



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

함정의 통합 동력 시스템 구성에 관한 연구

A Study on the Arrangement of Integrated Power System for Warship

지도교수 최재성



2013년 6월

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

백현민

본 논문을 백현민의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 정 렬

위 원 조 권 회

위 원 최 재 성



한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract	viii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 내용	4
제 2 장 함정 추진체계의 종류와 IPS의 특징	5
2.1 함정 추진체계의 종류	5
2.1.1 기계식 추진체계	5
2.1.2 복합식 추진체계	7
2.2 IPS (Integrated Power System)	9
2.2.1 IPS의 필요성	9
2.2.2 IPS 동력 시스템의 특징	12
2.2.3 IPS의 배전 방식과 에너지 저장장치	13
제 3 장 IPS의 동력 시스템 구성과 평가 방법	15
3.1 동력 시스템 구성 비교	15
3.1.1 기계식, 복합식 추진 함정의 동력 시스템 구성	15
3.1.2 IPS 동력 시스템 구성의 고찰	16
3.2 IPS 동력 시스템의 최적화 평가 인자	20
3.2.1 전투 능력	20
3.2.2 운용성	21

3.2.3 경제성	22
3.2.4 환경 친화성	22
3.3 평가 인자의 정량화 및 평가 방법	25
3.4 동력 시스템의 연료소비 추세와 중량 추세 산출	28
3.5 추진기관의 제동 동력 산출 방법	30
3.6 합정 동력 시스템의 연간 운용 시간 비율의 추정	32
제 4 장 IPS의 동력 시스템 최적화	34
4.1 IPS 가상합정 설정	34
4.2 기관 체계별 동력 전달	36
4.2.1 기계식 추진 체계의 동력 전달	36
4.2.2 복합식 추진 체계의 동력 전달	37
4.2.3 IPS의 동력 전달	37
4.3 가상합정의 추진 방식에 따른 동력 시스템 구성	39
4.3.1 CODOG 시스템의 구성	39
4.3.2 IPS 동력 시스템의 구성	40
4.4 동력 시스템의 연간 연료 소비량 및 중량 산출	42
4.4.1 CODOG의 연간 연료 소비량과 중량 산출	42
4.4.2 IPS 동력 시스템의 연간 연료 소비량과 중량 산출	43
4.5 IPS 동력 시스템의 최적화 비교	47
4.6 CODOG과 IPS 동력 시스템의 비교	53
4.6.1 연료 소비량 비교	53
4.6.2 동력 시스템의 중량 비교	53
4.7 COGAG과 IPS 동력 시스템의 비교	55
4.8 만재톤수와 전력량에 따른 IPS 최적화 비교	59

제 5 장 IPS 동력 시스템 최적화를 위한 추가 고려 요소	61
5.1 인력 운용	61
5.2 획득 및 유지 비용	63
5.3 선형과 추진기에 따른 공간 활용도, 소요 동력의 변화	64
5.4 환경 요소	67
제 6 장 결론	71
참고문헌	73



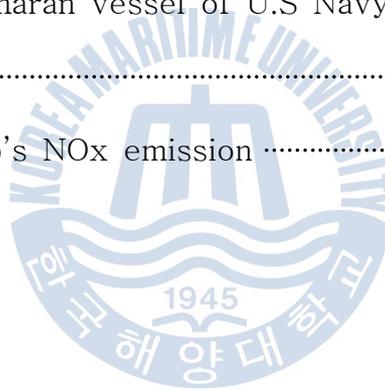
List of Tables

Table 2.1	Mechanical propulsion system	5
Table 2.2	A speed-condition profile indicates the percentage of time per year spent in each battle condition at representative speeds	10
Table 3.1	Evaluation factors for optimization	25
Table 3.2	Classification of power for ship' s propulsion	30
Table 4.1	Specification of supposed vessel	34
Table 4.2	$C_{adm.}$ of various naval vessels	35
Table 4.3	Arrangement of prime mover for CODOG propulsion system	39
Table 4.4	Fuel consumption of CODOG at each operating mode	42
Table 4.5	Weight of prime mover & generator of CODOG	43
Table 4.6	Fuel consumption of IPS at each operating mode	45
Table 4.7	Weight of prime mover & generator of IPS	46
Table 4.8	Fuel consumption of IPS at each operating mode	49
Table 4.9	Weight of prime mover & generator of IPS	51
Table 4.10	Supposed Ship's specification & operating mode	56
Table 4.11	Fuel consumption of COGAG & IPS at 4 operating mode	57
Table 4.12	Weight of prime mover & generator of COGAG & IPS	58
Table 4.13	$\overline{O-output}$ by gross tonnage & power demand	60
Table 5.1	Crews of naval vessel	62
Table 5.2	Comparative costings	63
Table 5.3	Fuel-based exhaust gas emission factors used in the 2007 inventory	68
Table 5.4	Propulsion system-based CO_2 & NO_x emission (per year)	69

