



工學博士 學位論文

함정용 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환에 의한 연료절감 효과

A study on the fuel saving effect of bidirectional power conversion in hybrid electric propulsion system of naval ships

指導教授 吳 珍 錫

2020年 2月

韓國海洋大學校 大學院

기관공학과

崔 東 一

本 論文을 崔東一의 工學博士 學位論文으로 認准함



2019 年 12 月 30 日

韓國海洋大學校 大 學 院

목

차

List of Tables	iv
List of Figures	•• V
Nomenclatures	ix
Abstract	• xi

1. 서 론

1.1	연구	배경	및	필요성	3	1
1.2	연구	내용	및	구성		3

2. 함정 추진체계 적용 경향

2.1 함정 추진체계 특성	5
2.2 함정 추진체계 종류	7
2.3 전기추진체계 함정 적용 현황 및 경향	12
2.3.1 최근 함정 전기추진체계 적용 현황	12
2.3.2 함정 저기추진체계 적용 경향	14

3. 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환

 3.1 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환 개념
 18

 3.1.1 복합식 전기추진체계 구성
 18

 3.1.2 양방향 전력변환 개념
 20

Collection @ kmou

- i -

- 3.2 양방향 전력변환 효과 및 적용 사례 25 3.2.1 양방향 전력변환 효과 25
 - 3.2.2 양방향 전력변환 함정 적용 사례 30

4. 함정 연료 소비량 산출 알고리즘

4.1 함정 연료 소비량 산출 방법	32
4.1.1 총 연료소비율 산출 방법	32
4.1.2 축 전달효율 산정	37
4.1.3 함정 소요추진력 추정 방법	38
4.2 함정 연료 소비량 산출 알고리즘	39
. 양방향 전력변환 시뮬레이션	

5. 양방향 전력변환 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 개요	•••• 43
5.2 모델링 대상 함정	····· 45
5.3 추진체계 구성 및 운용 모드	····· 47
5.3.1 함정 추진체계 운용개념	····· 47
5.3.2 함정별 추진체계 구성 및 운용 모드	····· 49
5.3.2.1 이지스구축함	····· 49
5.3.2.2 호위함	····· 55
5.3.2.3 군수지원함	60
5.4 추진체계 모델링	66
5.4.1 이지스구축함	66
5.4.2 호위함	69
5.4.3 군수지원함	····· 72
5.5 시뮬레이션 분석	····· 76
5.5.1 연료비 절감 효과	····· 76
5.5.1.1 이지스구축함	····· 76
5.5.1.2 호위함	80
5.5.1.3 군수지원함	86



6. 결론





List of Tables

Table 1 Electric propulsion system	. 8
Table 2 The status of combat ship electric propulsion system	13
Table 3 Comparison table of AFE and DFE	24
Table 4 Load of generators and propulsion engines	40
Table 5 Specification of parent ships	46
Table 6 Propulsion operation of the aegis destroyer	54
Table 7 Propulsion operation of the frigate	59
Table 8 Propulsion operation of the auxiliary oiler	64
Table 9 Specification of aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler	65
Table 10 SFC of diesel engine and generator for auxiliary oiler	72



List of Figures

Fig.	1]	Fuel consumption of US navy and DDG-51 aegis destroyer	1
Fig.	2	Energy saving strategy of US navy	2
Fig.	3]	Research contents	4
Fig.	4 (Consideration factors for selecting propulsion system	6
Fig.	5 I	ntegrated propulsion system of Type-45	8
Fig.	6 (CODLOG system of Aquitaine class	9
Fig.	7 (CODLAG system of Bergamini class	10
Fig.	8 (CODLAG propulsion system of Type-23	13
Fig.	9 7	The status of combat ship electric propulsion system	14
Fig.	10	Relationship between the average price of oil and construction	
		contract year of electric propulsion ship	15
Fig.	11	Construction contract year of hybrid electric propulsion ship	16
Fig.	12	Full load displacement of hybrid electric propulsion ship	17
Fig.	13	Annual new building contract	17
Fig.	14	Separated power system	18
Fig.	15	Integrated power System	19
Fig.	16	Hybrid propulsion System	20
Fig.	17	Sensor and weapon system power demands	21
Fig.	18	Ship high power demands	21
Fig.	19	Diode front end drive	22
Fig.	20	Active front end drive	23
Fig.	21	Power take out and power take in	24

Fig.	22	Specific fuel consumption of LM2500	25
Fig.	23	Specific fuel consumption of 501-K34	25
Fig.	24	Propulsion mode of DDG-51 operation as a function of speed	26
Fig.	25	Operation time of DDG-51 at each speed	27
Fig.	26	HED system of DDG-51 class	27
Fig.	27	Motoring operation	28
Fig.	28	Generating operation	28
Fig.	29	Fuel savings per ship for motoring-only operation	29
Fig.	30	Fuel savings per ship for motoring-generating operation	29
Fig.	31	PTI mode of LSV	31
Fig.	32	PTO mode of LSV	31
Fig.	33	Estimation process of fuel consumption rate	33
Fig.	34	Efficiency of electric propulsion system	37
Fig.	35	Estimation process of brake horsepower	38
Fig.	36	Algorithm of fuel consumption calculation for naval ships	39
Fig.	37	Load sharing algorithm of bidirectional power conversion	42
Fig.	38	Process of simulation	44
Fig.	39	Functional flowchart of naval ship propulsion system	48
Fig.	40	Propulsion system of the aegis destroyer	49
Fig.	41	Speed-time profile of DDG-51 class	51
Fig.	42	Speed-time profile A by operation mode of aegis destroyer	52
Fig.	43	Speed-time profile B by operation mode of aegis destroyer	52
Fig.	44	Operation of generator and propulsion engine of the aegis destroyer	53
Fig.	45	Propulsion system of the frigate	55
Fig.	46	Speed-time profile of FFG-7 class	56
Fig.	47	Speed-time profile A by operation mode of frigate	57
Fig.	48	Speed-time profile B by operation mode of frigate	57
Fio	49	Operation of generator and propulsion engine of the frigate	58



Fig.	50	Propulsion system of the auxiliary oiler	60
Fig.	51	Speed-time profile of AOE-6 class	61
Fig.	52	Speed-time profile A by operation mode of auxiliary oiler	62
Fig.	53	Speed-time profile B by operation mode of auxiliary oiler	62
Fig.	54	Operation of generator and propulsion engine of the auxiliary oiler $\cdot\cdot$	63
Fig.	55	SFC of engine in aegis destroyer	67
Fig.	56	SFC of generator in aegis destroyer	68
Fig.	57	Required shaft power of aegis destroyer	68
Fig.	58	SFC of engine in frigate	69
Fig.	59	SFC of generator in frigate	70
Fig.	60	Required shaft power of frigate	71
Fig.	61	SFC of engine in auxiliary oiler	73
Fig.	62	SFC of generator in auxiliary oiler	74
Fia	63	Required shaft power of auxiliary oiler	75
ı ıg.			
Fig.	64	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and	
Fig.	64	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler	75
Fig. Fig.	64 65	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler	75 76
Fig. Fig. Fig.	64 65 66	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	75 76 77
Fig. Fig. Fig. Fig.	64 65 66 67	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	75 76 77 77
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	64 65 66 67 68	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler Fuel consumption rate by speed of aegis destroyer Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile A Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B	75 76 77 77 78
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	64 65 66 67 68 69	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler Fuel consumption rate by speed of aegis destroyer Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile A Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B	75 76 77 77 78 79
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	 64 65 66 67 68 69 70 	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler Fuel consumption rate by speed of aegis destroyer Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile A Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B Fuel consumption and fuel saving of aegis destroyer Profile A and B of aegis destroyer	75 76 77 77 78 79 80
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	 64 65 66 67 68 69 70 71 	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	75 76 77 78 79 80 81
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	 64 65 66 67 68 69 70 71 72 	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	75 76 77 78 79 80 81 81
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	 75 76 77 78 79 80 81 81 82
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler Fuel consumption rate by speed of aegis destroyer Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile A Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B Fuel consumption and fuel saving of aegis destroyer Profile A and B of aegis destroyer Fuel consumption rate by speed of frigate Annual fuel consumption by speed of frigate Annual fuel consumption by speed of frigate-profile A Fuel consumption of frigate-profile B	 75 76 77 78 79 80 81 81 82 83
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 	Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler	 75 76 77 78 79 80 81 81 82 83 84

Fig.	77	Annual fuel saving by load sharing ration of a propulsion engine	
		and a generator for frigate	85
Fig.	78	Fuel consumption rate by speed of auxiliary oiler	87
Fig.	79	Annual fuel consumption by speed of auxiliary oiler-profile A \cdots	87
Fig.	80	Annual fuel consumption by speed of auxiliary oiler-profile B	88
Fig.	81	Fuel consumption of auxiliary oiler-profile A & B	88
Fig.	82	Annual fuel consumption and fuel saving of auxiliary oiler	90
Fig.	83	Profile A and B of auxiliary oiler	91
Fig.	84	Annual fuel saving by load sharing ration of propulsion engines a	nd
		a generator for auxiliary oiler	91
Fig.	85	Annual fuel saving in bidirectional power conversion	93
Fig.	86	Reduction of generator operating time in aegis destroyer	94
Fig.	87	Reduction of generator operating time in frigate	95
Fig.	88	Reduction of generator operating time in auxiliary oiler	96





Nomenclatures

α	: 수정계수
β	: 축 전달효율
γ	: 추진전동기 및 전력변환기 효율
P_E	: 24시간 평균 전력부하
P_{EC}	: 항해 중 함내 소요전력
P_{EG}	: 발전기모드에서 부담하는 함내 소요전력
P_{EP}	: 추진기관 및 보조기기에 소요되는 전력
P_P	: 함정 소요추진력
FC	: 총 연료소비율
$F_{SY}(v)$: 함 속력별 연료소비량
F_{year}	: 연간 연료소비량
GE _{out}	: 발전기 정격출력
GE _{SFC}	: 발전기 연료소비율
k	: 추진기관에서 부담하는 함내 소요전력 비율
ME _{out}	: 추진기관 정격출력
ME _{SFC}	: 추진기관 연료소비율
n_{GE}	: 운용중인 발전기 대수
n_{ME}	: 운용중인 추진기관 대수
$T_{OP}(v)$: 함 속력에 따른 운용시간
v	: 함정 속력
v_{max}	: 함정 최대속력
AAW	: Anti Air Warfare
AFE	: Active Front End
ASW	: Anti Subsurface Warfare
ASuW	: Anti Surface Warfare
CODAD	: COmbined Diesel And Diesel
CODAG	: COmbined Diesel And Gas turbine
CODELOD	: COmbined Diesel ELectric Or Diesel
CODLAG	: COmbined Diesel eLectric And Gas turbine
CODLOG	: COmbined Diesel eLectric Or Gas turbine

CODOE :	COmbined Diesel Or Electric			
COGAG :	COmbined Gas turbine And Gas turbine			
COGLAG :	COmbined Gas turbine eLectric And Gas turbine			
COTS :	Commercial Off The Shelf			
CPP :	Controllable Pitch Propeller			
DDS :	Design Data Sheet			
D/E :	Diesel Engine			
DFE :	Diode Front End			
D/G :	Diesel Generator			
G/T :	Gas Turbine			
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistor			
LSV :	Logistic Support Vessel			
LVDC :	Low Voltage Direct Current			
MTBF :	Mean Time Between Failure			
MTTR :	Mean Time To Repair			
HED C:	Hybrid Electric Drive			
ILS :	Integrated Logistic Support			
PF :	Power Factor			
PTO/PTI :	Power Take-Off/Power Take-In			
PWM :	Pulse Width Modulation			
RAS :	Replenishment At Sea			
SEWIP :	Surface Electronic Warfare Improvement Program			
SFC :	Specific Fuel Consumption			
SSL :	Solid State Laser			
THD :	Total Harmonic Distortion			
URN :	Underwater Radiated Noise			
VFD :	Variable Frequency Drive			

A study on the fuel saving effect of bidirectional power conversion in hybrid electric propulsion system of naval ships

Choi, Dongil

Department of Marine Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Recently, the navies of many countries around the world as well as the U.S. and the U.K. have made efforts to apply hybrid electric propulsion system and Integrated electric propulsion system as energy-saving system to naval ships in order to reduce the life cycle cost of ships in line with the reduction of defense budgets and continued high oil prices.

In particular, the U.S. and European navies are studying ways to reduce the cost of ship fuel by applying Bidirectional power conversion technology to naval ships equipped with hybrid electric propulsion system.

There are no domestic and foreign cases of Bidirectional power conversion technology being applied in combat ships. However, the U.K. and Norway Logistic support vessels as combat support ships, which are highly installed with commercial equipment, are equipped with a hybrid



electric propulsion system with Bidirectional power conversion technology to save fuel.

Hybrid electric propulsion system has been applied to naval ships, such as Frigate and Logistic support vessel in Korea, but Bidirectional power conversion is not applied and is used only as a motor at low speeds. Therefore, it is necessary to study the energy savings effect of the application of Bidirectional power conversion on hybrid electric propulsion system in order to apply Bidirectional power conversion to domestic naval ships in the future.

In this study, the effects of Bidirectional power conversion on the hybrid electric propulsion system for Aegis destroyer, Frigate and Logistic support vessel, which are the representative naval ships applied with the hybrid electric propulsion system, were analyzed. The annual fuel saving effect and the maintenance cost reduction effect were analyzed for each naval ship by considering the operational profile of the ship, the annual operating time of the ship, and the concept of operation of the generator.

Although the effects vary slightly depending on the type of the propulsion system, the ship operation profile, and the operation concept of the generator, it has been confirmed that the effect of saving fuel and reducing maintenance cost is very high when applying the Bidirectional power conversion on the hybrid electric propulsion system.

KEY WORDS: Hybrid electric propulsion system, Bidirectional power conversion, Fuel saving effect, Naval ship



제1장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 국방예산 감축에 대한 요구 증가와 지속되는 고유가에 따라 미국 및 유 럽 해군은 함정 운용유지비를 절감하기 위해 에너지 절감형 추진체계인 복합식 전기추진체계 및 완전 전기추진체계를 함정에 적용하는 노력을 지속하고 있다. 미 해군의 경우 Fig. 1과 같이 미 해군 전체 연료 사용량의 약 40%를 함정에서 소비하며, 함정 연료 사용량의 약 40%를 DDG-51급 이지스구축함이 소비하고 있다[1]. DDG-51급 이지스구축함은 가스터빈 엔진 4대와 가스터빈 발전기 3대 를 운용하기 때문에 타 함정 대비 연료소비량이 높아서 미 해군에서는 함정 연 료비 절감을 위해 다양한 방안에 대해 연구 및 시험을 수행하고 있다.



Fig. 1 Fuel consumption of US navy and DDG-51 aegis destroyer

Fig. 2는 함정 에너지 절감을 위한 미 해군의 기술 개발 전략과 현재 개발 중 인 기술들을 나타낸다[1]. DDG-51급 이지스구축함의 추진체계인 COGAG 추진 체계에 추가 설치하기 위한 HED(Hybrid Electric Drive) 시스템은 연료를 획기 적으로 절감하기 위해 저속에서는 추진전동기로 사용하고 고속에서는 발전기로 사용하는 양방향 전력변환 기술을 적용하여 시험 중에 있다.

현재 전투함 중에는 양방향 전력변환 기술을 적용한 국내외 사례는 없으나, 상용기술이 상대적으로 많이 적용된 전투지원함인 영국 및 노르웨이 군수지원 함 등에는 양방향 전력변환 기술을 적용한 복합식 전기추진체계를 탑재하여 연 료를 절감하고 있다. 양방향 전력변환 기술은 복합식 전기추진체계를 적용한 함정에 적용할 수 있는 기술이므로, 최근 전 세계 전투함에 복합식 전기추진체 계가 확대 적용되고 있고 관련 기술개발과 연구가 지속되고 있음을 고려 시 향 후 양방향 전력변환 기술은 전투함에도 확대 적용될 것으로 예측된다.



Fig. 2 Energy saving strategy of US navy

민간선박의 경우 PTO/PTI(Power Take-Off/ Power Take-In)으로 알려진 양방 향 전력변환 기술이 이미 상용화되어 다수의 선박에 적용되고 있는데, 연료비 절감과 국제 환경규제 강화에 따른 대기오염 감소 요구 증대에 따라 양방향 전 력변환 기술은 지속적으로 발전할 것이며, 확대 적용될 것으로 보인다. 최근 국내에도 호위함, 군수지원함 등의 함정에 복합식 전기추진체계가 적용 되었으나 양방향 전력변환은 적용되지 않고 있고 저속에서 전동기로만 사용되 고 있다. 또한, 양방향 전력변환을 함정에 적용하기 위한 국내 연구도 미흡한 실정이다.

따라서 향후 국내 함정에 양방향 전력변환을 적용하기 위해 복합식 전기추진 체계를 탑재한 함정에 양방향 전력변환 적용에 따른 연료비 절감량, 정비비용 감소 등을 분석하여 양방향 전력변환을 통한 에너지 절감 효과를 연구할 필요 가 있다.

본 연구에서는 복합식 전기추진체계를 적용한 세 가지 대표 함정, 대형전투 함인 이지스구축함, 중형전투함인 호위함 및 전투지원함인 군수지원함에 대해 함 운용 프로파일을 고려하여 복합식 전기추진체계에 양방향 전력변환 적용에 따른 연간 연료소비 절감량과 발전기 정비비용 감소 효과를 LabVIEW를 기반 으로 한 시뮬레이션을 통하여 분석하여 함정 복합식 전기추진체계에 양방향 전 력변환 적용에 따른 효과를 확인하고 연료비 절감 방안을 제시하고자 한다.

