

# 복합식 전기추진체계 함정의 양방향 전력변환 적용에 따른 연간 연료 소비량 분석

최동일<sup>1</sup> · 이현석<sup>2</sup> · 오진석<sup>†</sup>

(Received March 15, 2019 ; Revised April 29, 2019 ; Accepted May 12, 2019)

## Analysis of annual fuel consumption by using bidirectional power conversion with hybrid electric propulsion system in naval ship

Dong-Il Choi<sup>1</sup> · Hunseok Lee<sup>2</sup> · Jin-Seok Oh<sup>†</sup>

**요약:** 최근 고 전력이 요구되는 장비의 탑재 증가, 국방예산 감축에 따른 함정 운용유지비 절감 요구, 자동화 시스템 증대, 함 생존성 향상 요구 및 환경문제 등에 따라 미국, 영국 등 선진해군뿐만 아니라 전 세계 다수 국가의 해군에서 건조 중인 함정에 전기추진체계를 적용하고 있다. 또한 미국 및 유럽 해군에서는 복합식 전기추진체계를 탑재한 함정에 양방향 전력변환 기술을 적용하여 함정 연료비를 절감하는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 추진체계 구성 및 운용개념이 서로 다른 구축함, 호위함 및 군수지원함에 대해 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환 적용에 따른 연료 절감 효과 분석을 위해 함 속도별 운용비용, 연간 함 운용시간, 발전기 운용개념 등을 고려하여 연간 연료소비량을 시뮬레이션을 통해 실험하였다. 실험 결과, 함정에 양방향 전력변환 발전기모드를 적용 시 연간 100~360톤의 연료절감 효과가 있고 발전기 가동 없이 양방향 전력변환만 사용 시 더 많은 연료절감 효과가 있음을 확인하였다.

**주제어:** 복합식 전기추진체계, 양방향 전력변환, 발전기 모드, 함정

**Abstract:** Recently, the application of electric propulsion systems has expanded to ships in the navies of the US, UK, and many other countries due to increased availability of high electric power equipment, the need to reduce operating costs due to reduced defense budgets, increased automation, increased survivability requirements, and environmental issues. The US and European navies are also studying ways to reduce ship fuel costs by applying bidirectional power conversion technology to naval ships equipped with hybrid electric propulsion systems. In this study, the annual fuel consumption of destroyers, frigates, and logistics support vessels with different propulsion systems and operation concepts were studied to analyze the fuel saving effects while using bidirectional power conversion in the hybrid electric propulsion system. The analysis considered the operating speed ratios of each system, annual operation time, and the generator operation concept. It was confirmed that bidirectional power conversion in a hybrid electric propulsion system has a fuel saving effect of 100-360 tons per year, and there is more fuel saving when the bidirectional power conversion mode is used without operating a generator.

**Keywords:** Hybrid electric propulsion system, Bidirectional power conversion, Fuel saving effect, Naval ships

## 1. 서론

최근 함정 내에 설치되는 각종 장비/시스템의 첨단화, 대형화 및 자동화에 따라 함정 내 전력 수요가 급격히 증가하여 함정 내 전력과 추진체계 동력을 일원화하여 동력의 효율성 증대가 가능한 전기추진체계의 함정 적용이 확대되고 있다. 또한 낮은 소음/진동 및 수중방사소음 특성으로 함 생존성 향상이 용이한 점, 연료비 절감, 운전효율 향상, 정비소요 감소, 운용인력 최소화를 통한 함정 운용유지비 절감이 가능한 점과 황산화물, 질소산화물 등 대기오염물

질 배출을 감소 가능한 친환경성으로 향후 전기추진체계의 함정 적용은 더욱 확대 될 것이며 향후 함정의 표준 추진체제로 자리 잡을 것으로 전망되고 있다[1].

Figure 1은 전투함의 전기추진체계 적용 경향을 나타내는데 복합식 전기추진체계의 경우 영국 해군이 대잠작전 강화를 위해 Type23 함에 세계 최초로 적용한 이후 독일, 프랑스, 이탈리아 등 유럽해군 함정에 확대 적용하기까지는 약 20년이 경과되었다. Type 23 함 운용을 통한 우수한 함 성능 입증과 치솟는 원유 가격과 국방예산 감축에 따른 연료

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3627-476X>): Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: ojs@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4283

<sup>1</sup> Principal Engineer, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co.,Ltd, E-mail: choidi@dsmc.co.kr, Tel: 02-2129-7222

<sup>2</sup> Ph.D Candidate, Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: gar4153@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4866

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.

비 절감 필요성에 따라 독일, 프랑스 등 선진 유럽해군은 약 10년 전부터 복합식 전기추진체계 적용 검토 및 관련 기술을 개발하여 최근에 건조하고 있는 함정에 적용하고 있다. 복합식 전기추진체계의 함정 적용은 타 해군에도 확대되어 전투함 추진체계의 대세가 될 것으로 보인다. 복합식 전기추진체계는 2,000 ~ 4,000톤 범위의 디젤기관을 적용한 비교적 작은 초계함(Patrol corvette) 또는 호위함(Frigate)에서부터 가스터빈기관을 적용한 5,500 ~ 8,500톤 사이의 구축함에 적용되었는데 복합식 전기추진체계는 소형전투함에서 대형 전투함까지 다양한 크기의 함정에 적용되고 있다.