List of Figures

Fig. 1.1	Surface warfare evolution	2
Fig. 2.1	Schematic diagram of mechanical propulsion system	6
Fig. 2.2	Schematic diagram of hybrid system (TYPE-23, CODLAG)	8
Fig. 2.3	Increasing electrical power demands	9
Fig. 2.4	TYPE-45 DDGHM (U.K. Navy) & DDG-1000 (U.S. Navy)	11
Fig. 2.5	Schematic diagram of Integrated Power System	12
Fig. 2.6	Configuration for IPS based electric power convert module	14
Fig. 3.1	Concept for mechanical & hybrid system arrangement	15
Fig. 3.2	Comparison of the optimal efficiency stage between mechanical system and Integrated Power System	17
Fig. 3.3	Procedure of generator selection for IPS	19
Fig. 3.4	Process of optimizing arrangement for IPS	19
Fig. 3.5	'2 input - 1 output' DEA model	26
Fig. 3.6	SFC tendency of diesel engine (Gen.) & gas turbine (Gen.)	28
Fig. 3.7	Weight tendency of diesel engine (Gen.) & gas Turbine (Gen.)	29
Fig. 3.8	Supposed operational time rate of naval battle ship	32
Fig. 4.1	Comprehension for different P_B presume	35
Fig. 4.2	Mechanical transmission - typical efficiency at full power	36
Fig. 4.3	High speed generator - typical efficiency	36
Fig. 4.4	Electrical transmission typical efficiency at full	37

Fig. 4.5	Electric propulsion plant of standard electrical components ; Typical losses ..	38
Fig. 4.6	Arrangement of TYPE-45 (UK Navy) propulsion system	40
Fig. 4.7	Arrangement for IPS (alteration in D/E generator)	41
Fig. 4.8	Comparison among 6 IPS arrangement by efficiency evaluation	47
Fig. 4.9	Arrangement for IPS (alteration in D/E gen. power rate)	48
Fig. 4.10	Comparison among 10 IPS arrangement by efficiency evaluation	52
Fig. 4.11	Specification of Sejong the Great class DDGHM	55
Fig. 4.12	$\overline{O-output}$ by gross tonnage & power demand	59
Fig. 5.1	A cutting plane of DDG-1000	64
Fig. 5.2	Catamaran & Trimaran vessel of U.S Navy	65
Fig. 5.3	Azimuth thruster	66
Fig. 5.4	Regulation of ship's NOx emission	69



A Study on the Arrangement of Integrated Power System for Warship

Hyun-Min Baek

Department of Marine System Engineering
Graduate School of Korea Maritime University
(Supervisor : Prof. Jae-Sung Choi)

Abstract

In the past, the power used in the warships was manpower or wind power. And until now, steam turbines, diesel engines and gas turbines have been used in order as the prime mover. But in days to come, especially in case of warship the appearance of new powerful weapon systems that consumes a large amount of electric power brought a tremendous change of warship's propulsion system and power generating system.

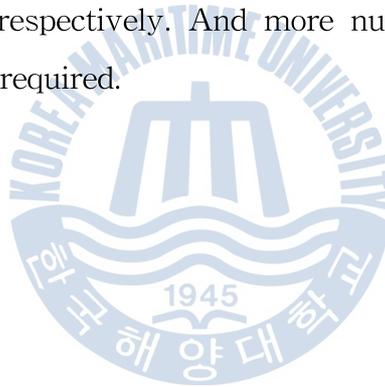
According to IEEE 1662(2009), IPS is a power system where all prime movers produce electrical power that is shared among propulsion, mission, and ship service loads. Discriminating attributes of integrated power systems are flexibility of movers' arrangements, mechanical decoupling between prime movers and propulsors, an increased level of energy conversion and transmission redundancy, and flexibility of redistributing available electrical power for future electronic weapons.