1.2 연구 내용 및 구성

본 논문은 총 6개의 장으로 Fig. 3과 같이 구성되었다.

1장은 본 연구의 연구 배경 및 필요성과 연구 내용 및 구성을 기술한다.

2장은 최근 함정의 추진체계 적용 경향을 분석하기 위해 함정 추진체계의 특 성, 함정 추진체계의 종류, 전기추진체계 함정의 적용현황 및 경향에 대해 기술 한다.

3장에서는 양방향 전력변환 개념에 대해 정의하고 복합식 전기추진체계의 구 성에 대해 확인하며, 복합식 전기추진체계에 양방향 전력변환 적용에 따른 연 료비 절감 효과 연구 사례와 국내외 전투함, 전투지원함 및 민간선박에 대한 양방향 전력변환 적용 사례를 기술한다.



Fig. 3 Research contents

4장에서는 함정 추진체계 방식별 연료 소비량 산출 방법과 함정 소요추진력 추정방법을 기술하고 함정 연료 소비량 산출 알고리즘을 제시한다.

5장에서는 복합식 전기추진체계 함정에 양방향 전력변환을 적용 시 효과를 분석하기 위해 모델링 대상 함정을 선정하고, 모델링 대상 함정별 추진체계 운 용개넘, 추진체계 구성 및 복수의 추진체계 운용 프로파일을 설정한다.

또한, 함정별 추진체계를 모델링하여 시뮬레이션을 수행하고 함정별, 운용프 로파일별, 발전기모드별 양방향 전력변환 적용에 따른 연간 연료비 절감효과와 발전기 정비비용 절감효과를 분석하여 제시한다.

마지막으로 6장에서는 연구의 결과와 결론을 제시한다.

Collection @ kmou

- 4 -

제 2 장 함정 추진체계 적용 경향

2.1 함정 추진체계 특성

함정 추진체계는 함정을 운용하기 위한 시스템으로 추진기관(디젤엔진, 가스 터빈 등), 감속기어, 추진기, 축계 및 추진제어/감시계통 등으로 구성된다. 함정 설계단계에서 추진체계는 함정의 제원 및 성능에 미치는 영향이 크기 때문에 일반적으로 기본설계 3개월 이내 해당 함정의 군 요구조건에 부합하는 최적의 추진체계를 선정하도록 하고 있다.

과거 함 속력과 중량 요구조건 충족 여부는 함정 추진체계 선정 시 중요한 고려요소이었다. 최대속력과 순항속력을 만족하고, 함 중량 요구조건 내에 추진 체계 설계가 가능하도록 고출력 저중량의 가스터빈과 디젤엔진 조합을 검토하 여 최적의 추진체계를 선정하였다. 또한, 과거에는 감속기어 관련 기술 개발이 미흡하여 전투함 추진체계는 디젤엔진과 가스터빈을 조합한 CODOG 추진체계 가 대부분 적용되었다. 따라서 추진체계 선정 과정이 현재보다 상대적으로 간 단하였고, 함 속력, 중량 요구조건과 함께 배치성, 내 충격 성능, 기존 함정과의 호환성, 획득비용 등을 고려하여 추진체계를 선정하였다.

근래에는 감속기어 관련 기술과 전기추진체계 기술의 발전으로 다양한 추진 체계가 적용되고 있는데, 최근 함정은 함 속력과 중량 요구조건과 같은 기본성 능 요구조건 이외에도 함 생존성, 수중방사소음, 연료비, 정비비용을 포함한 운 용유지비용 절감, 친환경성, 종합군수지원(ILS, Integrated Logistic Support), 저 소음/진동특성, 미래전력 가용성, 운용성 등을 종합적으로 고려하여 최적의 추 진체계를 선정하고 있다. 함 생존성 향상을 위해 장비 이중화, 분산 배치 등을 고려하고, 적 잠수함에 의해 쉽게 탐지되지 않도록 추진기관에 의해 발생되는 수중방사소음이 적은 추진체계를 우선 고려하고 있다. 또한, 민간선박에 주로 고려되던 연료비 절감 및 친환경성도 함정 추진체계 선정에 고려되고 있는데, 고 유가, 국방비 절감 압박, 국제적인 환경오염 규제 강화가 그 원인이라 할 수 있다. 지속적으로 함정 추진체계를 정상 운용 및 정비할 수 있도록 종합군수지



원 요소도 추진체계 선정 시 중요하게 고려되고 있다. 함내 정비뿐만 아니라 정비창에서 정비를 수행할 때 문제가 있어 적기에 수리되지 못할 경우 이는 함 운용에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 또한, 기관실에서 근무하는 함 승조 원의 편의성 증대를 위해 추진기관에 폐쇄장치(enclosure) 설치 등을 통해 소음 /진동 감소를 고려하고, 체계 친숙성, 조종단계 단순성, 효용성 등의 운용성과 미래전력 가용성도 추진체계 선정 시 고려하고 있다.

따라서 함정 추진체계는 함 속력 충족 또는 연료비 절감 효과 등과 같이 단 편적인 특성만으로 특정 함정에 적합한 추진체계라고 판단할 수 없으며, Fig. 4 와 같이 다양한 고려 요소를 종합적으로 판단하여 최적의 추진체계를 선정하여 야 한다.



Fig. 4 Consideration factors for selecting propulsion system

2.2 함정 추진체계 종류

함정의 추진체계는 크게 기계식 추진체계와 전기추진체계로 분류할 수 있다. 기계식 추진체계는 가스터빈, 디젤기관 등의 엔진의 동력을 추진기(프로펠러)에 전달하여 함정을 추진하는 방식으로 CODAD(COmbined Diesel And Diesel), CODOG(COmbined Diesel Or Gas turbine), CODAG(COmbined Diesel And Gas turbine), COGAG(COmbined Gas turbine And Gas turbine) 등의 종류가 있다.

전기추진체계는 함정의 주추진기가 최소 1대 이상의 추진전동기에 의해 전기 적으로 동력을 얻으며, 전력변환장치에 의해 추진기에 전달되는 동력을 제어할 수 있는 체계로 정의 된다[2].

전기추진체계는 함정의 전 속력 범위에서 전기추진으로 추진력을 얻는 완전 전기추진 방식과 일정속력 이상에서는 가스터빈엔진 또는 디젤엔진 같은 기계 식 추진기관을 병행 설치하여 운용하는 복합식(Hybrid) 전기추진 방식으로 구 분할 수 있다. 복합식 전기추진방식은 디젤발전의 전기식과 가스터빈엔진의 기 계식을 혼합한 CODLOG(COmbined Diesel eLectric Or Gas turbine)와 CODLAG(COmbined Diesel eLectric And Gas turbine), 디젤발전의 전기식과 디젤엔진의 기계식을 혼합한 CODOE(COmbined Diesel Or Electric), 가스터빈 발전의 전기식과 가스터빈엔진의 기계식을 혼합한 COGLAG(COmbined Gas turbine eLectric And Gas turbine) 등으로 구분할 수 있다. 함정에 적용된 대표 적인 전기추진체계는 Table 1과 같다.

완전전기추진체계는 추진계통을 포함하여 함 내 소요되는 모든 동력을 전기 로 공급하는 체계이다. 추진 시에 운용하는 가스터빈 발전기와 정박, 묘박 및 예비용으로 운용하는 디젤발전기로 구성된다. 가스터빈 발전기에서 생산된 전 력으로 추진전동기를 구동하여 순항 및 최대속도를 발휘하며, 축당 1대의 추진 전동기를 설치한다[3].

Propulsion	Typical	Propulsion		
system	Configuration	Cruising speed	Max. speed	Application case
Full electric	2 Diesel generator, 2 G/T generator	Motor	Motor	Type-45(UK), DDG-1000(US)
CODLOG	4 Diesel generator, 1 G/T engine	Motor	G/T	Aquitaine(France), Type-26(UK)
CODLAG	4 Diesel generator, 1 G/T engine	Motor	Motor + G/T	Bergamini(Italy), Type-23(UK)
CODOE	4 Diesel generator, 2 Diesel engine	Motor	Diesel	F-110(Spain), Holland(Netherlands)
COGLAG	4 G/T generator, 4 G/T engine	Motor	Motor + G/T	improved ATAGO(Japan), Asahi(Japan)

Table 1 Electric propulsion system



Fig. 5 Integrated propulsion system of Type-45

완전전기추진체계를 적용한 최근 전투함은 영국 Type-45 함과 미국의 DDG-1000 함이 있다. Fig. 5는 Type-45 함의 완전전기추진체계 구성도를 나타 낸다[4]. 21MW 가스터빈 발전기 2대, 2MW 디젤발전기 2대, 추진전동기 2대, 변압기가 없는 PWM(Pulse-Width Modulation) 전력변환기 2대, 추진배전반 2대, 고조파 필터로 구성되어 있으며 4,160V 전압을 2대의 함공급변압기를 통해 440V로 감압하여 함내 부하에 전원을 공급도록 구성되어 있다.

CODLOG 추진체계는 1대의 가스터빈과 축당 추진전동기가 1대씩 설치되며, 순항 시에는 추진전동기를 운용하고 고속 시에는 가스터빈을 운용한다. 저속에 서는 디젤발전기에서 생산된 전력을 이용하여 추진전동기로 추진하며, 고속 시 에는 가스터빈을 이용하여 출력을 얻는다. Fig. 6은 프랑스 FREMM, Aquitaine 급 함정에 적용된 CODLOG 시스템을 나타낸다[5]. 1대의 32MW LM2500+G4 가 스터빈 엔진과 4대의 2.2MW 디젤발전기, 2대의 2.5MW 영구자석전동기로 구성 되어 있다.



Fig. 6 CODLOG system of Aquitaine class

CODLAG 추진체계는 1대의 가스터빈과 축당 추진전동기가 1대씩 설치되며, 순항 시에는 추진전동기를 운용하고 고속 시에는 가스터빈을 운용하다가, 최고 속도에서는 추진전동기와 가스터빈을 동시에 운용한다. 저속에서는 디젤발전기 에서 생산된 전력을 이용하여 추진전동기로 추진하며, 최고 속도 시에는 추진 전동기와 가스터빈을 동시에 이용하여 출력을 얻는다. Fig. 7은 이탈리아 FREMM, Bergamini 급 함정에 적용된 CODLAG 시스템을 나타낸다[6]. 1대의 32MW LM2500+G4 가스터빈 엔진과 4대의 2.15MW 디젤발전기, 2대의 2.5MW 영구자석전동기로 구성되어 있다. 추진전동기가 감속기어에 연결된 것이 아니 라 각 추진축에 설치되어 있다.



Fig. 7 CODLAG system of Bergamini class

CODOE 추진체계는 CODLOD(COmbined Diesel eLectric Or Diesel) 또는 CODELOD(COmbined Diesel ELectric Or Diesel) 로도 불린다. CODOE 추진체계 는 디젤엔진, 디젤발전기 및 추진전동기로 구성되며, 순항 시에는 디젤발전기에 서 생성된 전력을 이용하여 각 축에 연결된 추진전동기를 운용하고 고속 시에 는 디젤엔진을 운용하여 추진한다.

COGLAG 추진체계는 가스터빈, 가스터빈발전기 및 추진전동기로 구성되며, 순항 시에는 가스터빈발전기에서 생성된 전력을 이용하여 각 축에 연결된 추진 전동기를 운용하고 고속 시에는 가스터빈을 운용하여 추진한다. 그리고 최고 속도에서는 가스터빈과 추진전동기를 동시에 운용하여 함을 추진한다.

전기추진체계는 기계식 추진체계 대비 다수의 장점을 가지고 있는데, 주요 장점은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 연료비 절감, 운전효율 향상, 정비소요 감소, 운용인력 최소화를 통한 함
 정 운용유지비 절감
- 낮은 소음 및 진동 특성으로 수중방사소음 감소 및 시스템 이중화 용이
 에 따른 함정 생존성 향상
- 추진전력을 함내 전력으로 사용 가능한 높은 전력 가용성
- 고 전력의 무장/센서를 추가 탑재하는 성능개량에 대비한 미래 확장성
- 추진축 길이 감소, 엔진수량 감소 등에 따른 기관실 설계 유연성
- 황산화물, 질소산화물 등 대기오염물질 감소 가능한 친환경성

반면 전기추진체계는 기계식 추진체계보다 초기 획득비용이 높고, 함 중량 및 설치공간이 증가하는 단점을 가지고 있어 현재 기술수준으로는 소형 전투함 정에 적용하는 것이 제한된다.

함정은 임무 수행 중 다양한 적 무기체계의 위험 속에서 반드시 생존해야 하 므로 민간선박보다 더 엄격한 아래와 같은 군 요구조건이 전기추진체계에 적용 되도록 요구된다.

- 충격, 진동, 소음, 전자기간섭, 수중방사소음 등 특수성능 요구조건

- 정밀전자장비 탑재에 따른 고조파 최소화 등 높은 전력 품질 요구조건
- 장비 이중화, 분산배치 설계 등 생존성 요구조건

- 함 중량 및 설치 공간 제한에 따른 장비 경량화, 소형화 요구조건
- 정비, 보급, 교육훈련 등 후속군수지원을 위한 종합군수지원 요구조건 등

2.3 전기추진체계 함정 적용 현황 및 경향

2.3.1 최근 함정 전기추진체계 적용 현황

최근 함정 내에 설치되는 각종 장비/시스템의 첨단화, 대형화 및 자동화에 따 른 함내 소요전력 증가와 레이저건, 레일건과 같은 전력 소비가 많은 무장체계, 장거리 정밀 탐지 레이더와 같은 고출력 센서체계 등의 전투체계 장비 탑재에 따라 함내 전력 소요가 급격히 증가하여 함내 전력과 추진체계 동력을 일원화 하여 동력의 효율성 증대가 가능한 전기추진체계의 함정 적용이 확대되고 있 다. 또한, 높게 유지되고 있는 원유 가격과 국방 예산 감축 압박 등으로 연료비 및 운용유지비용 절감 노력도 전기추진체계 적용 확대에 영향을 주고 있다. 또 한, 민간선박의 경우에도 고유가 시대에 연료비 절감뿐만 아니라 황산화물, 질 소산화물 등 대기오염물질 배출을 규제하는 국제환경법 상의 압력으로 친환경 추진체계인 전기추진체계 적용이 확대되고 있어 향후 전기추진체계는 함정 및 민간선박의 표준 추진체계가 될 것으로 전망된다.

함정에 전기추진체계 적용은 높은 함 속력이 요구되지 않는 군수지원함, 해 양조사함 등 전투지원함과 상륙함에 우선 적용되었고 대용량 추진전동기 및 전 력변환장치 개발에 따라 전투함에 적용은 최근에 이뤄지고 있다. Jane's fighting ship에 등록된 전 세계 전투함의 전기추진체계 적용현황은 Table 2와 같다[8]. 미국 및 영국은 완전 전기추진체계 함정을 설계 및 건조하였고, 독일, 이탈리아 등 유럽국가에서는 복합식 추진체계 함정을 설계 및 건조하고 있다. 인도네시아 및 멕시코는 네덜란드에서 건조한 Sigma 10514급, 모로코와 이집트 는 프랑스에서 건조한 Aquitaine 급을 보유하거나 보유 예정이다. 일본의 경우 미 해군보다도 일찍 복합식 전기추진체계인 COGLAG 함정을 보유하고 있는데, 1995년에 취역한 Asuka 시험함에 COGLAG를 설치하여 시험을 진행한 바 있다. 국내에는 FFX Batch-II급에 CODLOG를 적용하였고, KDX-III Batch-II에 미 해군 DDG-51급과 유사한 HED 체계 적용을 추진하고 있다. Fig. 8은 세계 최초 복합 식 전기추진체계를 적용한 영국 Type-23의 추진체계 구성도를 나타낸다[7].



- 12 -

Ship class	Full load (ton)	Max/cruising speed(kts)	Commission year	Propulsion system
DDG-1000(US)	15,995	30/13	2016~2020	Full electric
Type-45(UK)	7,570	31/18	2009~2013	Full electric
Aquitaine(France, Morocco, Egypt)	6,096	27.5/15	2015~2023	CODLOG
FFX Batch-II(ROK)	3,650	30/13	2018~	CODLOG
Type-26(UK)	6,900	28/15	2026	CODLOG
Type-23(UK)	4,267	28/15	1991~2002	CODLAG
Type-125(Germany)	7,316	26/18	2017~2020	CODLAG
Bergamini(Italy)	5,980	27/15	2013~2021	CODLAG
F-110(Spain)	6,170	26/15	2023~2027	CODLAG
Meteoro(Spain)	2,675	20.5/12	2011~2018	CODOE
Holland(Netherlands)	3,810	22/16	2012~2013	CODOE
Sigma10514(Indonesia)	2,365	30/18	2017~2018	CODOE
Sigma10514(Mexico)	2,570	27/18	2019	CODOE
ASAHI(Japan)	5,100	30/	2018~2019	COGLAG
improved ATAGO(Japan)	8,200	30/	2020~2021	COGLAG

Table 2 The status of combat ship electric propulsion system



Fig. 8 CODLAG propulsion system of Type-23

2.3.2 함정 전기추진체계 적용 경향

Fig. 9는 전투함의 전기추진체계 적용 경향을 나타낸다. 복합식 전기추진체계 의 경우 영국 해군이 대잠능력 강화를 위해 Type-23 함에 세계 최초로 복합식 전기추진체계를 적용한 이후 독일, 프랑스, 이탈리아 등 유럽해군 함정에 확대 적용하기까지는 약 20년이 경과되었다. Type-23 함의 약 10년간의 함 운용을 통한 우수한 함 성능 입증과 치솟는 원유 가격과 국방예산 감축에 따른 연료비 절감 필요성에 따라 독일, 프랑스 등 선진 유럽해군은 약 10년 전부터 복합식 전기추진체계 적용 검토 및 관련 기술을 개발하여 최근에 건조하고 있는 함정 에 적용하고 있다. 복합식 전기추진체계의 함정 적용은 타 해군에도 확대되어 전투함 추진체계의 대세가 될 것으로 보인다[9].