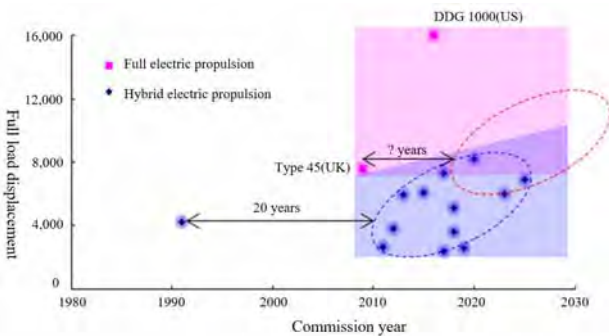


Figure 1: The status of electric propulsion for combat ship[1]

반면, 완전 전기추진체계는 영국 해군 Type 45 및 미 해군 DDG 1000 함에 적용되었는데 추진전동기 소형화를 위해 지속 연구개발 중임에도 불구하고 경하 5,000톤 이하 함정에 30 kts 이상의 최대속력을 만족하도록 완전 전기추진체계를 적용하는 것은 현재의 기술수준으로는 중량 및 설치 공간 제한으로 불가하다. 따라서 향후 함정에 확대 적용은 추진전동기 등 구성장비의 소형화, 경량화 기술 개발 수준에 따라 좌우 될 것으로 판단되며, 기술발전 추세 고려 시 복합식 전기추진체계 경우처럼 타 해군에 확대 적용은 20년 이상은 걸리지 않을 것으로 전망된다.

Figure 2는 연도별 세계 원유(두바이, 영국 브렌트, 미국 서부 텍사스) 평균 가격[2]과 전기추진체계 적용 함정의 건조 계약시점[3]의 관계를 나타낸다.



Figure 2: Relationship between the average price of oil and construction contract year of electric propulsion ship

Type 23 함에 복합식 전기추진체계 적용이 결정된 시점은 1985년으로 제2차 오일쇼크의 영향이 가시지 않은 상태로 원유 가격이 높게 형성된 시점이었다. 또한 독일, 프랑스 등 유럽 해군 및 한국 해군에서 복합식 전기추진체계 적용을 결정한 2010년대 초반에도 원유 가격은 급등한 상태로 연료비 절감은 함정 추진체계 결정의 중요한 요소 중 하나였음을 알 수 있다. 향후 원유가격 상승은 미국 및 유럽 이외 전 세계 해군 함정에 대한 전기추진체계 급속한 확대에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

최근에는 연료비 절감을 위해 복합식 전기추진체계를 탑재한 해외 군수지원함에 양방향 전력변환 기술을 적용하여 추진전동기를 발전기로도 이용하는 시도가 진행되고 있는데 양질의 전력 품질과 높은 전력부하가 요구되는 함정에 양방향 전력변환 적용 시 에너지 효율을 상당히 향상시킬 것으로 기대된다. 본 논문에서는 복합식 전기추진체계를 적용한 세 가지 대표 함정, 대형전투함인 구축함, 중형전투함인 호위함 및 전투지원함인 군수지원함에 대해 복합식 전기추진체계 양방향 전력변환 적용에 따른 연간 연료 소비량을 LabVIEW를 기반으로 한 시뮬레이션을 통하여 분석하여 함정의 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 방안에 대해 연구한다.

## 2. 복합식 전기추진체계 양방향 전력변환

### 2.1 양방향 전력변환 개념

지난 수십 년간 레이더, 소나, 유도탄 및 전투체계의 지속적인 기술 발전으로 함정 내 전력 수요는 급격히 증가하고 있고 이런 추세는 고출력 레이더, 레일건 등 고 전력 수요의 무기체계가 개발되고 있는 점을 고려 시 향후에도 지속될 전망이다. 또한 고출력 무기체계에는 추가적인 냉각장치 및 통풍장치가 반영되어야 하며, 이러한 고출력 무기체계를 운용 시 비선형적이고 높은 과도 특성을 가지고 있는 점도 고려되어야 한다. 따라서 이러한 높은 전력수요에 대한 이상적인 해결방안은 완전 전기추진체계가 될 수 있으나, 현재 기술 개발수준으로는 신조 함정에 완전 전기추진체계를 적용하기에는 기술적인 한계가 존재한다. 이러한 현재 기술적 한계를 극복할 수 있는 대안 중 하나가 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환이다. 양방향 전력변환은 추진전동기를 발전기로도 사용하는 방식으로 기계식 기관 추진동력을 이용하여 전력을 생성하여 함 내 부하에 전원을 공급하는 방식이다. 양방향 전력변환은 Active Front End (AFE) 방식이 적용되는데, 일반적인 가변속도 제어기는 다이오드 정류를 통해 제어되는 반면에 AFE는 IGBT와 같은 반도체스위치를 사용한다. AFE는 일반적으로 정류기 기능을 하지만 전력 회생 동안에 인버터로 작동 될 수 있어 양방향 전력변환이 가능하다. AFE 방식은 대형 변압기 없이도 왜 고조파를 감소시킬 수 있기 때문에 설치공간이 제한적이고, 높은 전력품질을 요구하는 함정에 적합하다

[4]. 민간선박의 경우는 Power Take-Off /Power Take-In (PTO/PTI)으로 알려진 양방향 전력변환이 이미 상용화되어 일부 선박에 적용되고 있으며, 연료비 절감과 국제 환경규제 강화에 따라 양방향 전력변환 기술은 지속적으로 발전하여 확대 적용 될 것으로 보인다.