IPS could have various steps of power that can be produced at optimal load of movers. So, it is possible to produce the extreme power density for electronic weapons like as railgun tested by US. Navy. This is why IPS have been considered as the next generation propulsion and power system.

And IPS is different from existing propulsion system. So, the new evaluation method is required to arrange and optimize the IPS for naval vessels.

In this study, an evaluation method for optimal arrangement of movers was investigated when an IPS warship is projected. The fighting power and economic feasibility have been chosen as the evaluation factors. These two factors are expressed numerically which are the weight of system and the fuel consumption per year. And also the ways for arrangement of system were studied according to existence of small diesel generator. The evaluation method that decides the optimization level is based on the DEA(Data Envelopment Analysis).

As the results, it is confirmed that IPS is not more efficient in economy than the present system with diesel engine. And it is heaviest system among considered systems because of increasing weight of generator, prime motors and so on. But it was cleared that the using of small diesel generator on IPS has the useful effect to be operated at optimal load respectively. And more numerical studies about another evaluation factors should be required.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

영국 해군은 순항속력(15~18kts) 이하에서 전기모터에 의해 추진되고, 순항속력 이상에서는 가스터빈 기관에 의해 추진되는 복합식 추진 체계의 함정을 90년대부터 건조하여 운용하고 있다. 또한 2009년 이후에는 전속도 범위에서 함정의 추진용 기관에서 생산한 동력을 축(shaft)을 통해 추진기에 전달하는 체계가 아닌 전력을 모터의 회전력으로 전환하여 구동하는 전기식 추진 체계가 채택된 TYPE-45 구축함(배수량 7,500톤, 최대 속도 29kts, 승조원 191명)을 운용 중에 있다. 이후 미국 해군 또한 Arleigh Burke 급 구축함을 대체하기 위한 최신예 DDG-1000급 구축함(배수량 약 15,000톤, 최대 속도 30kts, 승조원 148명)에 전기식 추진 체계를 적용, 건조 중에 있다.

과거 인력과 풍력에 의한 추진 이후, 증기터빈 기관, 디젤 기관, 가스터빈 기관 등이 주로 사용된 기계식 추진 체계 다음으로 등장한 이러한 전기식 추진 체계는 현대 해군 함정에 사용되는 무기체계(Weapon System)의 변화를 반영하고 있다.

Fig.1.1^[1]은 해군 수상함의 무기체계 변천 과정을 나타낸다. 범선(sailing ship) 시대 이전 군함에서 사용된 전투력은 인간의 근력이었으며, 범선 시대 이후 전함(battle ship) 시대에 이르기 까지 무기체계의 주된 동력은 화약을 통한 추진력과 폭발력이었다. 이후, 미사일은 화약을 대신하게 되었으며 이지스(Aegis) 전투체계를 시작으로 등장하게 되는 전자기를 이용한 무기체계는 함정에서의 전력의 소요를 급격히 증가시키게 되었다.

DDG-1000급 구축함의 경우, 탐지를 위한 표면배열 레이더와 소나 등 각종 탐지장비와 지휘통제체계, 타격을 위한 AGS 155mm 함포 2문, 총 80개의 대공 미사일, 순항미사일, 대잠 로켓 등과 이를 운용하기 위한 미사일 발사 장치 등을 운용하고 있으며, 이러한 모든 무기체계의 운용에는 추진용 동력 이상의 많은 양의 전력을 필요로 한다. 따라서, 무기체계에 소요되는 전력의 급격한 증가는 기존의 기계식 추진 체계와 별도로 운용되던 발전 체계의 대형화를 필요로 하게 되었고 이 과정에서 무기체계와 추진 체계, 함정 내 승조원의 생활에 필요한 모든 동력을 전력으로 통합하여 운용하는 통합 동력 시스템인 IPS(Integrated Power System)가 등장하게 되었다.

