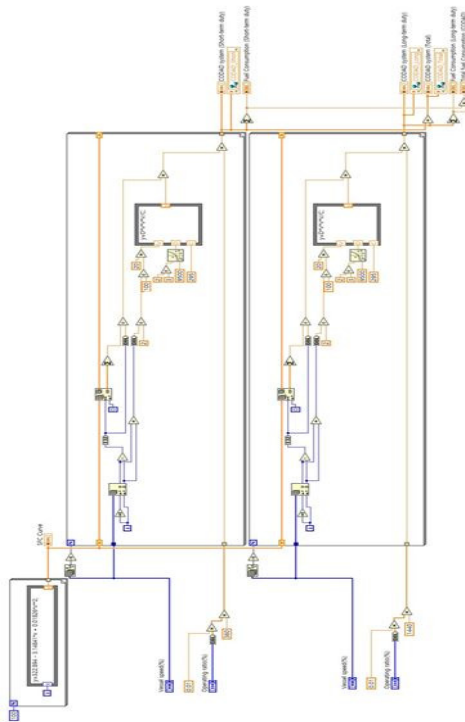


Fig. 10 Diagram of simulation for CODAD system

4.3. CODLOD system

CODLOD 추진체계는 CODAD 추진체계에 추진용 전동기가 추가된 복합 추진체계이다. 따라서 순항속력 이하의 저속 운항 시에는 추진용 전동기를 기동하고, 순항속력을 넘어서는 고속 운항 시에는 디젤엔진을 이용한다. 이에 따라 추진용 전동기를 기동할 때 발생하는 손실에 따라 전력 변환 효율을 고려해야 한다.

MAN Diesel&Turbo에서 제공한 자료에 따르면, 함정의 발전기에서 전력을 생산하여 변환을 거친 후에 추진용 전동기에 전력이 공급되고, 다시 추진용 전동기에

서 생산된 동력이 프로펠러에 전달되기까지 약 8.7~9.7%의 손실이 발생한다고 한다. 본 논문에서는 손실을 10%로 가정하여 추진용 전동기의 효율을 90%로 적용하였다. 이때 가상함정의 전력 소모량은 고려하지 않았으며, 모든 운항 구간에서 전력 변환 효율은 항상 일정하다고 가정하였다. 그림 11은 전력 변환 손실에 따른 최종 효율을 도식화 한 것이다.

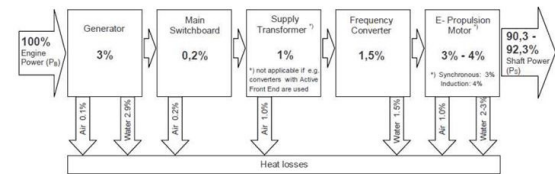


Fig. 11 Efficiencies in diesel-electric plants[12]

그림 12는 CODLOD 추진체계의 시뮬레이션 과정을 간략하게 설명하고 있다. 가상함정의 제원과 운항 프로파일, 디젤엔진의 연료 소비율은 CODAD 추진체계와 동일하게 적용하였으나, 추진용 전동기의 기동에 따른 발전기의 부하 증가분을 고려하기 위하여 CODAD 추진체계에서 몇 가지 단계가 추가되었다.

추진용 전동기의 기동으로 발전기의 부하율은 80%가 된다고 가정하였으며, 이에 따른 연료 소비량을 계산하기 위하여 디젤엔진의 연료 소비율 곡선에서 80%에 해당하는 연료 소비율을 적용하였다. CODLOD 추진체계는 순항속력 이하의 저속 운항 시에 추진용 전동기를 기동하기 때문에 단기 및 장기 작전에서 순항속력보다 낮은 구간에서는 이를 적용하였다. 그림 12는 CODLOD 추진체계의 시뮬레이션 과정을 나타낸다.