2.2 양방향 전력변환 함정 적용

전투함에 대한 양방향 전력변환 적용 연구는 미 해군의 DDG-51 이지스구축함에 최초로 시작되었다. DDG-51 이지스구축함은 미 해군의 주력 전투함이나, COGAG 추진체계를 구성하는 LM2500 가스터빈 기관 4대와 501K 발전기용 가스터빈 기관 3대, 총 7대의 가스터빈 기관을 적용하여 타 함정 대비 연료 소모량이 매우 높다. 가스터빈 기관은 저부하에서 효율이 매우 낮아 높은 연료 소모율을 보인다. 이러한 문제를 개선하기 위해 미 해군은 복합식 전기추진체계를 적용하기 위한 연구를 수행하였고 기존 COGAG 체계에 Hybrid Electric Drive (HED) 시스템을 추가 적용하여 저속의 함 속력에서 연료소모율을 개선토록 하였다.

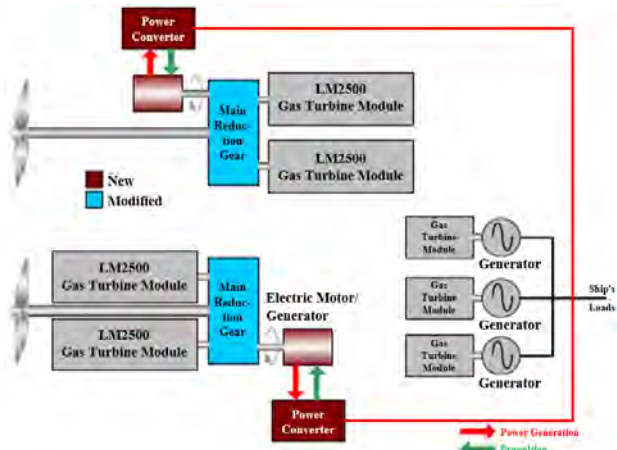


Figure 3: Hybrid electric drive system of DDG-51 class

Figure 3은 DDG-51에 적용된 HED 시스템을 나타내는데 [5], 저속에서는 가스터빈 기관 대신에 추진전동기로써 함을 추진하고, 고속에서는 가스터빈 기관의 추력을 이용하여 발전기로써 전력을 생성하여 함 내 전원을 공급할 수 있도록 구성하였다. 1,200 kW의 electric drive를 적용하면, 함속 12 kts 까지 전기추진을 할 수 있으며, 12 kts 이상의 속력에서는 가스터빈 발전기 한 대를 끄고 한 대만으로 운용하여 electric drive를 발전기로 작동하여, 연료를 절감할 수 있다. 전동기 기능만 적용 시 연간 약 4,800 배럴, 발전기 기능을 추가 적용한 경우 연간 8,900 배럴의 연료를 절감하는 것으로 연구되었다[6].

전투지원함은 상대적으로 고정밀 무기체계가 적게 탑재되고, 충격, 진동/소음 등 특수성능 조건이 엄격하지 않아 상대적으로 COTS (상용기술)를 좀 더 쉽게 적용하고 있다. 영국의 MARS 탱크와 노르웨이 LSV 함은 양방향 전력변환

의 상용기술인 PTO/PTI 기술을 적용하여 연료비를 절감할 수 있게 설계 및 건조되었다. Figure 4, Figure 5는 노르웨이 LSV함의 PTO/PTI 운용모드를 나타낸다[7]. 1 kW 추진전동기 2대를 감속기어에 연결하여 설치하고, 디젤기관 2대와 3,170 kW 함 내 디젤발전기 2대로 구성되어 있다. 함 속력 8 kts 이하의 저속에서는 PTI 모드로 함 내 발전기에 의해 생성된 전력으로 추진전동기를 작동하여 추진을 하고, 함 속력 9 kts 이상부터 최대속력 18 kts까지는 PTO 모드로 디젤기관의 추진력을 이용 전력을 생성하여 함 내 전력부하에 전력을 공급 하도록 구성되어 있다. 이때 함 내 디젤발전기 2대는 추가 전원을 공급 할 수 있다.

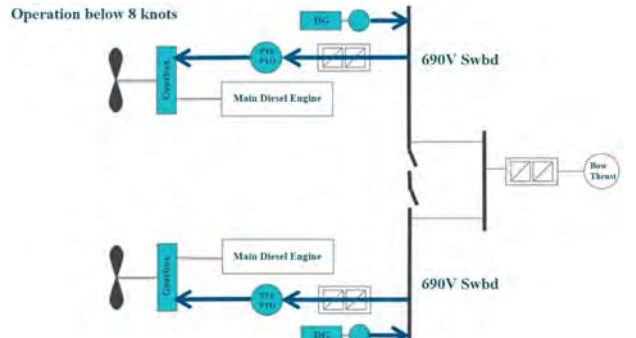


Figure 4: PTI mode of LSV

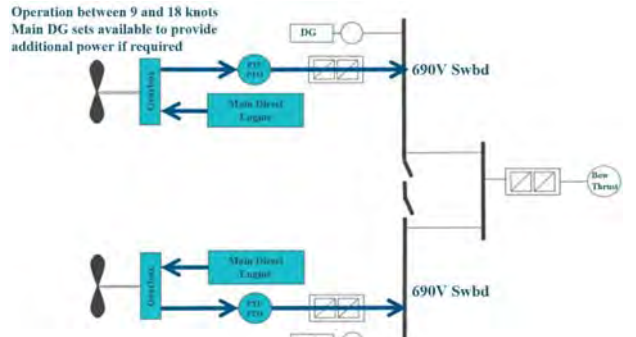


Figure 5: PTO mode of LSV

현재까지 전 세계 전투함에 양방향 전력변환을 적용한 사례는 없으나 관련 기술 개발과 연구가 지속되고 있고 민간선박 및 전투지원함에 적용 사례가 있음을 고려 시 향후 가까운 미래에 전투함에도 양방향 전력변환이 적용 될 것으로 예상된다.