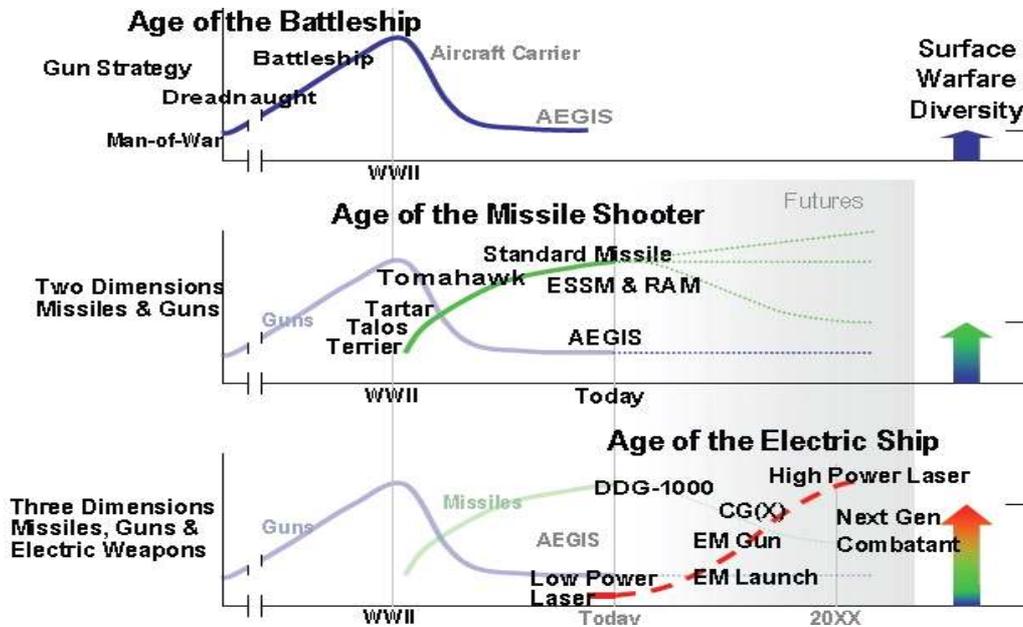


Fig.1.1 Surface warfare evolution

앞서 언급한 영국 해군의 TYPE-45급 구축함과 미국 해군의 DDG-1000 급 구축함은 통합 전기추진 체계를 운용하고 있으며 DDG-1000급 구축함은 4대의 가스터빈 발전기에서 생산되는 78MW의 전력을, Type-45 구축함은 가스터빈 발전기, 디젤 발전기 각 2대에서 총 46MW의 전력을 생산하여 함정의 추진과 무기체계의 사용, 함정 내 승조원의 생활 전력에 모두 사용하고 있다.^[2] 우리 해군을 비롯한 각국 해군과 조선소 또한 차기 구축함의 추진 체계로 복합식 추진 체계, IPS 등을 검토 중이며 이에 따른 관련 연구가 활발하게 진행 되고 있다.

기존의 기계식 추진 체계를 운용하는 함정의 경우, 함정이 육상에 정박하면 전력 케이블을 통해서 육상의 전력을 사용하거나 함정의 발전기 중 일부를 작동하여 필요한 전력을 생산하였다. 하지만, 위에서 언급한 영국해군의 Type-45 구축함은 정박 시 함정에 필요한 최소 전력을 생산하기 위한 별도의 소형 발전기나 운항 중의 잉여 전력을 저장하여 정박 시 사용하는 축전지 또는 기타 에너지 저장장치 (energy storage)가 설치되어 있지 않다. 이러한 구성의 IPS는 함정의 항구 내 대기 시간이 함정 운용 시간의 1/2 로 추산되는 우리 해군의 함정 운용 특성을 감안하면, 육상 전력을 운용하는 것이 효율적으로 판단된다. 따라서 IPS를 효율적으로 구현하기 위해서는 소요 함정에서 주로 사용하는 전력의 범위를 정확히 계획하고 우선 순위화 하여, 요구되는 발전기의 용량과 수량을 최적화하기 위하여 새로운 구성 방식에 관한 연구가 요구되며, 또한

그 구성을 객관적으로 평가하기 위한 평가 방법과 평가 요소에 관한 연구 검토가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 IPS 동력 시스템의 구성 방식을 검토하고, 동력 시스템의 구성 방식에 따른 적합성을 정량적으로 평가할 수 있는 평가 인자와 평가 방법에 관한 연구이다. 즉, 구축함(DD, Destroyer)급 함정에 발전용 디젤 기관과 발전용 가스터빈 기관으로 구성되는 IPS를 운용할 경우를 가상하여, IPS 동력 시스템의 다양한 구성 방법들의 특징을 비교 분석하여 평가함으로써 IPS를 최적화할 수 있는 방안에 관하여 연구하고자 하였다. 평가 인자는 동력 시스템의 최적화 대상인 전투 능력, 운용성, 경제성, 환경 친화성 중심으로 검토하였으며 각 인자를 객관화하고 정량화하는 방안에 관한 연구가 필요하다고 판단되었다.