Fig. 9 The status of combat ship electric propulsion system

완전 전기추진체계는 영국 해군 Type-45 함 및 미 해군 DDG-1000 함에 적 용되었는데 추진전동기 소형화를 위해 지속적으로 연구개발 중임에도 불구하고 현재의 기술수준으로는 경하 5,000톤 이하 함정에 30kts 이상의 최대속력을 만 족하도록 완전전기추진체계를 적용하는 것은 중량 및 설치공간 제한으로 불가

하다. 따라서 다른 해군 함정에 확대 적용은 추진전동기 등 구성장비의 소형화, 경량화 기술 개발 수준에 따라 좌우 될 것으로 판단되나, 기술발전 추세 고려 시 복합식 추진체계 경우처럼 타 해군에 확대 적용은 20년 이상은 걸리지 않을 것으로 전망된다.

연도별 세계 원유(두바이, 영국 브렌트, 미국서부 텍사스) 평균가격[10]과 전 기추진체계 적용 함정의 건조 계약시점[8]의 관계는 Fig. 10과 같다. Type-23 함에 복합식 전기추진체계 적용이 결정된 시점은 1985년으로 제2차 오일쇼크의 영향이 사라지지 않은 상태로 원유가격이 높게 형성된 시점이었다. 또한 독일, 프랑스 등 유럽 해군 및 한국 해군에서 복합식 전기추진체계 적용을 결정한 2010년대 초반에도 원유가격은 급등한 상태로 유류비 절감은 함정 추진체계 결 정의 중요한 요소 중에 하나였음을 추정할 수 있다. 향후 원유가격 상승은 미 국 및 유럽 이외 전 세계 해군 함정에 대한 전기추진체계의 급속한 확대에 직 접적인 영향을 줄 것으로 예상된다.



Fig. 10 Relationship between the average price of oil and construction contract year of electric propulsion ship

Fig. 11은 복합식 전기추진체계를 적용한 전투함의 건조 계약연도를 나타내는 데, 1984년 Type-23함에 CODLAG를 최초 적용한 이후 2005~6년경에 CODLOG, CODLAG 및 CODOE 함정이 건조 계약을 착수한 것을 알 수 있다. 즉 2005년

부터 전투함에 복합식 전기추진체계가 본격적으로 확대 적용되었는데, CODLOG, CODLAG 및 CODOE 추진체계가 거의 같은 시기에 전투함에 적용되 었다. 2010년 이후 가스터빈 발전기를 사용하는 전투함에도 COGLAG 추진체계 가 적용되었다.



Fig. 11 Construction contract year of hybrid electric propulsion ship

복합식 전기추진체계를 적용한 함정의 만재중량 분포는 Fig. 12와 같다. CODOE 체계는 2,000~4,000톤 범위의 디젤엔진을 적용한 비교적 작은 초계함 (Patrol corvett) 또는 호위함(Frigate)급 함정에 적용되었고, CODLAG 및 CODLOG는 3,500톤~7,500톤 사이의 호위함 또는 구축함(Destroyer)급 함정에 적 용되었으며, COGLAG는 5,500톤~8,500톤 사이의 구축함급 함정에 적용되었다. 따라서 복합식 추진체계는 초계함급 소형전투함에서 구축함급 대형 전투함까지 다양한 크기의 함정에 적용되고 있음을 알 수 있다.



Fig. 12 Full load displacement of hybrid electric propulsion ship

전기추진체계는 함정뿐만 아니라 민간선박에도 적용이 확대되고 있는데, Fig. 13의 Clarksons research's world fleet register에 따르면 민간선박에 전기추진체 계 적용이 급격히 증가됨을 알 수 있다[11].



Fig. 13 Annual new building contract



제 3 장 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환

3.1 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환 개념

3.1.1 복합식 전기추진체계 구성

🕖 Collection @ kmou

함정의 추진체계를 추진동력과 함내 전력 구성 관점에서 구분하여 보면 기본 적으로 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 추진동력과 함내 전력 공 급원이 완전히 분리되어 있는 분리 전력공급방식으로 발전기에서 나온 전력은 함내 부하에만 공급되고, 함 기동을 위한 추진동력으로는 사용되지 않는다. 추 진용 디젤 또는 가스터빈 엔진에 의해 생산된 추진동력은 직접 또는 감속기어 를 통해 추진기에 전달된다. 이 방식은 기계식 추진체계에 적용된다. 초창기 전 기추진체계도 이와 유사하게 추진용 발전기와 함내 부하용 발전기를 분리하여 각각 함내 부하와 추진전동기에 전력을 공급했었다. 분리 전력공급방식의 일반 적인 구성도는 Fig. 14와 같다.



Fig. 14 Separated power system

두 번째 방식은 다수의 발전기를 이용하여 추진전력과 함내 부하를 통합하여 전력을 공급하는 통합 전력공급방식이다. 발전기에서 생산된 전력을 함내 부하 와 추진전동기에 공급하여 함을 기동한다. 이 방식은 전기추진체계에 적용되며, 통합 전력공급방식의 일반적인 구성도는 Fig. 15와 같다.



Fig. 15 Integrated power system

통합 전력공급 방식 구성 시 추진전동기 작동을 위한 전력변환 과정에서 발 생하는 고조파는 추진전동기 뿐만 아니라 함내 정밀부하 등에 영향을 미칠 수 있기 때문에 철저한 관리가 필요하다. 고조파는 정상적인 파형을 왜곡시키는 기본파의 정수배의 주파수를 가지는 파형인데 왜곡된 파형은 기본파와 고조파 의 합으로 나타낼 수 있다. 추진전동기의 전력변환장치에 의해 생성된 고조파 는 추진전동기 및 함내 부하 장비의 과열, 소음, 효율 저하, 고장, 오작동, 수명 단축 등을 발생시킬 수 있으므로 고조파 저감을 위한 대책을 수립하여야 한다. 수동 및 능동 고조파 필터 적용, 변환장치 다(多) 펄스화, PWM 방식 적용 등의 고조파 저감 대책이 있으며, 적용된 전기추진체계 방식 및 구성을 고려하여 고 조파를 최소화 시킬 수 있도록 고조파 저감 대책을 반영하여야 한다.

복합식 추진체계는 통합 전력공급 방식의 변형된 방식으로 볼 수 있는데, 전 기추진체계와 기계식 추진체계의 구성을 모두 가지고 있다. 높은 함 속력에서 는 기계식 추진을 사용하고, 낮은 함 속력에서는 전기식 추진을 사용하는데 일 반적인 구성도는 Fig. 16과 같다.

복합식 추진체계는 전기추진체계와 기계식 추진체계의 단점을 보완하여 전체

속력대에서 최대의 에너지 효율을 제공한다.

복합식 추진체계가 기계식 추진체계 대비 구성상의 차이점은 추진전동기와 추진전동기를 제어하는 전력변환기가 추가된 것이다. 추진전동기로는 DC전동 기, 유도전동기, 영구자석 동기전동기, 동기전동기, 초전도전동기 등이 있으며, 최근 설계 및 건조된 함정에는 유도전동기 또는 영구자석전동기가 적용되고 있 다. 전력변환기는 PWM 방식의 가변주파수제어기(VFD, Variable Frequency Drive)가 주로 사용되고 있다.



3.1.2 양방향 전력변환 개념

Collection @ kmou

지난 수십 년간 레이더, 소나, 유도탄 및 전투체계의 지속적인 기술 발전으로 함정 내 전력 소요는 급격히 증가하고 있다. 미 해군은 레일건, 레이저건, 장거 리탐지 레이더 등 현재 개발 중인 장비들의 전력소요가 급격히 증가하고 있어 미래 함내 전력소요가 급격히 높아질 것에 대비하기 위해 전기추진체계 관련 기술 개발을 체계적으로 진행하고 있다. Fig. 17은 미 해군 함정의 최신 무장 및 센서 시스템 탑재에 따른 함내 전력부하 증가 추세를 나타낸다[12].



Fig. 17 Sensor and weapon system power demands

이런 추세는 고전력 소요의 무기체계가 계속적으로 개발되고 있는 점을 고려 시 향후에도 지속될 전망이다. 또한, 고출력 무기체계에는 추가적인 냉각장치 및 통풍장치가 반영되어야 하며, 이러한 고출력 무기체계를 운용 시 비선형적 이고 높은 고조파왜곡 특성을 가지고 있는 점도 고려되어야 한다. Fig. 18과 같 이 고출력 펄스 장비, 전자전장비 등은 매우 높은 고조파왜곡 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 전력체계와 구성장비로는 안정적인 전력공급이 불가하다 [12].



Fig. 18 Ship high power demands
따라서 이러한 높은 전력소요에 대한 이상적인 해결방안은 완전 전기추진체 계가 될 수 있으나, 현재 기술 개발수준으로는 모든 신조 함정에 완전 전기추 진체계를 적용하기에는 비용 및 기술적인 한계가 존재한다.

이러한 현재 기술적 한계를 극복할 수 있는 대안 중 하나가 복합식 추진체계 의 양방향 전력변환이다. 양방향 전력변환은 함정 추진을 위한 추진전동기를 발전기로도 사용하는 방식으로 기계식 엔진 추진동력을 이용하여 전력을 생성 하여 함내 부하에 전원을 공급하는 방식이다.

양방향 전력변환은 AFE(Active Front End) 방식이 적용되는데, 일반적인 가변 주파수제어기(VFD)는 다이오드 정류를 통해 제어되는 반면에 AFE는 IGBT와 같 은 반도체스위치를 사용한다. AFE는 일반적으로 정류기 기능을 하지만 regeneration 동안에 인버터로 작동될 수 있어 양방향 전력변환이 가능하다.



Fig. 19 Diode front end drive

전동기를 제어하는 가변주파수제어기는 기본적인 3단계의 변환을 거친다. 먼 저 정류기는 AC전원을 DC전원으로 정류하고, 두 번째 DC링크에서는 정류된 DC전원을 평활화하고 저장하며, 마지막 인버터는 DC전원을 PWM 방식으로 전 동기에 요구되는 주파수 및 전압의 AC전원으로 변환한다. Fig. 19에 나타낸 다 이오드 방식의 가변주파수제어기의 정류기는 6개의 다이오드가 사용된 전형적 인 6펄스 형태이다[13]. 각 다이오드는 3상 교류전원의 각상 양전압 및 음전압 을 정류한다. 다이오드 정류는 회로가 간단하고 비용이 낮은 장점이 있는 반면 에 고조파를 생성하는데, 고조파는 연결된 장비 작동에 과열, 소음, 소손, 오동 작 등을 일으킬 수 있다.

AFE는 AC전원을 DC전원으로 정류하기 위해 다이오드 대신에 전자적으로 제 어되는 스위칭장치인 IGBT를 사용하여 고조파를 감쇄시킨다. AFE는 입력 전류 의 파형을 감시하여 출력 파형이 사인파 형태를 유지하도록 한다. Fig. 20은 AFE 가변주파수제어기를 나타낸다[13]. AFE는 에너지저장시스템, 전기자동차, 열차용 회생제동시스템 등에도 사용되고 있다.

고조파는 시스템의 역률을 낮게 만든다. 식 (1)은 총고조파왜곡(THD, Total Harmonic Distortion)과 역률(PF)의 관계를 나타내는데 θ는 전압과 전류의 위상 각 차이를 나타낸다. 즉 AFE는 고조파를 감쇄시켜서 시스템의 역률을 개선시 킬 수 있다.

$$PF = \frac{\cos\theta}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

(1)



Fig. 20 Active front end drive

- 23 -

다이오드 방식의 DFE(Diode Front End)와 AFE 방식의 주요 장단점은 아래 Table 3과 같다[14]. AFE 방식은 비용이 높은 편이나, 대형 변압기 없이도 고조 파왜곡을 감소시킬 수 있기 때문에 설치공간이 제한적이고, 높은 전력품질을 요구하는 함정에 적합하다. 또한, 양방향 전력변환이 가능한 장점이 있다.

민간선박에서 PTO/PTI로 알려진 양방향 전력변환은 이미 상용화되어 다수의 선박에 적용되고 있는데, 연료비 절감과 국제 환경규제 강화에 따른 대기오염 감소 요구 증대에 따라 양방향 전력변환 기술은 지속적으로 발전할 것이며 민 간선박에 확대 적용 될 것으로 보인다. Fig. 21은 민간선박의 PTO/PTI 양방향 전력변환 개념도를 나타낸다[15]. 양방향 전력변환 기술 관련 좀 더 발전된 상 용 제어 기술과 군 요구사양을 만족하는 하드웨어 제작 기술이 확보되면 함정 에 양방향 전력변환 적용은 좀 더 쉬워 질 것이다.

Table 3 (Comparison	table	of	AFE	and	DFE
-----------	------------	-------	----	-----	-----	-----

구분	AFE	DFE
장점	- 양방향 전력변환 가능 - 낮은 고조파왜곡 - 입력단 변압기 불필요 - 역률 개선 - 넓은 산업 기반	- 저렴함 - 견고한 설계 - 넓은 산업 기반
단점	- 상대적으로 복잡함 - 상대적으로 고가	- 입력단 변압기 필요 - 양방향 전력변환 불가 - 낮은 주파수에서 높은 고조파왜곡



Fig. 21 Power take out and power take in

3.2 양방향 전력변환 효과 및 적용 사례

3.2.1 양방향 전력변환 효과

전투함에 대한 양방향 전력변환 적용 연구는 미 해군의 DDG-51 이지스구축 함에 최초로 적용되었다. DDG-51 이지스구축함은 미 해군의 주력 전투함이나, COGAG 추진체계를 구성하는 LM2500 가스터빈 엔진 4대와 501K 발전기용 가스터빈 엔진 3대, 총 7대의 가스터빈 엔진을 적용하여 타 함정 대비 연료소 비량이 매우 높다. 가스터빈은 저 부하에서 효율이 매우 낮아 높은 연료 소비 율을 보인다. Fig. 22은 LM2500 가스터빈의 연료소비율을 나타내고 Fig. 23은 501K 가스터빈의 연료소비율을 나타낸다[16].







Fig. 23 Specific fuel consumption of 501-K34



Fig. 22에서 LM2500 가스터빈은 최대 부하의 약 1/3 부하까지는 연료소비율 이 상대적으로 매우 높음을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 23에서 501K 발전기용 가스터빈 엔진도 저 부하에서 매우 높은 연료소비율을 보인다.

DDG-51 이지스구축함의 추진체계 운용모드는 하나의 가스터빈 엔진을 사용 하는 trail shaft 모드, 두 대의 가스터빈 엔진을 각축에 사용하는 split plant 모 드, 네 대의 모든 가스터빈 엔진을 사용하는 full plant 모드로 나눠진다. DDG-51 이지스구축함의 함속력 별 추진모드는 Fig. 24와 같다[16].



Fig. 24 Propulsion mode of DDG-51 operation as a function of speed

Fig. 25는 DDG-51 이지스구축함의 함 속력별 연중 운용시간 비율을 나타내는 데, 추진체계 운용모드와 함께 함 운용 특성을 잘 보여준다[16]. 약 12kts 이하 의 함 운용비율이 함 전체 운용비율의 50% 이상을 차지하고 있고, 전 속력대에 서 full plant 가 운용되어 저 부하에서 효율이 낮은 가스터빈의 특성에 따라 연 료 소비량이 매우 높음을 확인할 수 있다.

또한, 일반적으로 함정 발전기는 갑작스런 고장에 따른 함내 정전을 방지하 기 위해 최소 2대를 운용하기 때문에 함내 부하가 상대적으로 낮은 정박상태나

봄/가을 계절에는 2대의 발전기가 매우 낮은 부하로 운용하게 되어, 연료소비율 이 높을 수밖에 없다.



Fig. 25 Operation time of DDG-51 at each speed

이러한 문제를 개선하기 위해 미 해군은 DDG-51 이지스구축함에 복합식 전 기추진체계를 적용하기 위한 연구를 수행하였고 기존 COGAG 체계에 HED 시 스템을 추가 적용하여 저속의 함 속력에서 연료소비율을 개선하도록 하였다.



Fig. 26 HED system of DDG-51 class

Fig. 26은 DDG-51 이지스구축함에 적용된 HED 시스템을 나타내는데, 기존

감속기어에 electric drive를 추가 설치하여, 저속에서는 가스터빈 엔진 대신에 추진전동기로써 함을 추진하고, 고속에서는 가스터빈 엔진의 추력을 이용하여 발전기로써 전력을 생성하여 함내 전원을 공급할 수 있도록 구성하였다. Fig. 27은 DDG-51 이지스구축함에 검토된 HED시스템의 전동기모드를 나타내고, Fig. 28은 발전기모드를 나타낸다[17].



Fig. 28 Generating operation

1,200kW의 electric drive를 적용하면, 함속 12kts까지 전기추진을 할 수 있으며, 12kts 이상의 함속력에서는 발전기로써 작동하여, 가스터빈 발전기를 한 대를 끄고 한 대만으로 운용하여 연료를 절감할 수 있다.

1년의 약 1/3을 함 운용할 경우 연간 약 2,912시간을 운용하게 되는데 Fig. 29는 전동기 기능만을 적용한 경우의 전동기 용량별로 연간 연료 절감 효과를 나타내는데, 전동기 용량이 커질수록 연료 절감 효과는 더 커짐을 알 수 있다 [16]. Fig. 30은 전동기 및 발전기 기능을 적용한 경우의 전동기 용량별로 연간 연료 절감 효과를 나타내는데, 전동기 기능만을 적용 했을 때보다도 더 많은 연료 절감 효과가 나타난다. 12kts 기준으로 전동기 기능만 적용 시 연간 약 4,800 배럴, 전동기 및 발전기 기능을 적용한 경우 연간 8,900 배럴의 연료를 절감할 수 있는 것으로 연구되었다[16].