3. 추진체계 시뮬레이션 모델링

3.1 시뮬레이션 목표

본 시뮬레이션에서는 국내 함정 중 복합식 전기추진체계를 적용하였거나 적용을 검토 중이며 추진체계 구성 및 운용 개념이 서로 다른 구축함, 호위함, 군수지원함 3종의 함정을 대상으로 양방향 전력변환을 적용하였을 때의 효과를 연간

연료소비량을 산출하여 확인한다. 이를 통하여 함정 추진체계별, 운용개념별 양방향 전력변환 효과를 분석한다. 또한 연료비 절감 효과 비교 분석을 통해 양방향 전력변환 효과가 높은 추진체계를 식별한다. 시뮬레이션 대상함정의 주요 사양은 DDG-51, FFX Batch-II, LSV 함정을 기준함(parent ship)으로 선정하여 공개된 자료를 활용하여 결정하되 확인 불가 자료는 유사함정의 공개된 자료를 참고하여 추정하도록 하여 각각의 가상함정에 대한 시뮬레이션을 수행하도록 한다. 시뮬레이션 대상 함정 3종의 주요 사양은 다음 표와 같다[3].

**Table 1:** Specification of Destroyer, Frigate and LSV

Specification	Destroyer	Frigate	LSV
Full load displacement	9,200 ton	3,650 ton	27,500 ton
Length overall	160 m	122 m	183 m
Top speed	31 kts	30 kts	18 kts
Propulsion system	COGAG + HED	CODLOG	CODLAD
Propulsion engines	4 Gas turbines (16 MW)	1 Gas turbine (40 MW)	2 Diesel (7.5 MW)
Generators	3 Gas turbines (3 MW)	4 Diesel (1.4 MW)	2 Diesel (3.17 MW)
Propulsion motors	2 Motors (1.5 MW)	2 Motors (1.65 MW)	2 Motors (1 MW)

**3.2 함정별 추진체계 운용 개념**

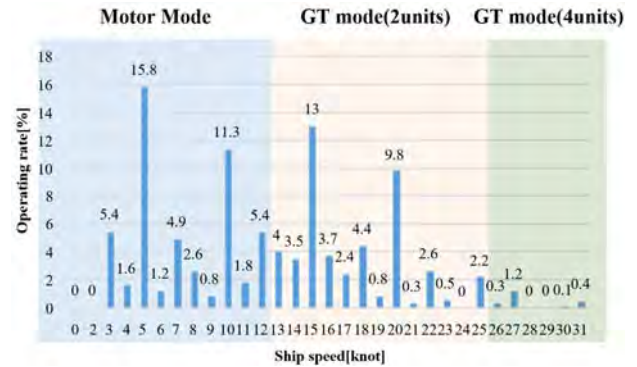
함정은 교육훈련, 보급품 조달 등을 위해 정박상태에서 대기하다가 임무 수행을 위해 해상 작전을 수행하고 작전 완료 후 기지로 복귀하여 함정 정비를 위한 시간을 가진다. 함정은 대기-작전-정비 순서로 운용되므로 함정 연간 운항(작전)일수는 연간 일수의 1/3로 추정할 수 있다.

함정 속력별 운용비율은 추진체계 운용개념을 설정하는 매우 중요한 요소인데, 미 해군에서 함정 종류별로 실제 운용함정에서 실측하여 공개한 자료를 본 연구에서 활용하도록 한다. 구축함은 높은 기동력, 장거리 항해능력을 갖추고 함대 방어를 담당하는 함정으로 고속 항해를 위해 일반적으로 가스터빈 기관을 적용한다. **Figure 6**은 대형전투함인 구축함의 속도 별 운용비율[8]을 추진체계 운용모드로 구분하여 나타낸다.

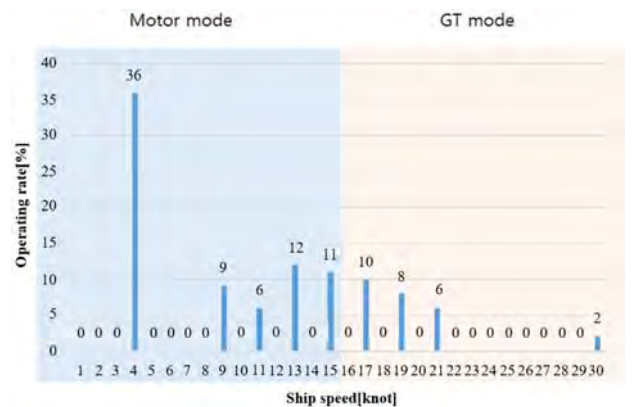
함대 호위 임무를 수행하는 중형전투함인 호위함과 타 함정이나 항구에 유류 및 탄약 등 군수품 공급을 주 임무로 하는 전투지원함인 군수지원함의 함속 별 운용비율[8]을 운용모드로 구분하여 나타내면 각각 **Figure 7**, **Figure 8**과 같다.