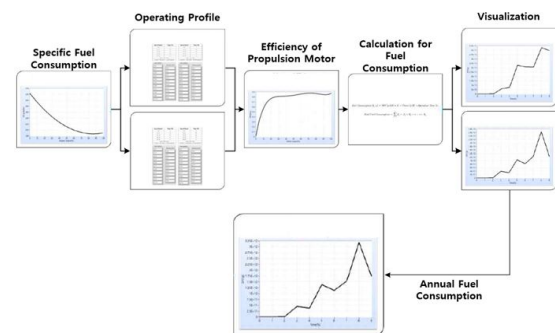


Fig. 12 Flow of simulation for CODLOD system

그림 13은 CODAD 추진체계의 블록 다이어그램에서 추진용 전동기가 추가된 CODLOD 추진체계의 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 추진용 전동기의 효율과 발전기 부하율을 계산하는 부분이 추가되었다. 마찬가지로 단기 및 장기 작전에서 소비된 연료의 양을 각각 산출한 후에 합산하였으며, 동일한 연료 소비율 곡선에 단기 및 장기 작전의 운항 프로파일을 각각 적용하였다.

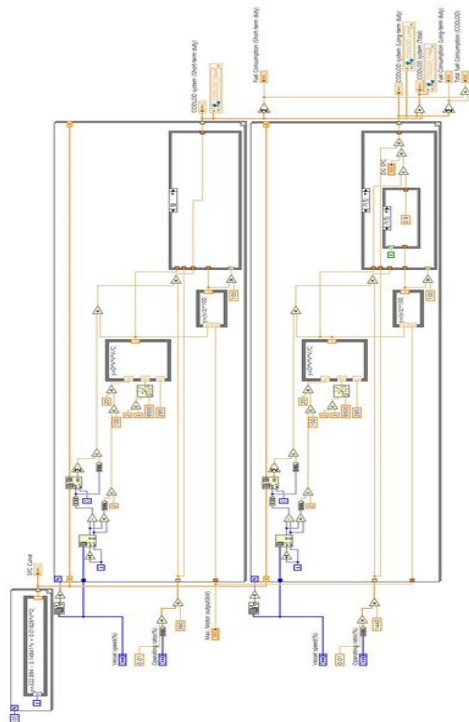


Fig. 13 Diagram of simulation for CODLOD system

4.4. CODLAD system

CODLOD 시스템은 최고속력 구간에서 디젤엔진만을, CODLAD 시스템은 전동기와 디젤엔진을 모두 운전한다. 따라서 CODLAD 시스템은 함정의 최대출력, 즉 운항 프로파일 상에서 함정의 최고속력을 요구하는 구간에서 디젤엔진 및 추진용 전동기의 최대 출력으로 인해 발생하는 연료 소비량을 모두 합산해야 한다. 이때 추진용 전동기의 효율과 발전기의 부하율은 CODLOD 추진체계와 동일하게 적용하였고, 디젤엔진의 연료 소비율은 최대로 설정하였다. 그림 14는 CODLAD 추진체계의 시뮬레이션 과정을 도식화 한 것이다.

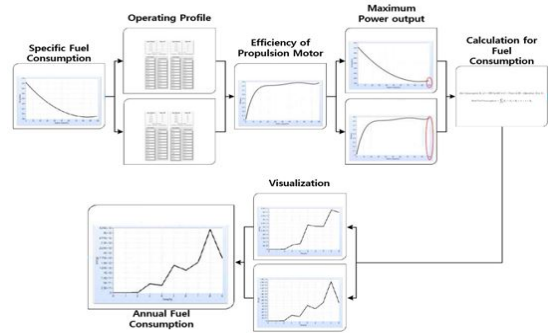


Fig. 14 Flow of simulation for CODLAD system

CODLAD 추진체계는 CODLOD 추진체계와 비슷한 흐름으로 진행하였으나, 디젤엔진과 추진용 전동기를 모두 운전할 경우 CODLOD 추진체계보다 운항 속력이 다소 상승할 것으로 보고, 최고속력의 운항 비율을 1% 낮추는 대신 디젤엔진과 발전기의 연료 소비율을 101% 적용한 운항 비율을 1%로 설정하였다. 그림 15는 CODLAD 추진체계의 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