Fig. 29 Fuel savings per ship for motoring-only operation



Fig. 30 Fuel savings per ship for motoring-generating operation

- 29 -

3.2.2 양방향 전력변환 함정 적용 사례

수 년 간의 HED 효용성에 대한 연구에도 불구하고, 미 해군은 DDG-51 함에 최종적으로 전동기 기능만을 적용하기로 결정하였고, DDG-51 flight-II 신조 함 정사업뿐만 아니라 운용중인 DDG-51 flight-II 함정에도 HED 시스템을 추가 적 용하는 성능개량사업을 추진하고 있다. 많은 연구를 통해 양방향 전력변환 발 전기모드의 효능이 증명되었음에도 불구하고 미 해군이 발전기모드를 선택하지 않은 이유는 이지스 전투체계라는 고정밀 장비가 탑재되는 함정에 고조파왜곡 유입 가능성이 있는 발전기모드를 적용하기에는 위험 부담이 있는 것으로 판단 한 것으로 보인다. 그러나 양방향 전력변환을 함정에 적용하는데 기술적으로는 문제가 없다는 것이 장비 제작사들의 의견이다. 현재까지 전 세계 전투함에 양 방향 전력변환을 적용한 사례는 없으나 관련 기술 개발과 연구가 지속되고 있 고 민간선박 및 전투지원함에 적용 사례가 있음을 고려하면 향후 가까운 미래 에 전투함에도 양방향 전력변환이 적용될 것으로 예상된다.

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 전력변환의 상 용기술인 PTO/PTI 기술을 적용하여 연료비를 절감할 수 있게 설계 및 건조되 었다. Fig. 31과 Fig. 32는 노르웨이 LSV함의 PTO/PTI 운용모드를 나타낸다[18]. 1kW 추진전동기 2대를 감속기어에 연결하여 설치하고, 디젤엔진 2대와 3,170kW 함내 디젤발전기 2대를 설치하였다. 함 속력 8kts 이하의 저속에서는 PTI 모드로 함내 발전기에 의해 생성된 전력으로 추진전동기를 작동하여 추진 을 하고, 함 속력 9kts 이상부터 최대속력 18kts까지는 PTO 모드로 디젤엔진의 추진력을 이용 전력을 생성하여 함내 전력부하에 전력을 공급 하도록 구성되어 있다. 이때 함내 디젤발전기 2대는 추가 전원을 공급할 수 있다.





Fig. 32 PTO mode of LSV

제 4 장 함정 연료 소비량 산출 알고리즘

4.1 함정 연료 소비량 산출 방법

함정 연료 소비량 산출을 위해서는 총 연료소비율, 함정 소요추진력, 속력별 운용시간을 우선 산출하여야 한다. 연간 연료 소비량을 *Fyear*, 속력별 연료 소비 량을 *F_{sy}(v)*, 함정 최대속력을 *v_{max}*라 하면 연간 연료 소비량은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$F_{year} = \sum_{v=1}^{v_{max}} F_{sy}(v) \ [kg]$$
(2)

속력별 연료 소비량 Fsy(v)는 다음 식으로 계산 된다.

$$F_{sy}(v) = P_P(v) \times FC \times T_{OP}(v) \quad [kg]$$

식 (3)에서 *Pp(v)*는 속력에 따른 함정 소요추진력, *FC*는 출력에 따른 총 연료 소비율, *Top(v)*는 속력에 따른 함정 운용시간을 나타낸다. 식 (3)과 같이 함정의 연간 연료 소비량을 산출하기 위해서는 총 연료소비율 및 함정 소요추진력을 우선 산출하여야 하므로 다음 절에서는 총 연료소비율과 함정 소요추진력을 산 출하는 방법에 대해 알아본다.

4.1.1 총 연료소비율 산출 방법

Collection @ kmou

함내 총 연료소비율 산출 방법은 Fig. 33과 같이 나타낼 수 있다. 함내 총 연 료소비량은 추진기관 연료소비량 및 발전기 연료소비량의 합으로 나타낼 수 있 다. 함정 소요추진력에 10% 여유를 적용하고 축전달효율을 β, 추진기관 연료

소비율을 *MEstc*, 24시간 평균 전력부하는 *PE*, 발전기 연료소비율을 *GEstc*라 하면 총 연료소비량 *Ftotal*은 식 (4)로 나타낼 수 있다. 함정 소요추진력에 적용된 10% 여유는 해상상태와 건조 후 2년 이후의 평균 선저오염상태를 고려한 것이다 [19].

$$F_{total} = \frac{P_P \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} + (P_E \times GE_{sfc}) \ [kg/hr] \tag{4}$$



Fig. 33 Estimation process of fuel consumption rate

총 연료소비율 FC는 식 (4)에 함정 소요추진력을 나눠서 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$FC = \frac{\frac{P_P \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} + (P_E \times GE_{sfc})}{P_P \times 1.1} \quad [kg/(kW \bullet hr)]$$
(5)

함정의 해상시운전 시 측정계기에 의한 오차와 함정 건조 중에 발생할 수 있 는 최소한의 설계변경에 의한 오차를 수정계수α라 하며 보통 1.02~1.04 사이 값을 적용한다. 순항속력을 내기 위한 소요추진력이 최대 정격마력 대비 1/3 미 만이면 1.04, 1/3~2/3 사이이면 1.03, 그리고 2/3 이상이면 1.02를 적용한다[19]. 수정계수α와 함정의 기관성능 저하를 고려한 값 5%를 적용한 총 연료소비율 FC_{ME}은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$FC_{ME} = \frac{\frac{P_P \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} + (P_E \times GE_{sfc})}{P_P \times 1.1} \times \alpha \times 1.05 \ [kg/(kW \cdot hr)]$$
(6)

함정 추진을 추진기관이 아닌 추진전동기를 사용하면 연료소비량이 발전기로 합산되므로 복합식 전기추진체계의 추진전동기를 운용하는 속력에서의 총 연료 소비율 FC_{Motor}은 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$FC_{Motor} = \frac{\left(\frac{P_P \times 1.1}{\beta} + P_E\right) \times GE_{sfc}}{P_P \times 1.1} \times \alpha \times 1.05 \quad [kg/(kW \bullet hr)]$$
(7)

식 (6)과 식 (7)에서 추진기관 연료소비율 *MEstc*와 발전기 연료소비율 *GEstc를* 구할 때 2대 이상의 발전기 혹은 추진기관이 동작할 경우에는 동일하게 부하가 분담되는 것으로 가정하여 총 부하를 운전 중인 발전기 혹은 추진기관 대수로 나누어 1대 기준으로 연료소비율을 산출하여 적용한다. 운전 중인 발전기 대수

를 n_{GE} , 동작중인 추진기관 대수를 n_{ME} 로 정의하면 발전기 및 추진기관의 연 료소비율의 관계식은 식 (8)과 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$GE_{sfc} = f\left(\frac{P_E}{n_{GE}}\right) \tag{8}$$

$$ME_{sfc} = f\left(\frac{P_P}{n_{ME}}\right) \tag{9}$$

함정 추진을 추진기관으로 하며, 추진전동기를 발전기로 사용할 경우, 즉 양 방향 전력변환 발전기모드의 연료소비율 *FC_{Gen}*은 식 (10)로 나타낼 수 있다.

$$FC_{Gen} = \frac{\frac{(P_P + P_{EG} \div \gamma) \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} + (P_E - P_{EG}) \times GE_{sfc}}{P_P \times 1.1} \times \alpha \times 1.05$$
(10)
$$[kg/(kW \bullet hr)]$$

식 (10)에서 *P_{EG}* 는 함내 소요전력 중에 추진전동기의 발전기모드에서 부담하 는 전력량을 나타내고, γ는 추진전동기를 발전기로 사용할 때 추진전동기 및 전력변환기 효율을 나타낸다.

상기 식에서 24시간 평균 전력부하 P_E는 함정이 정해진 순항속력에서 24시간 동안 항해 시 전력부하의 평균값으로 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다[20].

$$P_E = P_{EP} + 0.75(P_{EC} - P_{EP}) \ [kW] \tag{11}$$

식 (11)에서 PEP는 함정추진부하를 제외한 추진기관 및 보조기기에 소요되는 전력을 나타내고, PEC는 항해 중에 소요되는 전력을 나타낸다. 식 (11)은 미 해

군에서 수십 년간의 함정 운용경험으로 도출된 수식으로 24시간 평균 전력부하 에 추진기관 및 보조기기에 소요되는 전력부하는 100% 고려하고 그 외 무장, 센서, 통신, 조명 등의 기타 부하는 24시간 지속되게 사용되지 않으므로 75%를 고려하였다.

기계식 추진 시 총 연료소비율은 식 (6), 전기식 추진 시 총 연료소비율은 식 (7), 양방향 전력변환 발전기모드 시 총 연료소비율은 식 (10)으로 나타낸다. 연 간 연료소비량 산출식인 식 (2)를 이용하면, 각 추진 방식별 연간 연료소비량을 산출할 수 있다. 식 (12)은 기계식 추진 시 연간 연료소비량을 나타낸다.

$$F_{year\,ME} = \sum_{v=1}^{v_{\text{max}}} \begin{bmatrix} P_P(v) \times \frac{P_P(v) \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} + (P_E \times GE_{sfc}) \\ P_P(v) \times \frac{P_P(v) \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} \end{bmatrix} [kg]$$
(12)

전기식 추진 시 연간 연료소비량 및 양방향 전력변환 발전기모드 시 연간 연 료소비량은 각각 식 (13)과 식 (14)로 나타 낼 수 있다.

$$F_{year\,Motor} = \sum_{v=1}^{v_{max}} \begin{bmatrix} P_P(v) \times \frac{(\frac{P_P(v) \times 1.1}{\beta} + P_E) \times GE_{sfc}}{P_P(v) \times 1.1} \\ \times \alpha \times 1.05 \times T_{OP}(v) \end{bmatrix} [kg]$$
(13)

$$F_{year\,Gen} = \sum_{v=1}^{v_{max}} \begin{bmatrix} \frac{(P_P(v) + P_{EG} \div \gamma) \times 1.1 \times ME_{sfc}}{\beta} + (P_E - P_{EG}) \times GE_{sfc}) \\ P_P(v) \times \frac{\beta}{2} \end{bmatrix} [kg]$$

$$(14)$$

상기 식 (12), (13), (14)는 추진체계 방식 별 각 함정의 연간 연료소비량 산출에 활용된다.

- 36 -

4.1.2 축 전달효율 산정

연간 연료소비량 산출을 위해서는 추진체계 방식별 축 전달효율을 산정하여 야 한다. 축 전달효율은 추진기관에서 생성된 동력을 추진기(프로펠러)까지 전 달하는 과정에서 감속기어, 축 베어링 등에 의해 마찰손실이 발생되기 때문에 고려되어야 한다.

기계식 추진체계를 적용한 함정의 축 전달효율은 기관실을 함미에 배치하여 추진축이 짧게 배치된 경우 가스터빈엔진은 0.97, 디젤엔진은 0.95를 적용하며, 기관실을 함 중앙에 배치하여 추진축이 길게 배치된 경우 가스터빈엔진은 0.95, 디젤엔진은 0.92를 일반적으로 적용한다[21].

전기추진체계의 경우 전력을 케이블, 배전반, 전력변환기 등을 통해 전달하는 과정에서 열손실이 발생되기 때문에 기계식 추진체계보다 축 전달효율이 상대 적으로 낮다. 전기추진체계를 구성하는 발전기 Alternator, 배전반, 전력변환기, 추진전동기의 효율은 관련 기술 발전으로 점차 개선되고 있다. 전기추진체계의 축 전달효율은 참고문헌이나 제작사에 따라 제시한 효율이 다르지만[22, 23] 일 반적인 범위는 Fig. 34와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 34에서 각 장비의 효율을 곱하면 전기추진체계의 축 전달효율은 약 0.89~0.94의 범위로 나타낼 수 있다.



Fig. 34 Efficiency of electric propulsion system

4.1.3 함정 소요추진력 추정 방법

Collection @ kmou

일반적인 함정 소요추진력 추정 절차는 Fig. 35와 같이 저항계수를 계산 또는 추정하여 함정 전체저항을 계산한 후 설계여유, 준추진효율 및 축 전달효율을 적용하여 제동마력을 추정한다[21]. 제동마력은 함정 추진기관을 선정하기 위한 함정 소요추진력으로 활용된다.



Fig. 35 Estimation process of brake horsepower

상기 함정 소요추진력 추정 절차에 따라 제동마력을 계산하기 위해서는 함정 선체 저항계수 산출을 위해 침수표면적, 마찰저항계수, 공기저항계수, 부가물저 항계수 등의 세부적인 선체 정보가 필요하므로 본 연구에서 수행하기에는 부적 절하다. 따라서 본 연구에서는 해당 함정과 함 제원 및 추진체계가 유사한 실 적함정의 소요추진력을 활용하여 추정하도록 한다.

4.2 함정 연료 소비량 산출 알고리즘

Fig. 36은 함정 연료 소비량 산출 알고리즘을 나타낸다.



Fig. 36 Algorithm of fuel consumption calculation for naval ships

- 39 -

Fig. 36에서 *x* kts는 전기식 추진이 가능한 최대속력을 나타낸다. *x* kts 이하 에서는 전기식 추진을 하고, *x* kts를 초과하면 기계식 추진을 하며, 기계식 추 진 중에 양방향 전력변환 발전기모드를 적용한다. 또한, 양방향 전력변환 발전 기모드 사용 시 발전기 작동 없이도 함내 전력부하를 수용 가능하므로 발전기 1대를 함께 운용하는 개념과 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 으로 운용하는 두 가지 발전기 운용개념을 고려한다.

추진방식 및 발전기 운용개념에 따라 추진마력 및 함내 전력부하를 부담하는 장비는 발전기 또는 추진엔진이 될 수 있다. Fig. 36에서 발전기 및 추진엔진이 부담해야 하는 부하를 분류하면 Table 4와 같이 4가지 방식으로 분류할 수 있 으며 4가지 방식으로 산출된 연료소비율을 합산하여 연간 함 운용시간을 반영 하면 연간 연료 소비량을 산출할 수 있다.

Pro	opulsion and gen	Load of generators	Load of engines	
Electric propulsion			P_{P} , P_{E}	_
Mechanical propulsion	No bidirectional		P_E	P_P
	Bidirectional	Generator operation	P_E – P_{EG}	P_{P} , P_{EG}
		Generator off	_	P_{P} , P_{E}

Table 4 Load of generators and propulsion engines

Table 4에서 양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서 발전기를 함께 운용 하는 경우 함내 전력부하 일부를 발전기가 분담하게 된다. 이때 함내 전력부하 를 발전기와 추진엔진에 각각 몇 대 몇으로 분배할 지는 발전기 및 추진엔진에 가해지는 부하율에 따라 연료소비량을 증감시킬 수 있으므로 신중히 고려해야 한다.

Fig. 37은 연료소비량 절감을 위해 양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서

발전기를 함께 운용하는 경우, 함내 전력부하를 발전기 및 추진엔진에 분담하 는 알고리즘을 나타낸다. Fig. 37에서 ME는 추진엔진, GE는 발전기, MEout은 추 진엔진 정격출력, GEout는 발전기 정격출력을 나타낸다. 일반적으로 복합식 전 기추진체계를 적용한 함정의 가스터빈 또는 디젤 추진엔진은 발전기보다 출력 이 훨씬 크기 때문에 저 부하에서 연료소비율이 높으므로 추진부하와 함내 전 력부하를 합한 총 부하량이 추진엔진 정격부하보다 작은 경우는 함내 전력부하 를 추진엔진과 발전기가 9:1의 비율로 부하를 분담하도록 설정하였다. 발전기의 부하율이 낮더라도 추진엔진의 부하를 최대한 증가시켜 연료소비량을 줄이기 위함이며 다음 절에서 양방향 전력변환 시뮬레이션을 통해 발전기와 추진엔진 의 최적 부하 분배비율을 도출하여 연료소비량 절감을 위한 방안을 제시하도록 한다.

추진부하와 함내 전력부하를 합한 총 부하량이 추진엔진 정격보다 크고 추진 엔진과 발전기 1대 정격용량의 합보다 작을 경우는 추진엔진이 정격출력의 100%를 부담하도록 함내 전력부하를 분배하고 잔여 부하를 발전기가 분담하도 록 한다. Fig. 37에서 변수 *k*는 추진엔진이 정격출력의 100%를 부담하도록 함 내 전력부하를 분배하기 위한 함내 전력부하에 곱해지는 비율이며 추진엔진 정 격출력, 소요추진력 및 함내 전력부하로 다음과 같이 관계식을 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{ME_{out} - P_P}{P_E} \tag{15}$$

추진부하와 함내 전력부하를 합한 총 부하량이 추진엔진과 발전기 1대 정격 용량의 합보다 클 경우는 발전기 과부에 따른 함 정전을 방지하기 위해 함내 전력부하 중에 비중요 부하를 차단하여 함내 전력부하를 줄이도록 하고 발전기 를 추가로 작동할 것인지 판단하여 필요시 발전기를 추가 작동하여 함내 전력 부하를 분배하도록 한다. 이 때 발전기는 함정 설계건조 기준에 따라 정격출력 의 90% 이내에서 운용하도록 설정한다.