일반적으로 함정은 항해 중 갑작스러운 발전기 고장에 따른 함 정전에 대비하기 위해 최소 2대의 발전기를 운용한다. 양방향 전력변환 사용 시 발전기 작동 없이도 함 내

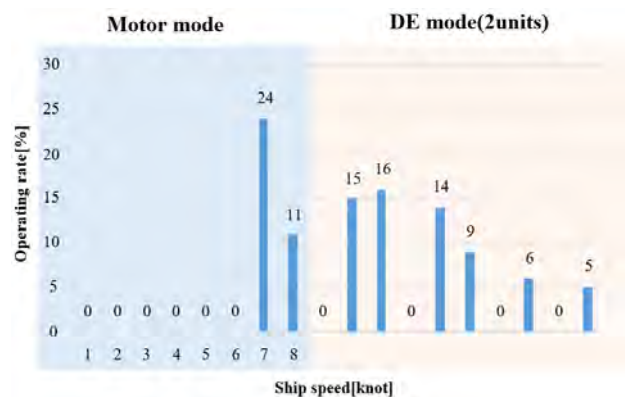
전력부하를 수용 가능함을 고려하여 양방향 전력변환 발전기 모드는 최소 1대의 발전기를 함께 운용하는 개념과 발전기 가동 없이 양방향 전력변환만으로 운용하는 개념, 두가지 발전기 운용개념을 고려하도록 한다. 운용자 입장에서 함 정전 방지를 위해 최소 1대의 발전기를 항상 운용하기를 요구할 수 있음을 고려한 운용개념이다.



**Figure 6:** Speed-time profile and operation mode of Destroyer



**Figure 7:** Speed-time profile and operation mode of Frigate



**Figure 8:** Speed-time profile and operation mode of LSV

**3.3 연간 연료소비량 산출 방안**

연간 연료소비량을 산출하기 위해 함정 설계 시 사용하는 식 (1)을 기준으로 총 연료소모율을 산출한다[9].

$$FC_{ME} = \frac{\frac{P_S \times 1.1 \times ME_{SFC}}{\beta} + (E_P \times GE_{SFC})}{P_S \times 1.1} \times \alpha \times 1.05 \quad [kg/HP \cdot hr] \quad (1)$$

여기서  $P_S$ 는 속력에 따른 함정 소요마력,  $ME_{SFC}$ 는 기관 연료소모율,  $E_P$ 는 발전기 평균 전력부하,  $GE_{SFC}$ 는 발전기 연료소모율,  $a$ 는 수정계수,  $\beta$ 는 축 전달효율을 나타낸다. 함정 소요마력에 10% 여유를 적용하여 추진기관 및 발전기 연료소모량의 합을 구한 후 설계변경에 의한 오차인 수정계수(1.02~1.04)와 함정의 기관성능 저하를 고려한 값 5%를 적용하여 함 내 총 연료소모율을 산출한다.

함정 추진을 추진기관이 아닌 추진전동기를 사용하면 연료소모량이 발전기로 합산되므로 다음과 같이 변경된 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$FC_{Motor} = \frac{\left(\frac{P_S \times 1.1}{\beta} + E_P\right) \times GE_{SFC}}{P_S \times 1.1} \times \alpha \times 1.05 \quad [kg/HP \cdot hr] \quad (2)$$

함정 추진을 추진기관으로 하며, 추진전동기를 발전기로 사용 할 경우, 즉 양방향 전력변환 상태의 연료소모량은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$FC_{Gen} = \frac{\frac{(P_S + E_{Pg}) \times 1.1 \times ME_{SFC}}{\beta} + (E_P - E_{Pg}) \times GE_{SFC}}{P_S \times 1.1} \times \alpha \times 1.05 \quad [kg/HP \cdot hr] \quad (3)$$

여기서  $E_{Pg}$ 는 함 내 소요전력 중에 양방향 전력변환 발전기 모드에서 부담하는 전력량을 나타낸다. 즉 식 (1)은 기계식 추진, 식 (2)는 전기식 추진 상태의 함 내 총 연료소모율을 나타내며, 식 (3)은 기계식 추진을 하며, 양방향 전력변환 발전기 모드 사용 시 총 연료소모율을 나타낸다.

함정 연간 운항시간은 연간 일수의 1/3로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$OpT_{year} = 365 \times 24 \times 1/3 = 2920 \quad [hour] \quad (4)$$

위에서 산출한 함 내 총 연료소모율과 연간 함정 운항 시간을 이용하여 연간 연료소비량은 식 (5)로 나타낼 수 있다. 여기서  $S_{max}$ 는 함 최대속력을 나타낸다.

$$F_{year} = OpT_{year} \times \sum_{v=1}^{S_{max}} (P_S(v) \times FC) \quad [kg] \quad (5)$$

기계식, 전기식 추진, 양방향 전력변환 발전기 모드 각각의 연간 연료소비량은 식 (6) ~ 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$F_{yearME} = OpT_{year} \times \sum_{v=1}^{S_{max}} \left( P_S(v) \times \frac{\frac{P_S(v) \times 1.1 \times ME_{SFC}}{\beta} + (E_P \times GE_{SFC})}{P_S(v) \times 1.1} \right) \times \alpha \times 1.05 \quad [kg] \quad (6)$$

$$F_{yearMotor} = OpT_{year} \times \sum_{v=1}^{S_{max}} \left( P_S(v) \times \frac{\left(\frac{P_S(v) \times 1.1}{\beta} + E_P\right) \times GE_{SFC}}{P_S(v) \times 1.1} \right) \times \alpha \times 1.05 \quad [kg] \quad (7)$$

$$F_{yearGen} = OpT_{year} \times \sum_{v=1}^{S_{max}} \left( P_S(v) \times \frac{\left[\frac{(P_S(v) + E_{Pg}) \times 1.1 \times ME_{SFC}}{\beta}\right] + (E_P - E_{Pg}) \times GE_{SFC}}{P_S(v) \times 1.1} \right) \times \alpha \times 1.05 \quad [kg] \quad (8)$$

#### 4. 추진체계 시뮬레이션

시뮬레이션은 NI사의 LabVIEW를 사용하여 프로그램을 작성하였다. 공개된 함정 소요마력 자료 및 장비 데이터에서 선형 회귀분석 및 보간법을 통해 선형적인 수식을 도출하고 이를 시뮬레이션에 적용하였다. 구축함은 DDG-51급 함속에 따른 소요마력 및 추진기관/발전기의 연료소모율 자료를 활용하여 선형적인 수식을 도출하여 시뮬레이션을 수행하였다[10][11]. 호위함과 군수지원함도 공개된 유사함정 자료를 활용하여 동일한 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. 호위함의 추진기관을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 연료소모율 그래프는 Figure 9와 같다.