1.2 연구 내용

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

제 2 장에서는 함정 추진체계의 종류와 IPS의 특징, 필요성에 대하여 고찰하였다.

제 3 장에서는 각 기관 체계의 동력 시스템 구성 과정을 비교하여 IPS 동력 시스템 구성 과정을 고찰하고, 동력 시스템의 최적화를 위한 평가 인자와 방법에 관하여 고찰하였다. 평가인자는 전투 능력, 운용성, 경제성, 환경 친화성에 관하여 검토하였으며, 평가방법은 자료포락분석법을 참고하였다.

제 4 장에서는 검토한 IPS의 동력 시스템 구성 단계에 따라서, 만재톤수 5,500톤, 함정 내 소요전력 (무기체계의 사용, 함정 내 승조원의 생활) 5MW의 전투 함정을 대상으로 발전용 소형 디젤 기관의 유무, 주 발전용 디젤기관의 수량과 용량에 따라서 체계를 구성하고 각 구성안에 대하여 연간 연료소비량, 동력 시스템의 중량을 산출 후 IPS의 최적 구성을 선택하였다. 이후 IPS 최적 구성과 현재 해군에서 주로 운용 중인 CODOG, COGAG 체계와의 비교를 실시하였다. 또한 가상함정의 범위를 만재 5,500 톤 ~ 10,500 톤, 함정 내 소요전력 5MW ~ 10MW의 범위에서 변화시킴으로써, 함정의 무게와 소요 전력의 변화에 따른 IPS 최적 구성의 최적화 정도를 검토하였다.

제 5 장에서는 IPS 동력 시스템 최적화를 위해 추가적으로 고려하여야할 요소들에 대하여 검토하였다.

결론에서는 이상의 연구결과를 요약 정리하였다.

제 2 장 함정 추진체계의 종류와 IPS의 특징

2.1 함정 추진체계의 종류

2.1.1 기계식 추진 체계 (Mechanical propulsion system)

기계식 추진 체계는 현재 해군 함정뿐만 아니라 상선, 여객선, 어선 등의 일반적인 선박에서 사용하고 있는 추진 체계로, 원동기의 축과 추진기를 직렬로 연결하거나 원동기와 추진기 사이에 감속기어를 연결하여 원동기의 회전수를 조절하여 사용하는 체계이다. Table 2.1^[3]은 현재 각국의 해군 함정에서 가장 많이 사용되는 추진 체계인 기계식 추진체계의 분류이다. 해군 함정에서 주로 사용되어지는 추진용 기관은 고속 디젤 기관과 가스터빈 기관으로, 대부분의 함정이 감속기어를 통해 원동기의 회전력을 조절하여 사용한다. 약 30kts의 최고 속력을 요구하는 전투함의 경우, 함정의 톤수에 따라서 요구되는 기관의 체계가 다양하며, 톤수가 증가하고 요구되는 속도가 증가할수록 고속 디젤 기관보다 고효율을 생산하는 가스터빈의 역할 비중은 증가한다.

Table 2.1 Mechanical propulsion system

classification		prime mover	
		at cruise speed	at Max. speed
D/E - G/T Combination	CODOG	Diesel Engine	Gas Turbine Only
	CODAG	Diesel Engine	D/E & G/T
G/T - G/T Combination	COGOG	Gas Turbine	Gas Turbine Only
	COGAG	Gas Turbine	G/T & G/T

우리 해군의 광개토대왕급 DDGHM (Destroyer, Helicopter Capable Guided Missile) (만재 3,917 톤), 충무공이순신급 DDGHM (만재 5,588톤) 등의 전투함에서 주로 운용되는 CODOG (Combined Diesel Or Gas turbine) 추진 체계는 순항 속력 이하에서는 추진용 디젤 기관에 의하여 추진을 하지만, 순항 속력을 초과하여 최대 속력 범위까지는 추진용 디젤 기관은 작동을 정지하고 가스터빈 기관만 작동하여 추진력을 얻는다.