Fig. 37 Load sharing algorithm of bidirectional power conversion

제 5 장 양방향 전력변환 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 개요

복합식 전기추진체계를 함정에 적용 시 이에 따른 장점은 앞 장에서 알아본 바와 같이 함정 생존성 향상, 함정 운용유지비 절감, 높은 전력가용성, 친환경 성 등 다수가 있으며, 이런 장점들은 다수의 실적함정에 복합식 전기추진체계 가 적용되고 장기간 운용을 통해 증명되었다. 그러나 복합식 전기추진체계를 탑재한 전투함에 양방향 전력변환 발전기모드를 적용한 실적이 없고 전투지원 함에 양방향 전력변환 발전기모드를 적용한 지 얼마 되지 않은 초기 단계인 관 계로 상대적으로 연구는 미진한 상태이며, 특히 국내에 관련 연구는 매우 적으 며 해외 연구결과에 대한 확인하는 수준에 머물러 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 함정 복합식 전기추진체계 양방향 전력변환 효과에 대 한 현실성 있고 활용성이 높은 분석을 위해 함정에 주로 적용되는 다양한 추진 체계 및 실제 운용중인 함정의 운용개념을 최대한 적용하여 시뮬레이션을 수행 하도록 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 사항에 대해 중점을 두고 시뮬레이션 을 수행하여 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환 효과를 확인하도록 한다.

- 함정 추진체계 종류별 양방향 전력변환 효과 분석
- 함 운용 프로파일에 따른 양방향 전력변환 효과 분석
- 발전기 운용개념에 따른 양방향 전력변환 효과 분석

- 연료비, 정비비 등 경제적 측면의 효과 분석

Collection @ kmou

함정 추진체계별, 운용개념별 양방향 전력변환 효과에 대한 시뮬레이션 결과 분석을 통해 양방향 전력변환 적용 시 경제적 효과가 높은 추진체계 및 함정 운용개념을 식별하도록 한다. 양방향 전력변환 효과 분석을 위한 본 연구의 시뮬레이션 절차는 Fig. 38과 같다. 먼저 시뮬레이션을 수행할 대상함정 종류를 선정하고 대상함정의 사양 결정 시 고려한 Parent ship(기준함)을 결정 한 후 Parent ship의 주요 사양을 고려하여 추진체계 구성, 엔진모델, 발전기모델 등의 대상함정 추진체계 사양을 결정한다. 이후 함정 운용프로파일, 발전기 운용대수 등의 대상함정 운용개념을 설정한 후 결정된 각종 데이터를 National Instruments사 Labview 소프트웨어를 이용하여 함정별, 운용개념별 추진체계 모델링을 한다. 추진체계 모델링을 이용 하여 연간 연료소비량, 연간 발전기 운용시간 등을 도출하여 양방향 전력변환 효과를 분석한다.



Fig. 38 Process of simulation



5.2 모델링 대상 함정

함정을 대분류하면 해상전투를 수행하는 전투함과 후방에서 전투함을 지원하는 임무를 수행하는 전투지원함으로 구분할 수 있다. 전투함에는 구축함, 호위 함, 초계함, 고속정 등이 있으며, 전투지원함에는 군수지원함, 해양정보함, 구조 함 등이 있다.

국내 함정 중 복합식 전기추진체계를 적용하거나 적용을 검토 중인 함정으로 는 이지스구축함, 호위함, 군수지원함이 있다. Jane's fighting ship에 따르면 FFX Batch-II 함정에 CODLOG 추진체계가 적용되었고, 국내 언론보도에 따르 면 군수지원함(AOE)의 추진체계에 전기모터와 디젤엔진이 적용되었다. 또한, KDX-III Batch-II 탐색개발 시 미 해군 DDG-51급 이지스구축함에 적용된 HED 체계 적용을 검토 중인 것으로 확인되었다.

따라서 현실성 있고 활용성이 높은 결과를 도출하기 위해 본 연구는 국내 함 정 중 복합식 전기추진체계 실적을 고려하여 이지스구축함, 호위함 및 군수지 원함 3종 함정을 연구 대상 함정으로 한다. 이지스구축함은 국내 함정과 제원 이 유사하고 함정자료가 다수 공개된 미 해군 DDG-51급 함정중 HED 체계를 시험 적용한 함정을 parent ship으로 선정하고, 호위함은 일부 함정자료가 공개 된 한국 해군 FFX Batch-II 함정을 parent ship으로 선정하며, 군수지원함은 국 내 공개된 함정자료가 매우 제한되므로 노르웨이 LSV 함정을 parent ship으로 선정한다. 각 parent ship의 공개된 제원을 기준으로 미확인된 사양은 유사함정 자료를 활용한 추정을 통해 각각의 가상함정에 대한 시뮬레이션을 수행하도록 한다.

본 연구의 parent ship인 DDG-51, FFX Batch-II, LSV 함정의 주요 제원은 Table 5와 같다[8].



Specification	Aegis destroyer	Frigate	Auxiliary oiler	
Class	DDG-51	FFX Batch-II	LSV	
Full load displacement	9,200 ton	3,650 ton	27,500 ton	
Overall length	160 m	122 m	183 m	
Maximum speed	31 kts	30 kts	18 kts	
Propulsion system	COGAG + HED	CODLOG	CODLOD	
Machinery	4 GE LM2500 G/T3 G/T generators2 motors2 CPP	1 R/R MT30 G/T 4 MTU 12V4000 D/G 2 motors 2 CPP	 2 6L46F diesel 2 6L32 D/G 2 motors 2 CPP 	

Table 5 Specification of parent ship

본 연구에서 모델링 시 적용할 데이터는 다음과 같은 기준으로 선정하여 현 실적이고 활용성이 높은 연구결과를 도출하도록 한다.

- Parent ship의 공개된 자료 적용
- Parent ship에서 확인 불가 자료는 유사함정 공개 자료를 참고하여 추정



5.3 추진체계 구성 및 운용 모드

5.3.1 함정 추진체계 운용개념

함정 추진체계 운용개념은 함정을 어떻게 운용할 것인지를 제시한 것으로 추진체계 운용일수, 속력별 운용비율 등을 결정하기 때문에 본 연구에서 우선 적으로 고려되어야 한다. 일반적인 함정 추진체계 운용 절차는 출항을 준비하 여 저속으로 부두를 이탈한 다음 목적지로 순항속력으로 이동한 후 임무를 수 행하고 순항속력으로 귀항 이동 후 부두에 접안하는 순서를 가지는데, Fig. 39 는 함정 추진체계 운용 절차를 시스템엔지니어링 기법중 하나인 기능흐름도로 나타내었다.

함정은 작전 수행을 위해 교육훈련, 보급품 조달 등을 위해 정박상태에서 대 기하다가 임무 수행을 위해 해상 작전을 수행하고 작전 완료 후 기지로 복귀하 여 함정 정비를 위한 시간을 가진다. 따라서 함정은 대기-작전-정비 순서로 운용되므로 함정 연간 작전일수는 연간 일수의 1/3로 추정할 수 있다. 즉 추진 체계 연간 운용일수는 1년의 1/3인 122일, 2,920시간으로 추정할 수 있다.

함정 운용개념의 중요한 부분중 하나인 속력별 운용비율은 함정 건조 착수 전에 소요군에서 함정건조기본지침서에 함정 실측값이 아닌 경험에 의한 추정 값으로 제시하고 있는데, 정확한 함정 속력별 운용비율은 유사 함정을 실제 측 정하는 것이 필요하다. 미 해군은 DDG-51급 함정에 대해 함정 속력별 운용비 율을 실측 하였고 함정 설계에 사용되는 함 속력별 운용비율이 실제와 차이가 있으므로 갱신(update)이 필요하다는 결론을 내렸었다. 국내 함정에는 함정 속 력별 운용비율이 공개된 자료가 없으나, 미 해군의 경우 참고문헌 [24]에 함정 종류별로 함속별 운용비율을 실제 운용함정에서 계측하여 공개하였다. 본 연구 에서는 정확도와 유효성을 높이기 위해 미 해군 DDS(Design Data Sheet) 200-2 에 제시된 함속별 운용비율 자료를 활용하도록 한다.





Fig. 39 Functional flowchart of naval ship propulsion system

Collection @ kmou

- 48 -

5.3.2 함정별 추진체계 구성 및 운용 모드

5.3.2.1 이지스구축함

본 연구의 이지스구축함 추진체계 구성은 Parent ship인 DDG-51급의 추진체 계 사양 및 추진체계 구성을 고려하여 Fig. 40과 같이 COGAG 기계식 추진체계 에 HED를 추가한 COGAG+HED 체계로 구성한다. 본 추진체계는 기계식 추진 체계로 설계된 함정에 복합식 추진체계 형태로 성능개량한 경우로 가스터빈 발 전기 수량보다 가스터빈 엔진 수량이 더 많아서 복합식 추진체계에 최적화된 추진체계 구성으로 보기 어려우나, 운용중인 기계식 추진체계를 복합식 형태로 개조한 대표적인 사례로 의미가 있다.





본 연구에서 HED는 저속에서는 추진전동기로 운용하고, 고속에서는 추진발 전기로 운용하는 장치로 정의한다.

이지스구축함의 Parent ship인 미 해군 DDG-51의 COGAG 추진체계 운용모드 는 하나의 가스터빈 엔진을 사용하는 trail shaft 모드, 두 대의 가스터빈 엔진 을 각축에 사용하는 split plant 모드, 네 대의 모든 가스터빈 엔진을 사용하는 full plant 모드로 나뉘는데, 하나의 가스터빈 엔진과 한쪽의 추진축으로 함정을 기동하는 trail shaft 모드는 한국 해군에서 사용하지 않음을 고려하여 본 연구 에는 적용하지 않도록 한다.

이지스구축함의 추진체계 운용모드는 추진전동기 운용모드, 가스터빈 운용모 드, 양방향 전력변환 발전기모드, 3가지로 구분하도록 한다. 추진전동기 운용모 드는 발전기 3대에서 생성된 전력을 이용하여 추진전동기를 작동시켜 저속으로 함을 추진하는 모드이며, 가스터빈 운용모드는 추진전동기 작동 없이 가스터빈 2대(split plant) 또는 4대(full plant)를 작동하여 함을 고속으로 추진하는 모드이 다. 양방향 전력변환 발전기모드는 가스터빈으로 함 기동 상태에서 추진전동기 를 발전기로 전환하여 가스터빈의 회전동력을 이용하여 전력을 생성하는 모드 로 양방향 전력변환을 하는 상태이다.

함 속력별 운용비율은 각 함정의 운용개념에 따라 결정되며, 연료 소비량과 관련이 높으므로 함 속력별 운용비율에 따른 양방향 전력변환의 효과를 분석하 기 위해 두 종류의 함 속력별 운용비율을 고려하도록 한다. 이지스구축함의 함 속력별 운용비율을 나타내는 운용 프로파일은 참고문헌 [16]에 제시된 Fig. 25 의 DDG-51급 함정의 운용 프로파일을 A로 구분하고 미 해군 DDS 200-2에 제 시된 DDG-51급 함정의 운용 프로파일을 B로 구분하여 본 연구에 적용한다. 운 용 프로파일 A는 B 대비 추진전동기 운용비율이 7.8% 많고 가스터빈 운용비율 이 적은 특성을 가지고 있다. Fig. 41은 DDS 200-2에 제시된 DDG-51급 함정의 운용 프로파일을 나타내며, Fig. 42는 운용 프로파일 A를 추진체계 운용모드 별 로 구분하여 나타낸 것이다. Fig. 43은 운용 프로파일 B를 추진체계 운용모드 별로 구분하여 나타낸 것이다.



- 50 -



Fig. 41 Speed-time profile of DDG-51 class

발전기 용량은 Parent ship과 동일하게 대당 3,000kW로 하며, 추진전동기는 1,500kW로 결정한다. 함내 전력부하는 유사함정의 함내 전력부하가 발전기 2대 용량의 약 75%를 차지함을 고려하여 4,500kW로 결정한다.

일반적으로 함정은 항해 중 갑작스런 발전기 고장에 따른 함 정전(black out) 을 대비하기 위해 최소 2대의 발전기를 운용한다. 함 정전은 함의 추진뿐만 아 니라 모든 함내 체계, 자동 제어/감시 기능을 상실하게 만들기 때문에 이를 대 비한 운용개념 설정 및 전력 시스템 설계가 필요하다.

양방향 전력변환 발전기모드 사용 시 발전기 작동 없이도 함내 전력부하를 수용 가능하므로 발전기모드는 최소 1대의 발전기를 함께 운용하는 개념과 발 전기 작동 없이 발전기모드만으로 운용하는 개념의 두 가지 발전기 운용개념을 고려하도록 한다. 해군 운용자 입장에서 함 정전을 방지하기 위해 최소 1대의 발전기를 발전기모드와 함께 운용하기를 요구할 수 있음을 고려한 운용개념 이 다.





Fig. 42 Speed-time profile A by operation mode of aegis destroyer



Fig. 43 Speed-time profile B by operation mode of aegis destroyer

Fig. 44는 이지스구축함의 발전기와 추진엔진(가스터빈) 운용 대수를 함 속력 별로 나타낸다. 대당 3,000kW의 가스터빈 발전기는 함내 부하전력이 4,500kW 이므로 4kts까지는 추진마력 고려 시 2대로 운용 가능하지만 5kts부터는 발전기 부하율이 90%를 초과하므로 3대를 운용하도록 한다. 또한, 1,500kW의 추진전동

기 2대로는 12kts까지 함 추진이 가능하므로 13kts부터는 발전기는 2대만 운용 하고 가스터빈으로 함을 추진하도록 하며, 가스터빈 운용 중 양방향 전력변환 을 사용 시 양방향 전력변환 발전기모드로 생산되는 전력으로는 함내 부하 4,500kW를 충족할 수 없으므로 발전기는 1대를 운용하도록 한다. 가스터빈은 속력별 소요추진력에 따라 13kts부터 25kts까지 2대를 운용하고 26kts부터 최대 속력 31kts까지는 4대를 운용하도록 한다.



Fig. 44 Operation of generator and propulsion engine of the aegis destroyer

앞서 설명한 이지스구축함의 추진체계 운용개념을 정리하면 Table 6과 같이 함 속력별 운용비율, 추진모드, 추진엔진 운용 대수 및 발전기 운용 대수를 나 타낼 수 있다.

Speed Profile (%)		Propulsion	No. of	No. of operating generator by mode		
(kts)	A	В	mode	operating engine	G/T	generator mode + generator
1	0	0		0	2	2
2	0	0		0	2	2
3	5.4	0		0	2	2
4	1.6	0		0	2	2
5	15.8	0		0	3	3
6	1.2	0	motor	0	3	3
7	4.9	0	motor	0	3	3
8	2.6	28		0	3	3
9	0.8	7	BITIBUL	0	3	3
10	11.3	0		0	3	3
11	1.8	8		0	3	3
12	5.4	0		0	3	3
13	4	10	5	2	2	1
14	3.5	0	S	2	2	1
15	13	14	\geq	2	2	1
16	3.7	0		2	2	1
17	2.4	13		2	2	1
18	4.4	0		2	2	1
19	0.8	11		2	2	1
20	9.8	0		C2: 〔	2	1
21	0.3	4	G/I or generator mode	2	2	1
22	2.6	0		2	2	1
23	0.5	3		2	2	1
24	0	0		2	2	1
25	2.2	0		2	2	1
26	0.3	0		4	2	1
27	1.2	0		4	2	1
28	0	0		4	2	1
29	0	0		4	2	1
30	0.1	2		4	2	1
31	0.4	0		4	2	1

Table 6 Propulsion operation of the aegis destroyer

5.3.2.2 호위함

호위함의 추진체계 구성은 Parent ship의 추진체계 사양과 이탈리아 FREMM 추진체계 구성을 고려하여 Fig. 45와 같이 CODLOG로 구성한다.



Fig. 45 Propulsion system of the frigate

추진체계 운용모드는 추진전동기 운용모드, 가스터빈 운용모드, 양방향 전력 변환 발전기모드의 3가지로 구분하도록 한다. 추진전동기 운용모드는 디젤발전 기 2~4대에서 생성된 전력을 이용하여 추진전동기를 작동시켜 저속으로 함을 추진하는 모드이며, 가스터빈 운용모드는 추진전동기 작동 없이 가스터빈 1대 를 작동하여 함을 고속으로 추진하는 모드이다. 양방향 전력변환 발전기모드는 가스터빈으로 함 기동 상태에서 추진전동기를 발전기로 전환하여 가스터빈의 회전동력을 이용하여 전력을 생성하는 모드로 양방향 전력변환을 하는 상태이 다.



함 속력별 운용비율을 나타내는 운용 프로파일은 미 해군 DDS 200-2에 제시 된 FFG-7급 함정의 운용 프로파일을 프로파일 A로, 캐나다 호위함의 운용 프 로파일[25]을 프로파일 B로 구분하여 적용한다. 운용 프로파일 A는 저속(4kts)에 서 운용비율이 가장 높은 반면, 운용 프로파일 B는 15kts에서 운용 비율이 가 장 높은 차이점을 가지고 있다. Fig. 46은 DDS 200-2에 제시된 FFG-7급 함정 의 운용 프로파일을 나타낸다. Fig. 47은 운용 프로파일 A를 추진체계 운용모드 별로 구분하여 나타낸 것이며 Fig. 48은 운용 프로파일 B를 추진체계 운용모드 별로 구분하여 나타낸 것이다.



Fig. 46 Speed-time profile of FFG-7 class

발전기 용량은 엔진출력을 고려하여 대당 1,400kW로 하며, Jane's fighting ship에 따라 추진전동기는 1,650kW로 결정한다. 함내 전력부하는 유사함정이 추진부하를 제외하고 대당 1,000kW의 발전기를 적용하며 함내 전력부하가 발 전기 2대 용량의 약 75%를 차지함을 고려하여 1,500kW로 결정한다.