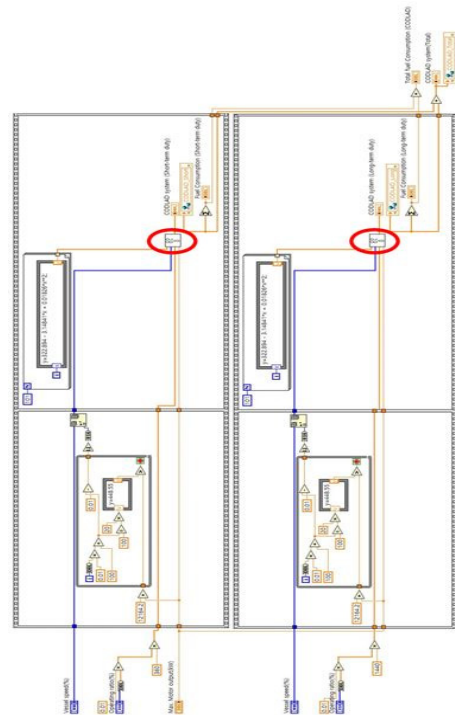


Fig. 15 Diagram of simulation for CODLAD system

위의 그림 15의 블록 다이어그램에서 원 안에 있는 부분은 블록 다이어그램을 간략하게 하기 위한 subVI이다. 이는 그림 16에서 보다 자세히 설명하고 있으며, 저속 운항 구간 및 최고속력 운항 시 추진용 전동기의 효율, 발전기 부하율을 고려하여 연료 소비량을 산출한다. CODLAD 추진체계에서도 마찬가지로 단기 및 장기 작전에서 소비된 연료의 양을 각각 산출한 후에 합산하였으며, 동일한 연료 소비율 곡선에 단기 및 장기 작전의 운항 프로파일을 각각 적용하였다.

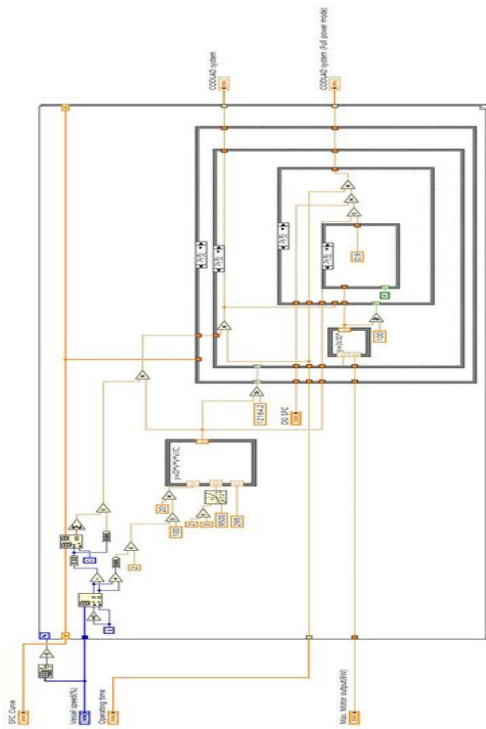


Fig. 16 Diagram of subVI of CODLAD system

4.5. 결과 비교 및 분석

앞서 가정하고 설정한 내용들에 따라 CODAD, CODLOD 및 CODLAD 시스템의 연간 연료 소비량을 산출하였다. 각 시스템의 시뮬레이션 결과 그래프에서 2점 쇄선은 단기 작전, 쇄선은 장기 작전, 굵은 선은 연간 연료 소비량을 나타내고 있다.

먼저 그림 17는 CODAD 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전 시 연료 소비량이 각각 240.6 ton과 878.6 ton으로, 연간 연료 소비량이

총 1119.2 ton으로 산출되었다. 이는 CODAD 추진체계의 특징에 따라 함정 운항 시 모든 속도 구간에서 디젤엔진의 연료 소비율을 바탕으로 총 연료 소비량을 산출한 결과이다.