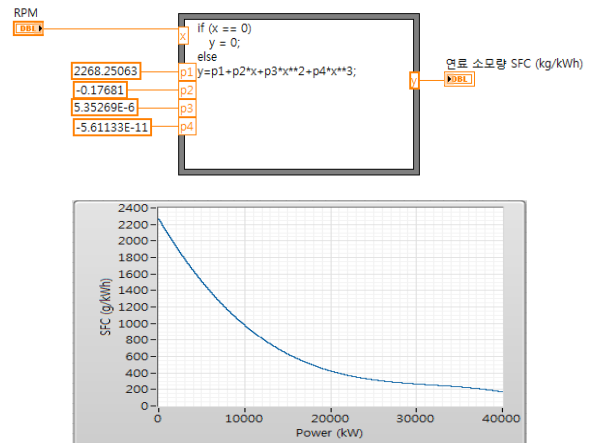


Figure 9: Engine SFC of Frigate

호위함의 발전기를 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 연료소모율 그래프는 Figure 10과 같다.

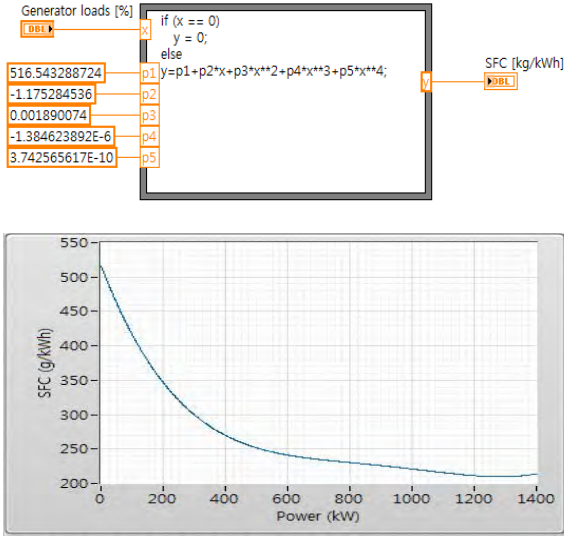


Figure 10: Generator SFC of Frigate

호위함의 함속에 따른 소요마력을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 소요마력 그래프는 Figure 11과 같다.

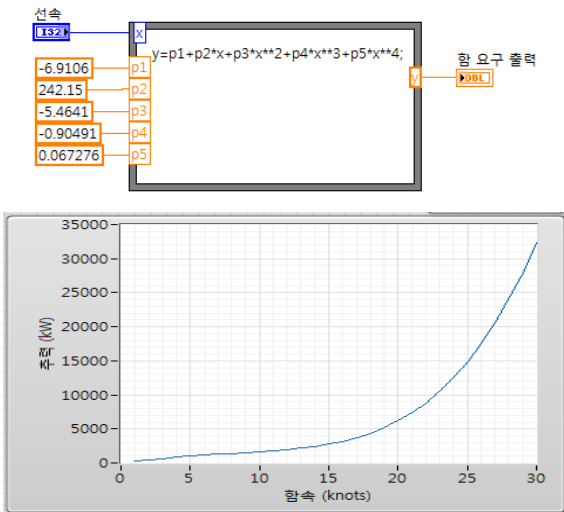


Figure 11: Required shaft propulsion power of Frigate

산출된 모델을 기반으로 LabVIEW 프로그램을 통해 각 함정 종류 및 운용개념 별 연간 연료소비량을 산출한다.

### 5. 시뮬레이션 결과

양방향 전력변환 적용에 따른 연료 절감효과 확인을 위해 함속별 운항 비율에 따른 연간 연료소비량을 분석한다. 다음 비교 그래프에서 막대그래프는 운항 속도별 연간 연료소비량을 나타내며, 위의 꺾은선그래프는 연료소비량의 차이를 나타낸다. 기존 기계식추진체계(COGAG)에 추진전동기를 추가 적용한 구축함의 운항 속도별 연간소비량을

나타낸 Figure 12에 기계식 모드(Mac) 대비 추진전동기모드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG)의 연간 연료소비량을 비교하였다.

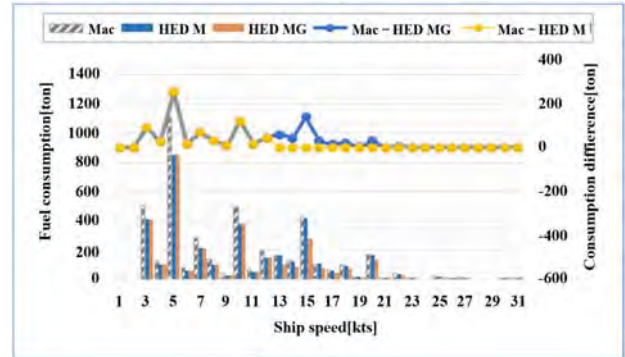


Figure 12: Annual fuel consumption by speed of Destroyer

구축함은 가스터빈발전기를 사용하는 특성에 따라 저속에서 높은 연료소비량을 보이며 추진전동기모드 적용을 통해 약 250톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다. 또한 발전기모드를 추가로 적용하였을 때는 13~16 kts 사이에서 연료 절감량이 많은 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 추진전동기 모드 적용 시 기계식 대비 연료소비량이 현저히 줄어들며, 발전기 모드 추가 적용을 통해 연료소비량이 더욱 줄어든 것을 알 수 있다.