Fig. 47 Speed-time profile A by operation mode of frigate



Fig. 48 Speed-time profile B by operation mode of frigate

이지스구축함과 동일하게 호위함도 양방향 전력변환 발전기모드 사용 시 발 전기 작동 없이도 함내 전력부하를 수용 가능하기 때문에 발전기모드는 최소 1 대의 발전기를 함께 운용하는 개념과 발전기 작동 없이 발전기모드만으로 운용 하는 개념의 두 가지 발전기 운용개념을 고려하도록 한다.

Fig. 49는 호위함의 발전기와 추진엔진(가스터빈) 운용 대수를 함 속력 별로
나타낸 것이다. 대당 1,400kW의 디젤발전기는 1,500kW의 함내 부하전력, 발전 기 운전율 90% 및 소요추진력을 고려하여 5kts까지는 2대, 13kts까지는 3대, 15kts까지는 4대로 운용한다. 또한, 16kts부터는 발전기는 2대만 운용하여 가스 터빈으로 함을 추진하도록 하며, 가스터빈 운용 중 양방향 전력변환을 사용 시 양방향 전력변환 발전기모드로 생산되는 전력으로 함내 부하 1,500kW를 충당 할 수 있으므로 발전기는 0대 또는 1대를 운용하도록 한다. 가스터빈은 16kts 부터는 운용하여 최대속력 30kts까지 함을 추진한다.



Fig. 49 Operation of generator and propulsion engine of the frigate

앞서 설명한 호위함의 추진체계 운용개념을 정리하면 Table 7과 같이 함 속 력별 운용비율, 추진모드, 추진엔진 운용 대수 및 발전기 운용 대수를 나타낼 수 있다.

Speed	Profile (%)		Propulsion	No. of	No. of operating generator by mode		
(kts)	A	B B control operating engine G/T		G/T	generator mode + generator	generator mode	
1	0	0		0	2	2	2
2	0	0		0	2	2	2
3	0	2		0	2	2	2
4	36	0		0	2	2	2
5	0	0		0	2	2	2
6	0	4		0	3	3	3
7	0	0		0	3	3	3
8	0	0	motor	0	3	3	3
9	9	9		0	3	3	3
10	0	0	91.	0	3	3	3
11	6	0	S.	0	3	3	3
12	0	22	1	0	3	3	3
13	12	0		0	3	3	3
14	0	0	9	0	4	4	4
15	11	28.5		0	4	4	4
16	0	0		1	2	1	0
17	10	0	101	1	2	1	0
18	0	22.5		194	2	1	0
19	8	0		$\approx \mu^1 \sim 1$	2	1	0
20	0	0		\mathbb{Z}^{\prime}	2	1	0
21	6	6		1	2	1	0
22	0	0	G/T	1	2	1	0
23	0	0	OI	1	2	1	0
24	0	3	generator mode	1	2	1	0
25	0	0		1	2	1	0
26	0	0		1	2	1	0
27	0	2		1	2	1	0
28	0	0		1	2	1	0
29	0	0		1	2	1	0
30	2	1		1	2	1	0

Table 7 Propulsion operation of the frigate

5.3.2.3 군수지원함

군수지원함의 추진체계 구성은 Parent ship의 추진체계 사양 및 구성을 고려 하여 Fig. 50과 같이 CODLOD 체계로 한다. Parent ship이 양방향 전력변환을 사용하도록 설계가 되어 있어 디젤발전기는 2대만 반영되어 있다.



Fig. 50 Propulsion system of the auxiliary oiler

추진체계 운용모드는 추진전동기 운용모드, 디젤엔진 운용모드, 양방향 전력 변환 발전기모드의 3가지로 구분하도록 한다. 추진전동기 운용모드는 발전기 2 대에서 생성된 전력을 이용하여 추진전동기를 작동시켜 저속으로 함을 추진하 는 모드이며, 디젤엔진 운용모드는 추진전동기 작동 없이 디젤엔진 2대를 작동 하여 함을 고속으로 추진하는 모드이다. 양방향 전력변환 발전기모드는 디젤엔 진으로 함 기동 상태에서 추진전동기를 발전기로 전환하여 디젤엔진의 회전동 력을 이용하여 전력을 생성하는 모드로 양방향 전력변환을 하는 상태이다.



함 속력별 운용비율을 나타내는 운용 프로파일은 미 해군 DDS 200-2에 제시 된 AOE-6급 함정의 운용 프로파일을 프로파일 A로 나타낸다. Fig. 51은 DDS 200-2에 제시된 AOE-6급 함정의 운용 프로파일을 나타낸다. AOE-6급 함정의 최대속력이 24kts 이므로 군수지원함의 최대속력 18kts에 맞춰서 함 속력별 운 용비율을 조정하여 적용하도록 한다. 또한, 군수지원함은 화물수송, 유류공급 등 다양한 용도로 운용될 수 있으므로 중간 속력에서 운용 비율을 높인 운용 프로파일 B도[26] 함께 고려하여, 운용 프로파일 변경에 따른 양방향 전력변환 효과를 확인하도록 한다. Fig. 52는 운용 프로파일 A를 추진체계 운용모드 별로 구분하여 나타냈으며, Fig. 53은 운용 프로파일 B를 추진체계 운용모드 별로 구



Fig. 51 Speed-time profile of AOE-6 class

발전기 용량은 Parent ship 사양을 고려하여 대당 3,170kW로 하며 추진전동 기는 1,000kW로 결정한다. 함내 전력부하는 유사함정의 함내 전력부하가 발전 기 2대 용량의 약 75% 차지함과 군수지원함의 발전기 용량에 추진부하가 반영 됨을 고려하여 1.5대 발전기 용량의 약 75%를 반영하여 3,566kW로 결정한다.



Fig. 52 Speed-time profile A by operation mode of auxiliary oiler



Fig. 53 Speed-time profile B by operation mode of auxiliary oiler

호위함과 동일하게 군수지원함도 양방향 전력변환 발전기모드 사용 시 발전 기 작동 없이도 함내 전력부하를 수용 가능하기 때문에 발전기모드는 최소 1대 의 발전기를 함께 운용하는 개념과 발전기 작동 없이 발전기모드만으로 운용하 는 개념의 두 가지 발전기 운용개념을 고려하도록 한다.

Fig. 54는 군수지원함의 발전기와 추진엔진(디젤엔진) 운용 대수를 함 속력 별로 나타낸다. 대당 3,170kW의 디젤발전기는 3,566kW의 함내 부하전력, 발전

기 운전율 90% 및 소요추진력을 고려하면 전 속력 구간에서 지속적으로 2대 운용이 필요하다. 그러나 군수지원함은 해상보급장치를 운용하는 12~14kts에서 4,000kW의 전력이 추가로 소요되기 때문에 해상보급장치를 운용하면서 양방향 전력변환 발전기모드를 사용하지 않을 경우, 2대의 발전기로는 운용이 불가하 다. 따라서 Fig. 54에는 군수지원함의 발전기가 2대만 반영되어 있음에도 불구 하고 양방향 전력변환을 하지 않는 가스터빈 모드의 경우 3대의 발전기가 필요 한 것으로 표시되었다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 군수지원함의 Parent ship이 해상보급장치를 운용할 경우에는 양방향 전력변환을 사용하도록 설계된 함정이기 때문이다. 만일 양방향 전력변환을 적용하지 않고 함정 설계를 했다 면 디젤발전기 2대를 추가하여 총 4대의 디젤발전기가 소요될 수 있다. 실제 양방향 전력변환을 적용하지 않은 군수지원함의 경우 비효율적으로 대용량의 발전기를 4대씩 탑재하고 있다.



Fig. 54 Operation of generator and propulsion engine of the auxiliary oiler

9kts부터는 발전기를 2대 운용하며 디젤엔진으로 함을 추진하도록 하고, 디젤

엔진 운용 중 양방향 전력변환을 사용 시 양방향 전력변환 발전기모드로 생산 되는 전력으로 함내 부하를 충당할 수 있으므로 발전기는 0대 또는 1대를 운용 하도록 한다. 단, 대용량의 전력이 소요되는 해상보급장치를 운용하는 12~14kts 구간에서는 발전기를 2대 운용하도록 한다. 디젤엔진은 9kts 부터 2대를 운용하 여 최대속력 18kts까지 함을 추진한다.

앞서 설명한 군수지원함의 추진체계 운용개념을 정리하면 Table 8과 같이 함 속력별 운용비율, 추진모드, 추진엔진 운용 대수 및 발전기 운용 대수를 나타낼 수 있다.

Speed	Profile (%)		Dropulsion	No. of	No. of operating generator by mode		
(kts)	A	В	mode	operating engine	D/E	generator mode + generator	generator mode
1	0	0	6	0	2	2	2
2	0	0	motor	0	2	2	2
3	0	0		0	2	2	2
4	0	0		0	2	2	2
5	0	0		0	2	2	2
6	0	4	N a	0	2	2	2
7	24	5		0	2	2	2
8	11	6		0	2	2	2
9	0	7		2	2	1	0
10	15	8		2	2	1	0
11	16	9		2	2	1	0
12	0	10	D/E	2	3	2	2
13	14	11	or	2	3	2	2
14	9	12	generator	2	3	2	2
15	0	10	mode	2	2	1	0
16	6	8		2	2	1	0
17	0	6		2	2	1	0
18	5	4		2	2	1	1

Table 8 Propulsion operation of the auxiliary oiler

또한, 앞서 설명한 시뮬레이션 대상 함정인 이지스구축함, 호위함, 군수지원 함의 주요 사양을 정리하면 Table 9와 같다.

Specification	Aegis destroyer	Frigate	Auxiliary oiler	
Max. 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)	
Max. speed by motors	12 kts	15 kts	8 kts	
Shipboard load	4,500 kW	1,500 kW	3,566 kW	

Table 9 Specification of aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler



5.4 추진체계 모델링

5.4.1 이지스구축함

추진체계는 LabVIEW 프로그램을 사용하여 모델링하였다. 공개된 함정 소요 추진력 자료 및 장비 데이터에서 선형 회귀분석 및 보간법을 통해 선형적인 수 식을 도출하고 이를 모델링에 적용하였다. 이지스구축함은 DDG-51급 함속에 따른 소요추진력 및 추진기관/발전기의 연료소비율 자료를 활용하여 선형적인 수식을 도출하여 시뮬레이션을 수행하였다[27, 28].

이지스구축함의 추진기관인 LM2500 가스터빈 엔진의 연료소비율은 참고문헌 [16]에 제시된 LM2500의 연료소비율 곡선을 보간법을 이용하여 모델링 하였으 며 추진기관출력(x)에 따른 연료소비율(ME_{SFC})의 관계를 수식으로 나타내면 다 음과 같다.

$$ME_{SFC} = (1.0238 \times 10^{-33})x^8 - (1.2722 \times 10^{-28})x^7 + (6.6283 \times 10^{-24})x^6$$

$$- (1.882 \times 10^{-19})x^5 + (3.1714 \times 10^{-15})x^4 - (3.2444 \times 10^{-11})x^3$$

$$+ (1.9882 \times 10^{-7})x^2 - 0.00069985x + 1.4902$$
(16)

식 (16)을 이용하여 이지스구축함의 추진기관인 LM2500 가스터빈 엔진을 모 델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 추진기관의 연료소비율 그래프는 Fig. 55 와 같다.

이지스구축함의 발전기인 501K 가스터빈 발전기의 연료소비율은 참고문헌 [16] 에 제시된 501K의 연료소비율 곡선을 보간법을 이용하여 모델링 하였으며 발전 기출력(*x*)에 따른 연료소비율(*GE*_{SFC})의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$GE_{SFC} = -(2.4857 \times 10^{-21})x^{6} + (3.682 \times 10^{-17})x^{5} - (1.775 \times 10^{-13})x^{4}$$
(17)
+ (4.4001 \times 10^{-10})x^{3} - (4.288 \times 10^{-7})x^{2} - 0.00015837x + 0.76261



Fig. 55 SFC of engine in aegis destroyer

식 (17)를 이용하여 이지스구축함의 발전기인 501K 가스터빈 발전기를 모델 링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 발전기의 연료소비율 그래프는 Fig. 56과 같 다.

이지스구축함의 함 속력에 따른 소요추진력은 참고문헌 [29]에 제시된 DDG-51 이지스구축함의 소요추진력 곡선을 보간법을 이용하여 모델링 하였으 며 함 속력(v)에 따른 소요추진력(P_v)의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{n} = 0.10413v^{4} - 1.5043v^{3} + 3.8851v^{2} + 180.08v + 170.28$$
⁽¹⁸⁾

식 (18)를 이용하여 이지스구축함의 함 속력에 따른 소요추진력을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 소요추진력 그래프는 Fig. 57과 같다.





Fig. 56 SFC of generator in aegis destroyer



Fig. 57 Required shaft power of aegis destroyer

4.4.2 호위함

호위함도 이지스구축함과 동일한 방법으로 유사 실적함정의 함속에 따른 소 요추진력 및 추진기관/발전기의 연료소비율 자료를 활용하여 선형적인 수식을 도출하여 시뮬레이션을 수행하였다.

호위함의 추진기관인 MT3040 가스터빈 엔진의 연료소비율은 참고문헌 [30]에 제시된 MT3040의 연료소비율 곡선을 보간법을 이용하여 모델링 하였으며 추진 기관출력(x)에 따른 연료소비율(ME_{SFC})의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.





Fig. 58 SFC of engine in frigate

식 (19)를 이용하여 호위함의 추진기관인 MT3040 가스터빈 엔진을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 추진기관의 연료소비율 그래프는 Fig. 58과 같다. 부하가 낮을수록 연료소비율이 높아지는 가스터빈 엔진의 연료소비율 특성을 나타내고 있는데, 가스터빈 엔진의 부하가 낮은 함 저속 구간에서는 가스터빈 운용 대신 추진전동기를 이용하여 함을 추진하는 것이 에너지 효율을 높일 수 있음을 확인 할 수 있다.

호위함의 발전기인 12V1163 디젤발전기의 연료소비율은 제작사의 연료소비율 곡선을 보간법을 이용하여 모델링하였으며 발전기출력(x)에 따른 연료소비율 (GE_{SFC})의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

 $GE_{SFC} = (3.742565617 \times 10^{-10})x^4 - (1.384623892 \times 10^{-6})x^3 + 0.001890074x^2 \quad (20) \\ - 1.175284536x + 516.543288724$

식 (20)을 이용하여 호위함의 발전기인 12V1163 디젤발전기를 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 발전기의 연료소비율 그래프는 Fig. 59와 같다.



Fig. 59 SFC of generator in frigate



호위함의 함 속력에 따른 소요추진력은 유사 실적함의 소요추진력 곡선을 보 간법을 이용하여 모델링 하였으며 함 속력(v)에 따른 소요추진력(P_p)의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_p = 0.067276v^4 - 0.90491v^3 - 5.4641v^2 + 242.15v - 6.9106$$
(21)

식 (21)을 이용하여 호위함 함 속력에 따른 소요추진력을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 소요추진력 그래프는 Fig. 60과 같다. Fig. 60에서 추진전동 기로 함을 추진하는 15kts까지는 함 소요추진력이 완만하게 증가하지만 16kts 이상의 속력에서는 함 소요추진력이 급격히 증가되어 가스터빈 엔진 사용이 필 요한 소요추진력 경향을 나타낸다.



Fig. 60 Required shaft power of frigate

4.4.3 군수지원함

군수지원함도 호위함과 동일한 방법으로 유사 실적함정의 함속에 따른 소요 추진력 및 추진기관/발전기의 연료소비율 자료를 활용하여 선형적인 수식을 도 출하여 시뮬레이션을 수행하였다.

군수지원함의 추진기관인 디젤엔진 및 디젤발전기 모델의 연료소비율은 제작 사에서 제시한 Table 10과 같다.

Load (%)	Diesel engine SFC (kg/kwh)	Diesel generator SFC (kg/kwh)
25	0.2101	
50	0.1895	0.193
75	0.1864	0.182
85	0.1811	0.181
90	0.1857	(-
100	0.1865	0.184
110	0.1943	-

Table 10 SFC of diesel engine and generator for auxiliary oiler

Table 10에 제시된 디젤엔진의 연료소비율을 보간법을 이용하여 모델링 하였으며 추진기관출력(x)에 따른 연료소비율(ME_{SFC})의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$ME_{SFC} = (2.1204 \times 10^{-13})x^4 - (4.2297 \times 10^{-9})x^3 + (3.1155 \times 10^{-5})x^2$$
(22)
- 0.1026x + 317.1609

식 (22)를 이용하여 군수지원함의 디젤엔진을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 추진기관의 연료소비율 그래프는 Fig. 61과 같다.



Fig. 61 SFC of engine in auxiliary oiler

Table 10에 제시된 디젤발전기의 연료소비율을 보간법을 이용하여 모델링 하 였으며 발전기출력(x)에 따른 연료소비율(*GE_{sFC}*)의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$GE_{SFC} = (1.43418 \times 10^{-9})x^3 + (1.20385 \times 10^{-7})x^2 - 0.03147x + 236.86884$$
(23)

식 (23)을 이용하여 군수지원함의 디젤발전기를 모델링한 LabVIEW 프로그램 과 산출된 디젤발전기의 연료소비율 그래프는 Fig. 62와 같다.



Fig. 62 SFC of generator in auxiliary oiler

군수지원함의 함 속력에 따른 소요추진력은 참고문헌 [26]에 제시된 Logistic support vessel의 소요추진력 곡선을 보간법을 이용하여 모델링 하였으며 함 속 력(v)에 따른 소요추진력(P_n)의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{v} = 0.0759v^{4} - 0.4446v^{3} + 22.8248v^{2} - 7.4447v + 0.4129$$
⁽²⁴⁾

식 (24)를 이용하여 군수지원함의 함 속력에 따른 소요추진력을 모델링한 LabVIEW 프로그램과 산출된 소요추진력 그래프는 Fig. 63과 같다.