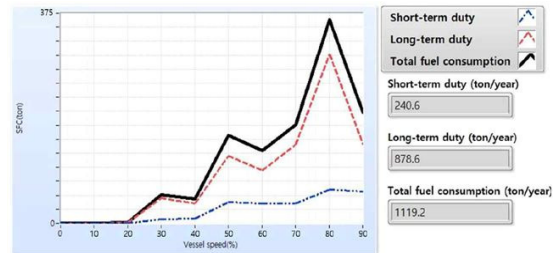


Fig. 17 Result of simulation for CODAD system

그림 18은 CODLOD 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전 시 연료 소비량이 각각 236.1 ton과 859.01 ton으로, 연간 연료 소비량이 총 1095.1 ton으로 산출되었다. CODAD 시스템에 비하여 연간 약 24 ton이 절감된 것을 알 수 있다. 이는 함정이 12 knot 이하로 운항할 때 디젤엔진 대신 추진용 전동기를 이용함으로써 내연기관이 낮은 부하에서 운전할 때 연료 효율이 낮아지는 점을 보완한 결과라고 할 수 있다. 즉, 함정이 지속적으로 운항할 경우에 추진용 전동기를 탑재하고 있는 복합 추진체계가 실제로 내연기관의 연료 효율이 낮은 구간에서 그 단점을 일부 보완할 수 있음을 암시한다고 볼 수 있다.

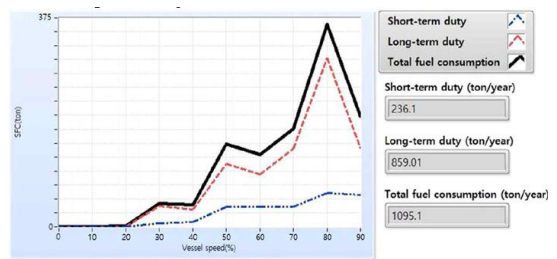


Fig. 18 Result of simulation for CODLOD system

아래의 그림 19는 CODLAD 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단기 및 장기 작전 시 연료 소비량이 각각 225.8 ton과 842.5 ton으로, 연간 연료 소비량이 총 1068.4 ton으로 산출되었다. CODAD 시스템

에 비하여 연간 약 50 ton이 절감된 것을 알 수 있다. 이는 CODLAD 추진체계보다 절감된 연료 소비량이며, 최고속력 구간에서 운항 프로파일을 일부 수정하면서 연료 소비량이 더 절감된 것으로 보인다. 따라서 복합 추진체계에서의 디젤엔진과 발전기의 원동기가 가지는 부하율을 고려하여 함정을 운항함에 따라 더 나은 연료 효율을 얻을 수 있음을 암시한다.

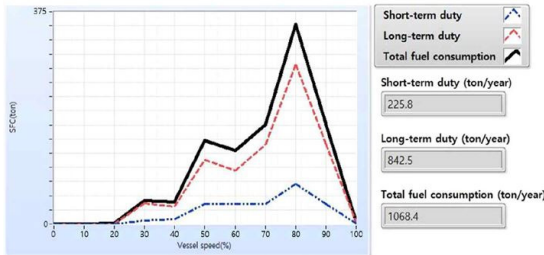


Fig. 19 Result of simulation for CODLAD system

그림 20은 각 추진체계 사이의 연료 소비량 차이를 보여주고 있다. 12 knot, 즉 최고속력의 60%까지 CODAD 추진체계의 연료 소비량이 CODLOD 및 CODLAD 추진체계보다 더 많은 이유는 디젤엔진의 부하가 낮은 구간에서 연료 효율이 악화되기 때문이며, 이에 따라 기계 추진체계인 CODAD 추진체계에서 더 높은 연료 소비량을 보이고 있는 것이다.

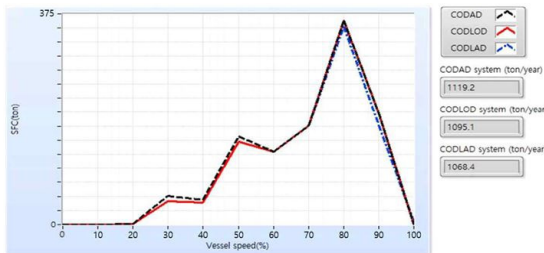


Fig. 20 Deviation of fuel consumption between propulsion systems

V. 결론

본 논문에서는 대한민국 해군에서 운용하고 있는 화천함의 제원을 바탕으로 추진체계에 따른 연료 소비량을 비교 및 분석하고자 하였다. 이에 가상함정을 설