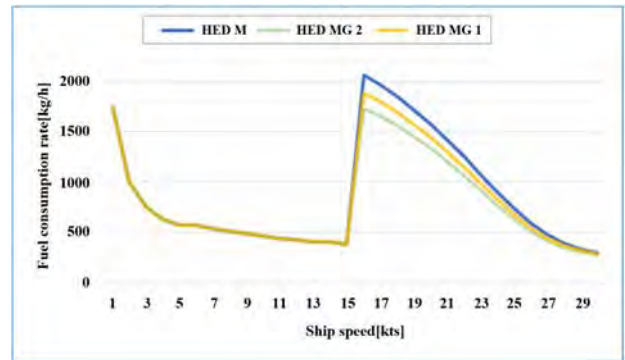


Figure 13: Fuel consumption rate by speed of Frigate

Figure 13은 호위함의 추진전동기모드, 양방향 전력변환 발전기모드의 함 속도별 연료소모율을 나타낸다. 발전기모드는 발전기 1대를 운용하는 경우(HED MG 1)와 발전기 가동 없이 양방향 전력변환 발전기 모드만 사용하는 경우(HED MG 2) 두 가지를 고려하였다. 디젤발전기가 저 부하에서 연료소모율이 높은 특성에 따라 약 5 kts 이하에서는 높은 연료소모율을 나타내며, 16 kts에서 급격히 연료소모율이 상승하는데 이는 대용량의 가스터빈기관으로 함을 추진하기 때문이며, 함 속력이 증가하면서 추진부하 증가에 따라 연료소모율이 떨어지는 특성을 보여주고 있다.

Figure 14는 호위함의 함 속도별 운항비율을 고려한 속도별 연간 연료소비량을 나타내는데 발전기모드가 작동하는

16 kts부터 연료절감 효과가 나타나며 발전기 가동 없이 양방향 전력변환 발전기 모드만 사용하는 경우 연료절감 효과가 더 높은 것을 확인 할 수 있다.

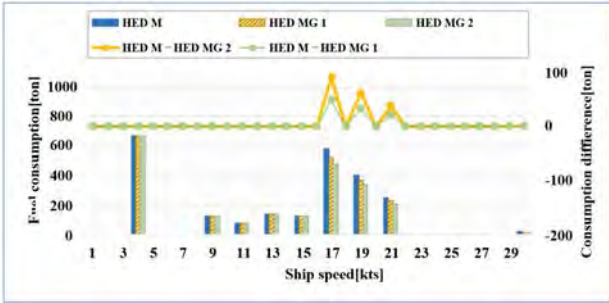


Figure 14: Annual fuel consumption by speed of Frigate

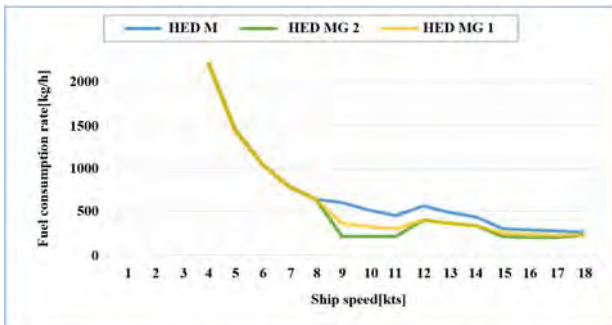


Figure 15: Fuel consumption rate by speed of LSV

Figure 15는 군수지원함의 추진전동기모드, 양방향 전력변환 발전기모드의 함 속도별 연료소모율을 나타낸다. 저부하에서 연료소모율이 높은 대용량 디젤발전기의 특성에 따라 6 kts 이하 낮은 속도에서는 연료소모율이 높으며, 대용량의 전력이 소모되는 해상보급장치를 운용하는 12~14 kts에서 연료소모율이 상승하는 것을 알 수 있다. Figure 16은 군수지원함의 함 속도별 운항비율을 고려한 속도별 연간 연료소비량을 나타내는데 발전기모드가 작동하는 9 kts부터 연료절감 효과가 나타나며 10~11 kts에서 연료절감 효과가 높은 것 알 수 있고, 발전기 가동 없이 양방향 전력변환 발전기 모드만 사용하는 경우 연료절감 효과가 더 높은 것을 확인 할 수 있다.

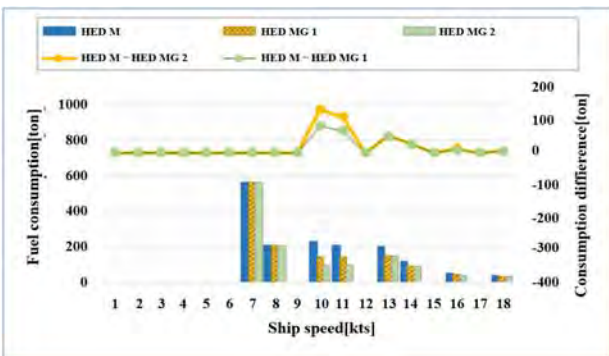


Figure 16: Annual fuel consumption by speed of LSV

구축함, 호위함, 군수지원함의 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따른 연간 연료절감량은 Figure 17에 나타내었다. 가스터빈기관과 가스터빈발전기를 사용하는 구축함의 경우 연간 약 360톤으로 연료절감량이 가장 많고, 대용량의 디젤기관과 디젤발전기를 적용한 군수지원함도 연간 약 240톤의 연료를 절감하며, 호위함의 경우 상대적으로 연료절감 효과는 낮으나 연간 약 100톤의 연료를 절감함을 알 수 있다. 또한 발전기 가동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만을 사용할 경우 호위함의 경우 연간 약 190톤, 군수지원함의 경우 연간 약 340톤의 연료를 절감하여 연료 절감 효과는 더 높은 것을 알 수 있다.