Fig. 63에서 추진전동기로 함을 추진하는 8kts까지는 함 소요추진력이 완만하 게 증가하지만 9kts 이상의 속력에서는 함 소요추진력이 급격히 증가되어 대용 량의 디젤엔진 사용이 필요한 소요추진력 경향을 나타낸다.



Fig. 63 Required shaft power of auxiliary oiler

Fig. 64는 이지스구축함, 호위함, 군수지원함 추진체계를 LabVIEW 프로그램 으로 모델링한 블록다이그램을 나타낸다.



Fig. 64 Propulsion system block diagram for aegis destroyer, frigate and auxiliary oiler

- 75 -

5.5 시뮬레이션 분석

5.5.1 연료비 절감 효과

양방향 전력변환 적용에 따른 연료 절감효과를 확인하기 위해 각 함정별 시 뮬레이션 결과를 바탕으로 두 종류의 함 운용 프로파일에 대해 연간 연료소비 량을 비교 분석한다.

5.5.1.1 이지스구축함

Collection @ kmou

이지스구축함의 추진전동기모드(HED M) 및 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG1)의 함 속력별 연료소비율은 Fig. 65에 나타낸다. 가스터빈 발전기가 저 부 하에서 연료소비율이 높기 때문에 약 5kts 이하에서는 높은 연료소비율을 나타 내며, 추진전동기모드(HED M)의 경우 13kts에서 급격히 연료소비율이 상승하는 데 이는 가스터빈으로 함을 추진하기 때문이며, 함 속력이 증가하면서 추진부 하 증가에 따라 연료소비율이 떨어지는 특성을 보여주고 있다. 반면 양방향 전 력변환 발전기모드(HED MG 1)의 경우 함 속력이 증가하면서 효율적인 에너지 활용으로 연료소비율이 안정적으로 감소되는 특성을 보여 주고 있다.



Fig. 65 Fuel consumption rate by speed of aegis destroyer

Fig. 66은 기존 기계식추진체계(COGAG)에 추진전동기를 추가 적용한 이지스 구축함의 함 속력 별 운용 프로파일 A 경우에 기계식 모드(Mac), 추진전동기모 드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG1)의 연간 연료소비량 비교 를 나타낸다.

Fig. 67은 이지스구축함의 함 속력 별 운용 프로파일 B 경우에 기계식 모드 (Mac), 추진전동기모드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG1)의 연 간 연료소비량 비교를 나타낸다.



Fig. 66 Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile A



Fig. 67 Fuel consumption by speed of aegis destroyer-profile B

Fig. 66 및 Fig. 67에서 함 운용 프로파일 A와 B 모두 기계식 모드가 연료소 비량이 가장 높고, 양방향 전력변환 발전기모드가 가장 연료소비량이 낮음을 확인할 수 있다.

Fig. 68은 기계식 모드(Mac)와 추진전동기모드(HED M) 및 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG1) 간의 연료소비량의 차이, 즉 연료절감량을 나타낸다.



Fig. 68 Fuel consumption of aegis destroyer-profile A & B

Fig. 66 및 Fig. 68에서 함 운용 프로파일 A의 경우, 이지스구축함은 가스터빈 발전기를 사용하는 특성에 따라 저속에서 높은 연료소비량을 보이며 추진전동 기모드를 적용할 경우 5kts 근방에서 약 250톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다.

또한 발전기모드를 추가로 적용하였을 때는 13~16kts 사이에서 연료절감량이 많은 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 추진전동기 모드 적용 시 기계식 대비 연료소비량이 현저히 줄어들며, 발전기모드 추가 적용을 통해 연료소비량이 더 욱 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Fig. 68에서 함 운용 프로파일 B의 경우, 함 속력 8kts 부터 속력이 반영된 특성에 따라 추진전동기모드를 적용 할 경우 8kts 근방에서 약 400톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다. 또한, 발전기모드를 추가로 적용하였을 때는 13~17 kts 사이에서 연료절감량이 많은 것을 확인할 수 있다. 프로파일 A와 유사하게 추진전동기 모드 적용 시 기계식 대비 연료소비량이 현저히 줄어들며, 발전기 모드 추가 적용을 통해 연료소비량이 더욱 줄어든 것을 알 수 있다. Fig. 68에 서 함 운용 프로파일 B가 함 운용 프로파일 A대비 양방향 전력변환 발전기모 드 적용 시 연료절감량이 더 많은 것을 확인 할 수 있다.



Fig. 69 Annual fuel consumption and fuel saving of aegis destroyer

Fig. 69는 운용 프로파일 별로 이지스구축함의 연간 연료소비량과 양방향 전 력변환 발전기모드 적용에 따른 연간 연료절감량을 나타낸다. 운용 프로파일 A 의 경우 연간 약 361톤, B의 경우 연간 약 449톤의 연료를 절감할 수 있는데, Fig. 70과 같이 운용 프로파일 B의 경우 양방향 전력변환이 가능한 13kts 이상 의 함 속력에서 함 운용비율이 프로파일 A 보다도 더 높기 때문이다. 즉 가스 터빈을 운용하는 속력 구간에서 함 운용비율이 더 높다면, 양방향 전력변환에 따른 연료절감 효과는 더 높아진다고 볼 수 있다.



5.5.1.2 호위함

호위함의 추진전동기모드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드의 함 속력 별 연료소비율은 Fig. 71에 나타낸다.

Fig. 71에서 발전기모드는 발전기 1대를 함께 운용하는 경우(HED MG1)와 발 전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 경우(HED MG0) 두 가 지를 고려한다. 디젤발전기가 저 부하에서 연료소비율이 높은 특성에 따라 약 3kts 이하에서는 높은 연료소비율을 나타내며, 16kts에서 급격히 연료소비율이

상승하는데 이는 대용량의 가스터빈기관으로 함을 추진하기 때문이며, 함 속력 이 증가하면서 추진부하 증가에 따라 가스터빈의 효율이 높아지면서 연료소비 율이 떨어지는 특성을 보여주고 있다. 양방향 전력변환 발전기모드를 사용할 경우 연료소비율이 상대적으로 낮은 것을 보여 주고 있으며, 양방향 전력변환 발전기모드 만 사용하는 경우 연료소비율이 더 낮음을 알 수 있다.



Fig. 71 Fuel consumption rate by speed of frigate



Fig. 72 Annual fuel consumption by speed of frigate-profile A



Fig. 73 Annual fuel consumption by speed of frigate-profile B

호위함의 함 속력별 운용 프로파일 A 경우에 추진전동기모드만 적용한 경우 와 양방향 전력변환 발전기모드를 적용한 경우의 연간 연료소비량을 Fig. 72에 나타내며, 함 속력별 운용 프로파일 B 경우의 연간 연료소비량은 Fig. 73에 나 타낸다. Fig. 72 및 Fig. 73에서 함 운용 프로파일 A와 B 모두의 경우, 양방향 전력변환 발전기모드를 적용하면 연료소비량이 낮아짐을 확인할 수 있으며, 발 전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 경우 연료소비량이 더 낮아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 74는 추진전동기모드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG1) 및 발전기 작동이 없는 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG0)간의 연료소비량 의 차이, 즉 연료절감량을 나타낸다.

Fig. 74에 나타낸 함 운용 프로파일 A의 경우 발전기모드가 작동하는 16kts부 터 연료절감 효과가 나타나며 발전기 1대와 함께 운용하는 발전기모드(HED MG1)의 경우 17kts에서 약 50톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다. 또한, 발 전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 발전기모드(HED MG 0)의 경우 연료절감 효과가 더 높은 것을 확인할 수 있는데 17kts에서 약 90톤 의 연료가 절감된다.





Fig. 74 Fuel consumption of frigate-profile A & B

Fig. 74에 나타낸 함 운용 프로파일 B의 경우 HED MG1의 경우 18kts에서 약 100톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다. 또한, HED MG0의 경우 프로파일 A 와 유사하게 연료절감 효과가 더 높은 것을 확인할 수 있는데 18kts에서 약 190톤의 연료가 절감된다.

Fig. 75는 운용 프로파일 별로 호위함의 연간 연료소비량과 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따른 연간 연료절감량을 나타낸다. 함 운용 프로파일 A의 경우 HED MG1는 연간 약 104톤, HED MG0는 연간 약 193톤을 절감할 수 있 다. 함 운용 프로파일 B의 경우 각각 연간 133톤, 244톤의 연료를 절감할 수 있다. 함 운용 프로파일 B가 함 운용 프로파일 A 대비 연료절감효과가 약 26% 더 높으며, 함 운용 프로파일 A의 경우 발전기모드만 사용하면 약 86% 추가적 인 연료절감이 가능하며, 함 운용 프로파일 B의 경우 발전기모드만 사용하면 약 83% 추가적인 연료절감이 가능하다.





Fig. 75 Annual fuel consumption and fuel saving of frigate



Fig. 76 Profile A and B of frigate

Fig. 76은 호위함의 함 속력 별 운용 프로파일 A와 B를 나타내는데, 운용 프 로파일 B의 경우 양방향 전력변환이 가능한 16kts 이상의 함 속력에서 함 운용 비율이 프로파일 A 보다도 더 높기 때문에 상대적으로 더 높은 연료절감효과 를 나타낸다. 즉 가스터빈을 운용하는 속력 구간에서 함 운용비율이 더 높다면, 양방향 전력변환에 따른 연료절감 효과는 더 높아진다고 볼 수 있으며, 고속 구간보다는 가스터빈의 효율이 낮은 중속 구간에서 운용비율이 높을수록 더 높 은 연료절감 효과를 볼 수 있다.

양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서 발전기를 함께 운용하는 경우 함 내 전력부하 일부를 발전기가 분담하게 된다. 이 때 함내 전력부하를 추진엔진 과 발전기에 각각 몇 대 몇으로 분배할지는 추진엔진 및 발전기에 가해지는 부 하율에 따라 연료소비량을 증감시킬 수 있으므로 신중히 고려해야 한다. Fig. 77은 양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서 발전기를 함께 운용하는 경우 함내 전력부하에 대한 추진엔진과 발전기의 분배비율별 함 속력에 대한 연간 연료절감량을 나타낸다.



Fig. 77 Annual fuel saving by load sharing ratio of a propulsion engine and a generator for frigate

Fig. 77에서 함내 전력부하에 대해 추진엔진과 발전기 부하 분담율이 90%:10% 인 경우가 연료절감량이 가장 많은 것을 나타낸다. 추진엔진의 분담비율이 높을수록, 발전기의 분담비율이 낮을수록 연료절감량이 많은 것을 알 수 있다. 즉 발전기가 매우 낮은 부하로 높은 연료 소비를 하더라도 가스터빈 엔진의 부하를 증가시키는 것이 연료절감량이 더 많은 것을 나타낸다. 가스터빈 엔진이 디젤발전기보다 용량이 크고 저 부하에서 연료소비율이 높기 때문에 이와 같은 현상이 나타난 것이다. 따라서 대용량의 가스터빈엔진과 디젤발전기를 적용한 함정에서 양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서 발전기 한대를 함께 운용하는 경우 가스터빈엔진의 부하율을 최대로 하고 발전기의 부하율을 최

5.5.1.3 군수지원함

군수지원함의 추진전동기모드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드의 함 속력별 연료소비율은 Fig. 78에 나타낸다. 발전기모드는 발전기 1대를 함께 운 용하는 경우(HED MG1)와 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사 용하는 경우(HED MG0) 두 가지를 고려한다. 대용량 디젤발전기가 저 부하에서 연료소비율이 높은 특성에 따라 6kts 이하의 낮은 함 속력에서는 높은 연료소 비율을 나타내며, 9kts에서 함 속력 증가에 따른 연료소비율 감소가 작아지는데 이는 추진전동기 대신 디젤기관으로 함을 추진하기 때문이다. 또한 대용량의 전력이 소요되는 해상보급장치(RAS, Replenishment At Sea)를 운용하는 12~14kts에서 연료소비율이 상승하는 것을 알 수 있다. 전반적으로 함 속력이 증가하면서 추진부하 증가에 따라 디젤엔진의 효율이 높아지면서 연료소비율이 떨어지는 특성을 보여주고 있다. 양방향 전력변환 발전기모드를 사용할 경우 연료소비율이 상대적으로 낮은 것을 보여 주고 있으며, 양방향 전력변환 발전 기모드만 사용하는 경우 연료소비율이 더 낮음을 알 수 있다.





Fig. 78 Fuel consumption rate by speed of auxiliary oiler

군수지원함의 함 속력별 운용 프로파일 A 경우에 추진전동기모드만 적용한 경우와 양방향 전력변환 발전기모드를 적용한 경우의 연간 연료소비량을 Fig. 79에 나타내며, 함 속력별 운용 프로파일 B 경우의 연간 연료소비량은 Fig. 80 에 나타낸다. Fig. 79 및 Fig. 80에서 함 운용 프로파일 A와 B 모두의 경우, 양 방향 전력변환 발전기모드를 적용하면 연료소비량이 낮아짐을 확인할 수 있으 며, 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 경우 연료소비 량이 더 낮아짐을 확인할 수 있다.



Fig. 79 Annual fuel consumption by speed of auxiliary oiler-profile A



Fig. 80 Annual fuel consumption by speed of auxiliary oiler-profile B



Fig. 81 Fuel consumption of auxiliary oiler-profile A & B

Fig. 81은 추진전동기모드(HED M)와 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG1)

및 발전기 작동이 없는 양방향 전력변환 발전기모드(HED MG0)간의 연료소비량 의 차이, 즉 연료절감량을 나타낸다.

Fig. 81에 나타낸 운용 프로파일 A의 경우 발전기모드가 작동하는 9kts부터 연료절감 효과가 나타나며 발전기 1대와 함께 운용하는 발전기모드(HED MG1) 의 경우 10kts에서 약 80톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다. 또한, 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 발전기모드(HED MG0)의 경 우 연료절감 효과가 더 높은 것을 확인할 수 있는데 10kts에서 약 120톤의 연 료가 절감된다. 대용량의 전력이 소요되는 해상보급장치를 운용하는 12~14kts에 서는 모든 발전기를 사용해야 하므로 발전기모드 간의 연료절감효과 차이가 없 는 특성을 보인다.

Fig. 81에 나타낸 운용 프로파일 B의 경우 발전기 1대와 함께 운용하는 발전 기모드(HED MG1)의 경우 9kts에서 약 50톤의 연료가 절감됨을 확인할 수 있 다. 또한, 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 발전기모 드(HED MG0)의 경우 운용 프로파일 A와 유사하게 연료절감 효과가 더 높은 것을 확인 할 수 있는데 9kts에서 약 80톤의 연료가 절감된다. 또한, 해상보급 장치를 운용하는 12~14kts에서는 발전기모드 간의 연료절감효과 차이가 없다.

Fig. 82는 운용 프로파일 별로 군수지원함의 연간 연료소비량과 양방향 전력 변환 발전기모드 적용에 따른 연간 연료절감량을 나타낸다.

운용 프로파일 A의 경우 HED MG1은 연간 약 240톤, HED MG0은 연간 약 339톤을 절감할 수 있다. 운용 프로파일 B의 경우 각각 연간 291톤, 396톤의 연료를 절감할 수 있다. 운용 프로파일 B가 운용 프로파일 A 대비 연료절감효 과가 약 21% 더 높으며, 함 운용 프로파일 A의 경우 발전기모드만 사용하면 약 41% 추가적인 연료절감이 가능하며, 함 운용 프로파일 B의 경우 발전기모 드만 사용하면 약 36% 추가적인 연료절감이 가능하다.





Fig. 82 Annual fuel consumption and fuel saving of auxiliary oiler

Fig. 83은 군수지원함의 함 속력별 운용 프로파일 A와 B를 나타내는데, 운용 프로파일 B의 경우 양방향 전력변환이 가능한 9kts 이상의 함 속력에서 함 운 용비율이 프로파일 A보다도 더 높기 때문에 상대적으로 더 높은 연료절감효과 를 나타낸다. 즉 디젤엔진을 운용하는 속력 구간에서 함 운용비율이 더 높다면, 양방향 전력변환에 따른 연료절감 효과는 더 높아진다고 볼 수 있으며, 고속 구간보다는 디젤엔진의 효율이 낮은 중속 구간에서 운용비율이 높을수록 더 높 은 연료절감 효과를 볼 수 있다. 또한 대용량의 전력이 소요되는 해상보급장치 (RAS)를 운용하는 12~14kts에서는 모든 발전기와 디젤엔진이 작동되어야 하고 양방향 전력변환 효과를 얻을 수 없으므로 이 속력 구간에서 함 운용비율이 낮 을수록 상대적으로 더 높은 연료절감효과를 얻을 수 있다.



Fig. 83 Profile A and B of auxiliary oiler

Fig. 84는 양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서 발전기를 함께 운용하는 경우 함내 전력부하에 대한 추진엔진과 발전기의 분배비율별 함 속력에 대한 연간 연료절감량을 나타낸다.