정하여 기계 추진체계인 CODAD, 복합 추진체계인 CODLOD 및 CODLAD 추진체계의 연료 소비량을 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 동일한 제원을 가진 함정을 연간 동일한 운항 프로파일로 운항했을 때 CODAD 추진체계에 비하여 CODLOD 추진체계는 2.1%, CODLAD 추진체계는 4.6%의 개선된 연료 효율을 보였다. 이는 실제 함정의 제원과 운항 프로파일을 바탕으로 시뮬레이션을 진행한 결과이므로 실제 복합 추진체계를 탑재하고 있는 함정의 연료 효율과 유사한 추세를 보일 것으로 사료된다.

현재 대한민국 해군은 기계 추진체계에서 복합 추진체계를 탑재한 함정을 획득하여 운용하는 과도기적 시기에 있다. FFX Batch-II 차기 호위함인 대구함과 AOE-II 차기 군수지원함인 소양함이 건조 중에 있으며, 이들 함정은 2018년에 취역 예정이라고 알려져 있다. 추후 함정의 종류 및 다양한 상황에 따라 복합 추진체계를 탑재한 함정의 연료 소비량 및 에너지 효율에 관한 데이터가 획득되어 관련 연구가 지속적으로 이루어져야 하며, 기존 기계 추진체계에서 복합 추진체계를 탑재한 함정을 운용할 때 본 논문이 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 나아가 함정의 운항 모드에 따른 상황별 전력 소모량을 바탕으로 추가적인 연구가 진행된다면 추진용 전동기의 용량 최적화 및 함정의 전력 체계를 설계함에 있어 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This study is an improvement of Kim Min-wook's master's thesis("A Study on Fuel Consumption of Combat Support Ship according to Propulsion System").

REFERENCES

- [1] T. McCoy, J. Zgliczynski, N. Johanson, F. A. Puhn, and T. W. Martin, "Hybrid Electric Drive for DDG-51 Class Destroyers," *American Society of Naval Engineers*, vol. 119, no. 2, pp. 83-91, Oct. 2007.

- [2] B. H. Gully, "Hybrid Powertrain Performance Analysis for Naval and Commercial Ocean-Gong Vessels," Ph. D. dissertation, The University of Texas at Austin, 2012.
- [3] H. M. Lee, and B. J. Cho, "Analysis of Development Trend for the Integrated Power System of Naval Vessels to Perform the High Power and Energy Mission Load Platform," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 6, pp. 796-801, Sep. 2011.
- [4] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_and_diesel
- [5] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_gas_and_gas
- [6] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_or_gas
- [7] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia. [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_and_gas
- [8] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel-electric_and_gas
- [9] Republic of Korea Navy ships [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_ships_of_the_Republic_of_Korea_Navy.
- [10] K. H. Cho, *Marine Engineering*, Busan, Korea, Dasom, 2016.
- [11] H. M. Baek, "A Study on the Arrangement of Integrated Power System for Warship," M.S. dissertation, Korea Maritime and Ocean University, Busan, MA, 2013.
- [12] H. M. Baek, K. S. Jung, M. H. Lee, J. S. Choi, "A study on the arrangement of integrated power system for warship," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 9, pp. 1070-1074, Sep. 2014.



김민욱(Min-Wook Kim)

2013년 한국해양대학교 공학사
 2013년 해양선박(기관사)
 2016년 한국해양대학교 공학석사
 ※ 관심분야 : 메카트로닉스, 전력전자, 재생에너지



오진석(Jin-Seok Oh)

1983년 영국 Zodiac 선박회사 엔지니어
 1989년 국방과학연구소 연구원
 1996년 한국해양대학교(공학박사)
 2009년 일본큐슈대학(공학박사)
 2009년~현재 한국해양대학교 산학연 ETRS센터 소장
 1996년~현재 한국해양대학교 기관공학부 교수
 ※ 관심분야 : Ocean Plant, Monitoring&Control System, Communication System