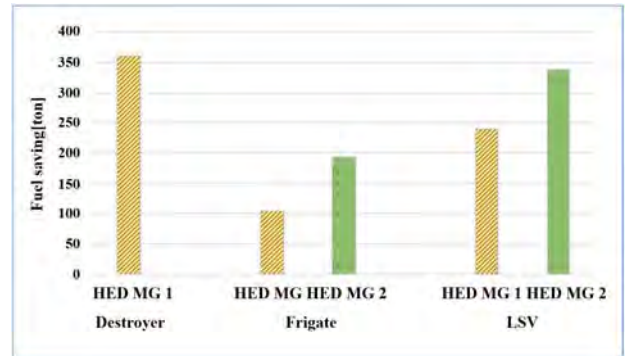


Figure 17: Annual fuel saving in Bidirectional power conversion

## 6. 결 론

본 연구에서는 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환 적용에 따른 연료 절감 효과 분석을 위해 함 속도별 운용비율, 연간 함 운용시간, 발전기 운용개념 등을 고려하여 구축함, 호위함 및 군수지원함의 연간 연료소비량을 알아 보았다. 복합식 전기추진체계 함정에 양방향 전력변환 적용 시 구축함의 경우 연간 약 360톤, 호위함의 경우 연간 약 100톤, 군수지원함의 경우 연간 약 240톤의 연료절감 효과가 있고, 발전기 사용 없이 양방향 전력변환 발전기 모드만 사용 시 호위함의 경우 연간 약 190톤, 군수지원함의 경우 연간 약 340톤의 연료를 절감하여 더 많은 연료절감 효과가 있음을 확인 하였다. 이와 같은 연간 연료소비량 분석을 통해 복합식 전기추진체계를 탑재한 함정에 양방향 전력변환을 추가 적용 시 함정의 에너지 효율을 향상 시킬 수 있음을 확인 할 수 있다. 일반적으로 함정 연료소비량은 함 속도별 운용비율, 추진기관/발전기 연료소모율, 추진체계 구성, 추진체계/발전기 운용개념 등에 따라 변경되기에 양방향 전력변환을 함정에 적용하여 최상의 연료절감효과를 얻기 위해서는 이에 대한 최적화가 함께 고려되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 2018년 대한민국 교육부와 한국연구재단(NRF-2018R1D1A1B07049361)의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

### Author Contributions

Methodology, D. I. Choi; Conceptualization, J. S. Oh and D. I. Choi; Software, H. S. Lee; Investigation, D. I. Choi; Writing—Original Draft Preparation, D. I. Choi and H. S. Lee; Visualization, D. I. Choi; Data Curation, D. I. Choi; Writing—Review & Editing, H. S. Lee; Resources, J. S. Oh and D. I. Choi; Supervision, J. S. Oh; Validation, J. S. Oh; Project Administration, J. S. Oh.

Journal, vol. 106, no. 5, pp. 88-99, 2009.

- [11] S. H. Ryu, S. Y. Jung, and J. S. Oh, “A study of the hybrid electric drive generating mode in naval ships,” *Journal of the Korean Society of Maritime Engineering*, vol. 39, no. 9, pp. 967-972, 2015 (in Korean).

### References

- [1] D. I. Choi and S. I. Park, “A study on technology development plan of naval ship electric propulsion system,” *Proceedings of Naval Ship Technology & Weapon System Seminar*, pp. 223-227, 2013 (in Korean).
- [2] Korean Statistical Information Service, [http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=392&tblId=DT\\_AA123&vw\\_cd=MT\\_ZTITLE&list\\_id=392\\_39201\\_12&seqNo=&lang\\_mode=ko&language=kor&obj\\_var\\_id=&itm\\_id=&conn\\_path=MT\\_ZTITLE](http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=392&tblId=DT_AA123&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=392_39201_12&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE), Accessed December 7, 2018.
- [3] Jane's Fighting Ship, <https://ihsmarkit.com/products/janes-fighting-ships.html>, Accessed February 10, 2019.
- [4] T. J. McCoy and A. Mohtashamian, “Commercially derived hybrid electric drive (HED) systems for efficiency and power generation on naval ships,” 2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), pp.234-238, 2015.
- [5] D. Alexander, J. Bravo, and Y. Fleytman, “Integrated main reduction gears for hybrid drive surface ship application,” *Proceedings of IEEE*, pp. 345-352, 2011.
- [6] T. J. McCoy and A. Mohtashamian, “Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships,” *Proceedings of IEEE*, pp. 515-520, 2009.
- [7] S. J. Lee and I. Wakeling, “Logistics support vessel HNoMS *maud*,” 2014. [Online]. Available: <http://www.sms1835.no/arkiv/2014-08-27/%20Logistic%20Support%20Vessel%20by%20Director%20Lee%20Sung%20Jin.pdf>
- [8] NAVSEA, “Calculation of surface ship annual energy usage, annual energy cost, and fully burdened cost energy,” *Design Data Sheet 200-2*, 07 August, 2012.
- [9] ROK Navy, “Criteria for calculation of fuel capacity of endurance,” *Regulation of naval ship design and building*, 2004.
- [10] S. Tsai, B. Hopkins, and R. Stenson, “Comparison of powering performance between DDG-51 and conventional combatant hull forms,” *Naval Engineers*