Fig. 84 Annual fuel saving by load sharing ratio of propulsion engines and a generator for auxiliary oiler

Fig. 84에서 함내 전력부하에 대해 추진엔진과 발전기 부하 분담율이 90%:10% 인 경우가 연료절감량이 가장 많은 것을 나타낸다. 단, 18kts에서는 추 진부하가 높아서 추진엔진의 함내 전력부하 분담율을 40% 이상 적용할 경우 추진엔진의 부하율이 100%를 초과하기 때문에 추진엔진의 함내 전력부하 분담 율은 40%만 적용하였다. 추진엔진의 분담비율이 높을수록, 발전기의 분담비율 이 낮을수록 연료절감량이 많은 것을 알 수 있다. 즉 발전기가 매우 낮은 부하 로 높은 연료 소비를 하더라도 디젤엔진의 부하를 증가시키는 것이 연료절감량 이 더 많은 것을 나타낸다. 디젤엔진이 디젤발전기보다 용량이 크기 때문에 이 와 같은 현상이 나타난 것이다. 따라서 대용량의 디젤엔진과 디젤발전기를 적 용한 함정에서 양방향 전력변환 발전기모드를 운용하면서 발전기 한대를 함께 운용하는 경우 디젤엔진의 부하율을 최대로 하고 발전기의 부하율을 최소로 적

5.5.1.4 연료비 절감 효과 종합

Collection @ kmou

함정 종류별 연료절감효과를 비교하기 위해 이지스구축함, 호위함, 군수지원 함의 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따른 연간 연료절감량을 Fig. 85에 나타내었다. 양방향 전력변환 발전기모드와 발전기를 함께 운용하는 경우 가스 터빈기관과 가스터빈발전기를 적용하는 이지스구축함은 운용 프로파일에 따라 연간 약 361~449톤의 연료를 절감하여 연구 대상 함정 중에 연료절감량이 가장 많고, 대용량의 디젤기관과 디젤발전기를 적용한 군수지원함은 운용 프로파일 에 따라 연간 약 240~291톤의 연료를 절감하며, 호위함의 경우 상대적으로 연 료절감 효과는 낮으나 연간 약 104~133톤의 연료를 절감함을 알 수 있다.

또한, 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만을 운용하는 경우 연 료 절감 효과는 더 높은데, 군수지원함은 운용 프로파일에 따라 연간 약 339~396톤의 연료를 절감하며, 호위함은 운용 프로파일에 따라 연간 약

193~244톤의 연료를 절감함을 알 수 있다.



Fig. 85 Annual fuel saving in bidirectional power conversion

다수의 가스터빈 기관 또는 발전기를 적용하거나 대용량의 디젤엔진을 적용 한 함정일수록 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따른 연료 절감효과는 더 높게 나타남을 알 수 있다.

복합식 전기추진체계를 적용한 함정에 연료비 절감량을 최대화하기 위한 방 안을 본 연구 결과를 바탕으로 제시하면 다음과 같다.

- 추진엔진을 사용할 때 양방향 전력변환 발전기모드를 적용한다.
- 가능한 발전기를 운용하지 않고 양뱡향 전력변환 발전기모드만 적용한다.
- 양방향 전력변환 발전기모드와 발전기를 동시에 운전해야 한다면 발전기의
 부하를 최소화하고 양방향 전력변환 발전기모드의 출력을 높인다.
- 함 운용 프로파일과 추진엔진 및 발전기의 연료소비율 등을 고려하여 추진
 체계를 자동으로 제어하는 기관제어감시체계를 최적화 설계한다.
5.5.2 정비비용 절감 효과

복합식 전기추진체계에 양방향 전력변환 적용으로 얻을 수 있는 효과로는 연료비 절감효과와 더불어 가스터빈 또는 디젤발전기의 운용시간 감소에 따른 정비비용 절감효과가 있다. 가스터빈 또는 디젤발전기의 정비 특성은 평균정비 시간(MTTR, Mean Time To Repair)과 고장간평균시간(MTBF, Mean Time Between Failures)으로 나타낼 수 있다. 평균정비시간(MTTR)은 규정된 조건하 에서 특정한 주기기간 동안 어느 특정한 수리 수준에서의 품목의 고장정비 시 간의 합을 총 고장 정비행위 수로 나눈 값이며, 고장간평균시간(MTBF)은 수리 가능한 시스템에서 고장간의 평균 시간으로 수리 가능한 품목의 신뢰성 특성치 를 표현하는 단위를 말한다[31]. 가스터빈 또는 디젤발전기의 평균정비시간은 장비 모델별로 정해져 있으므로 가스터빈 또는 디젤발전기의 공용시간 감소는 발전기의 정비 또는 취외 주기를 증가시킬 수 있다. 예를 들어 발전기의 평균 정비시간이 17,000시간이고, 연중 운용시간이 1,700시간이면 정비 주기는 약 10 년인데, 운용시간이 1,500시간이 되면 정비 주기는 약 11.3년으로 늘어나게 된 다. Fig. 86은 양방향 전력변환 적용에 따른 운용 프로파일 별로 이지스구축함 가스터빈 발전기들의 연간 운용시간 및 운용시간 감소량을 나타낸다.



Fig. 86 Reduction of generator operating time in aegis destroyer

이지스구축함 운용 프로파일 A의 경우 가스터빈 발전기 3대의 연간 운용시간 합계는 7,323시간이며 양방향 전력변환 발전기모드를 작동할 경우 가스터빈 발 전기 3대의 연간 운용시간 합계는 5,887시간으로 1,437시간이 감소된다. 즉 양 방향 전력변환 발전기모드 적용에 따라 가스터빈 발전기의 연간 운용시간은 약 20% 감소됨을 나타낸다.

반면 운용 프로파일 B의 경우 양방향 전력변환 발전기모드를 작동할 경우 가 스터빈 발전기 3대의 연간 운용시간은 1,664시간이 감소되며, 약 24% 감소됨을 나타내는데, 운용 프로파일 B가 연료절감효과가 더 높은 결과가 나온 것과 같 이 연간 가스터빈 발전기 운용시간도 더 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 87은 양방향 전력변환 적용에 따른 운용 프로파일 별로 호위함 디젤발전 기들의 연간 운용시간 및 운용시간 감소량을 나타낸다. 호위함 운용 프로파일 A의 경우 디젤발전기 4대의 연간 운용시간 합계는 7,271시간이며 양방향 전력 변환 발전기모드를 작동할 경우 디젤발전기 4대의 연간 운용시간 합계는 6,512 시간으로 759시간이 감소되며, 발전기 운용 없이 양방향 전력변환 발전기모드 만 사용하는 경우 디젤발전기 4대의 연간 운용시간 합계는 5,752시간으로 1,518 시간 감소된다. 즉 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따라 디젤발전기의 연 간 운용시간은 약 11% 감소되며, 발전기모드 만 적용하는 경우 약 21% 감소됨 을 나타낸다.



Fig. 87 Reduction of generator operating time in frigate

운용 프로파일 B의 경우 양방향 전력변환 발전기모드를 작동할 경우 디젤발 전기 4대의 연간 운용시간은 1,007시간이 감소되며, 발전기 운용 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 경우 디젤발전기 4대의 연간 운용시간은 2,015시간 감소된다. 즉 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따라 디젤발전기의 연간 운용시간은 약 12% 감소되며, 발전기모드 만 적용하는 경우 약 24% 감소 됨을 나타낸다. 호위함의 운용 프로파일 B가 연료절감효과가 더 높은 결과가 나온 것과 같이 연간 디젤발전기 운용시간도 더 감소됨을 확인할 수 있다.



Fig. 88 Reduction of generator operating time in auxiliary oiler

Fig. 88은 양방향 전력변환 적용에 따른 운용 프로파일 별로 군수지원함 디젤 발전기들의 연간 운용시간 및 운용시간 감소량을 나타낸다. 군수지원함 운용 프로파일 A의 경우 디젤발전기의 연간 운용시간 합계는 6,512시간이며 양방향 전력변환 발전기모드를 작동할 경우 디젤발전기 2대의 연간 운용시간 합계는 4,614시간으로 1,898시간이 감소되며, 해상수급상태를 제외하고는 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만 사용하는 경우 디젤발전기 2대의 연간 운 용시간 합계는 3,533시간으로 2,978시간 감소된다. 즉 양방향 전력변환 발전기 모드 적용에 따라 디젤발전기의 연간 운용시간은 약 30% 감소되며, 발전기모드 만 적용하는 경우 약 46% 감소됨을 나타낸다.



운용 프로파일 B의 경우 양방향 전력변환 발전기모드를 작동할 경우 디젤발 전기의 연간 운용시간은 2,482시간이 감소되며, 발전기 운용 없이 양방향 전력 변환 발전기모드만 사용하는 경우 디젤발전기 2대의 연간 운용시간은 3,884시 간 감소된다. 즉 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따라 디젤발전기의 연간 운용시간은 약 37% 감소되며, 발전기모드만 적용하는 경우 약 57% 감소됨을 나타낸다. 군수지원함의 운용 프로파일 B가 연료절감효과가 더 높은 결과가 나 온 것과 같이 연간 디젤발전기 운용시간도 더 감소됨을 확인할 수 있다.





제 6 장 결론

본 연구에서는 복합식 전기추진체계의 양방향 전력변환 적용에 따른 효과 분 석을 위해 복합식 전기추진체계를 적용한 대표 함정인 이지스구축함, 호위함 및 군수지원함에 대해 함 운용 프로파일, 연간 함 운용시간, 발전기 운용개념 등을 고려하여 연간 연료절감효과와 발전기의 운용시간 감소에 따른 정비비용 절감효과를 확인하였다.

양방향 전력변환 적용에 따른 연료절감효과를 분석하기 위해 각 함정별 두 종류의 함 운용 프로파일을 고려하고 양방향 전력변환 발전기모드와 발전기를 함께 운용하는 경우와 양방향 전력변환 발전기모드만으로 운용하는 경우에 대 해 시뮬레이션을 통해 연료소비량을 비교하였다.

양방향 전력변환 발전기모드와 발전기를 함께 운용하는 경우 가스터빈기관과 가스터빈발전기를 적용한 이지스구축함이 운용 프로파일에 따라 연간 약 361~449톤의 연료를 절감하여 연구 대상 함정 중에 연료절감량이 가장 많았고, 대용량의 디젤기관과 디젤발전기를 적용한 군수지원함은 운용 프로파일에 따라 연간 약 240~291톤의 연료를 절감하며, 호위함의 경우 상대적으로 연료절감 효 과는 낮으나 연간 약 104~133톤의 연료를 절감하는 효과가 나타났다.

또한 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만을 운용하는 경우 연료 절감 효과는 더 높은데, 군수지원함은 운용 프로파일에 따라 연간 약 339~396 톤의 연료를 절감하고, 호위함은 운용 프로파일에 따라 연간 약 193~244톤의 연료를 절감하는 효과가 나타났다.

다수의 가스터빈 기관 또는 발전기를 적용하거나 대용량의 디젤발전기를 적 용한 함정일수록 양방향 전력변환 발전기모드 적용에 따른 연료 절감효과는 더 높게 나타남을 확인하였으며, 가스터빈 또는 디젤기관을 운용하는 속력 구간에 서 함 운용비율이 더 높다면, 양방향 전력변환에 따른 연료절감 효과는 더 높 아지며, 고속 구간보다는 엔진의 효율이 낮은 중속 구간에서 운용비율이 높을 수록 더 높은 연료절감 효과를 나타냄을 확인하였다.



양방향 전력변환 적용에 따른 발전기 정비비용 절감효과는 발전기의 운용시 간 감소량을 분석하여 확인하였는데, 양방향 전력변환 발전기모드와 발전기를 함께 운용하는 경우 이지스구축함 가스터빈발전기의 연간 운용시간은 운용 프 로파일에 따라 약 20~24% 감소되고, 호위함 디젤발전기의 연간 운용시간은 운 용 프로파일에 따라 약 11~12% 감소되며, 군수지원함 디젤발전기의 연간 운용 시간은 운용 프로파일에 따라 약 30~37% 감소됨을 확인하였다.

또한, 발전기 작동 없이 양방향 전력변환 발전기모드만을 운용하는 경우 발 전기 운용시간 감소 효과는 더 높은데, 군수지원함은 운용 프로파일에 따라 약 46~57% 감소되며, 호위함은 운용 프로파일에 따라 약 21~24% 감소됨을 확인하 였다.

본 연구를 통해 복합식 전기추진체계를 적용한 함정에 양방향 전력변환 발전 기모드를 적용 시, 함 추진체계 구성, 함 운용 프로파일, 발전기 운용방법 등에 따라 수준에 차이는 있으나 연료절감 및 정비비용 절감효과는 높은 것으로 확 인 되었다.

복합식 전기추진체계를 적용한 함정에 연료비 절감량을 최대화하기 위한 방 안으로는 양방향 전력변환 발전기모드를 적용하고, 가능한 발전기를 운용하지 않으며 양방향 전력변환 발전기모드만 적용하고, 양방향 전력변환 발전기모드 와 발전기를 동시에 운전해야 하는 경우 발전기의 부하를 최소화하고 양방향 전력변환 발전기모드의 출력을 높이는 것을 제시하였다.

향후 양방향 전력변환 발전기모드를 함정에 적용하여 최상의 연료절감 및 정 비비용 절감효과를 얻기 위해서는 함정의 연료소비량 및 발전기 운용시간에 영 향을 주는 함 운용 프로파일, 추진기관/발전기 연료소비율, 추진체계 구성, 추 진기관/발전기 운용개념 등에 대한 최적화가 함께 고려되어야 할 것이다.

본 연구 결과는 복합식 전기추진체계를 탑재한 국내 함정에 양방향 전력변환 적용 연구에 활용이 가능하며, 추후 양방향 전력변환을 적용하여 함정을 설계 및 건조하는데 활용이 가능할 것으로 보인다.

🕖 Collection @ kmou

참고문헌

- [1] Timothy J. Mccoy, 2011, Naval energy forum [online] Available at: https://ndiastorage. blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2011/navy/McCoy.pdf [Accessed 21 July 2019].
- [2] KR, 2014, Naval vessel rule chapter 4.
- [3] 대한조선학회, 2015, 함정, 텍스트북스.

🕖 Collection @ kmou

- [4] GE Conversion, 2012, Type-45 destroyer Daring class, case study.
- [5] John Buckingham, 2016, Geared electric propulsion, BMT defence service.
- [6] Giorgio Sulligoi & Simone Castellan, 2012, Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigate integrated power system: modeling and validation, 2012 IEEE international conference on power and energy.
- [7] GE Conversion, 2012, Type-23 frigates Duke class, case study.
- [8] IHS Market, 2019, Jane's fighting ship [Online] Available at: https://ihsmarkit.com /products/janes-fighting-ships.html [Accessed 21 July 2019].
- [9] 최동일, 박상일, 2013, 함정 전기추진체계 기술 발전 방안 연구, 2013 함정기술 무기체계 세미나 논문집, pp. 223-227.
- [10] Korean Statistical Information Service, 2018, [Online] Available at: http://kosis.kr /statHtml/ [Accessed 7 December 2018].
- [11] Clarksons Research, 2018, Setting A course towards a cleaner future [Online] Available at: https://clarksonsresearch.wordpress.com/2017/03/31/setting-a-course -towards -a-cleaner-future/ [Accessed 21 July 2019].
- [12] Norbert Doerry, 2015, Medium voltage DC power for the future fleet, Peachman lecture series.

- [13] Danielle Collins, 2018, What are the benefits of an active front end(AFE) drive?.
 [Online] Available at: https://www.motioncontroltips.com/what-are-the-benefits-of-an -active-front-end-afe-drive/ [Accessed 21 July 2019].
- [14] Timothy J. Mccoy, 2014, Commercially derived hybrid electric drive (HED) systems for efficiency and power generation on naval ships.
- [15] Wetech, 2015, Energy efficiency improvements in shipping.
- [16] Gene Castles & Ashish Bendre, 2009, Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships, Proceedings of IEEE pp. 515–520.
- [17] DRS technologies, 2011, Hybrid Electric Drive (HED) tutorial a background and status of the DDG-51 HED proof of concept development, ASME turbo expo 2011 IGTI marine committee.
- [18] S. J. Lee & I. Wakeling, 2014, Logistics support vessel HNoMS maud [Online] Available at: http://www.sms1835.no/arkiv/2014-08-27%20Logistic%20Support%20Vessel %20by%20Director%20Lee%20Sung%20Jin.pdf.
- [19] ROK navy, 2004, Criteria for calculation of fuel capacity of endurance, Ship design/building standard.
- [20] NAVSEA, 2012, Electric Power Load Analysis (EPLA) for surface ships, Design data sheet 200-2.
- [21] ROK navy, 2004, Criteria for procedure of resistance & required power calculation and power margin, Ship design/building standard.
- [22] Norbert Doerry, 2006, Designing all electric ships, International marine design conference 2006.
- [23] Vedran Mrzljak & Tomislav Mrakovcic, 2015, Comparison of COGES and diesel-electric ship propulsion system.
- [24] NAVSEA, 2012, Calculation of surface ship annual energy usage, annual energy cost, and fully burdened cost energy, Design data sheet 200–2.

Collection @ kmou

- [25] Fraser W. Work, 2016, Opportunities for improved warship energy efficiency: A canadian patrol frigate's operational energy use patterns.
- [26] John Buckingham, Hybrid drives for naval auxiliary vessels.
- [27] 류승현, 정성영, 오진석, 2015, 함정용 하이브리드 전기추진 시스템 발전기 모드 적용에 대한 연구, Journal of the korean society of marine engineering, vol. 39, no. 9 pp. 967-972.
- [28] 최동일, 이헌석, 오진석, 2019, 복합식 전기추진체계 함정의 양방향 전력변환 적용에 따
 른 연간 연료 소비량 분석, Journal of the korean society of marine engineering, vol.
 43, no. 4 pp. 299-306.
- [29] S. Tsai, B. Hopkins & R. Stenson, 2009, Comparison of powering performance between DDG-51 and conventional combatant hull forms, Naval engineers journal, vol. 106, no. 5, pp. 88-99.
- [30] Wilmshurst Stewart, 2003, Rolls-Royce MT30 design, certification, launch and growth, Proceedings of the international gas turbine congress 2003.
- [31] 국방과학기술용어사전, 2019 [Online] Available at: https://terms.naver.com/entry. nhn?docId=2752880&cid=50333&categoryId=50333.