독일의 Sachsen급 FFGHM (Frigate, Helicopter Capable Guided Missile) (만재 5,690톤) 등에서 운용 중인 CODAG (Combined Diesel And Gas turbine) 추진 체계는 순항속력 이하에서는 추진용 디젤 기관에 의해서 추진을 하고 순항속력 이상 최대 속력의 범위에서는 추진용 디젤 기관과 가스터빈 기관이 동시에 작동하는 추진체계이다.

일본의 Hatsuyuki급 DDGHM (만재 4,267톤), 영국 해군의 TYPE-42 DDGH (만재 5,283톤) 등에서 운용 중인 COGOG (Combined Gas turbine Or Gas turbine) 추진 체계는 순항 속력 이하, 순항 속력 이상에서 모두 가스터빈이 운용되나 각 속력 범위에서 운용되는 가스터빈이 구분되어 있으며 동시에 운용되지 않는다.

우리 해군의 세종대왕급 DDGHM(만재 10,000톤), 미국 해군의 Arleigh burke급 DDGHM (만재 9,302톤), Ticonderoga 급 CGHM (Cruiser, Helicopter Capable Guided Missile) (만재 10,117톤) 등과 같이 10,000 톤에 달하는 대형 전투함에서 운용 중인 COGAG (Combined Gas turbine And Gas turbine) 추진 체계는 순항 속력 이하에서 가스터빈이 동력을 생산하며 그 이상의 속력에서는 가스터빈을 추가로 가동하여 동력을 생산한다.

이 밖의 기계식 추진체계로는 CODAD (Combind Diesel And Diesel), CODOD (Combined Diesel Or Diesel), CODAG-WARP(CODAG-Water jet) 등이 있으며 함정의 중량과 요구되는 순항속력, 최고속력, 임무에 따라서 다양하게 적용된다. Fig.2.1은 기계식 추진체계의 구성도이다.

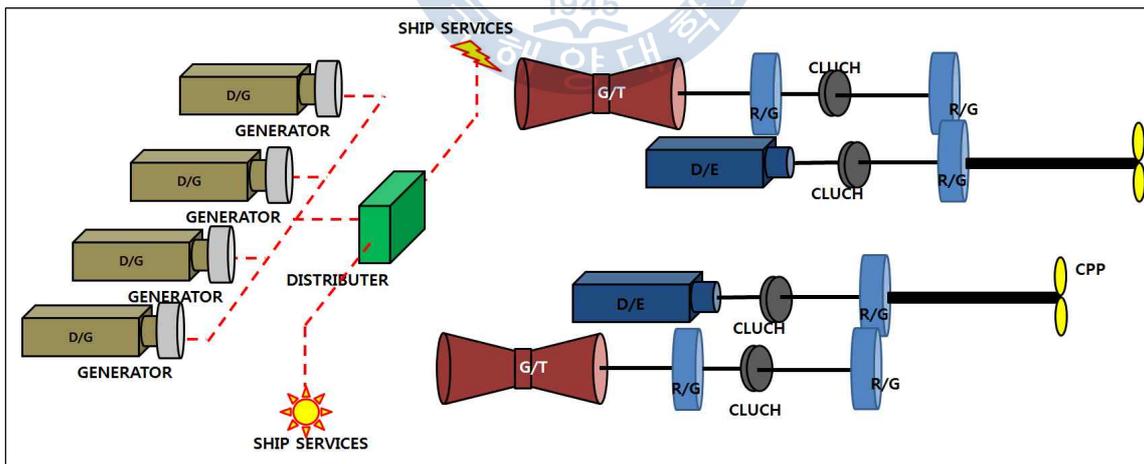


Fig.2.1 Schematic diagram of mechanical propulsion system

2.1.2 복합식 추진 체계 (Hybrid propulsion system)

복합식 추진체계는 순항 속력 이하에서는 발전기에서 생산한 전력을 이용하여 전동 모터로 추진기를 작동하고, 순항 속력 이상에서는 기계식 추진체계와 같이 추진축이 연결된 원동기만으로 추진력을 얻거나 전동모터의 추진력을 함께 병렬로 추진에 사용하는 추진체계이다. 현대중공업은 2010년 2월 국내 첫 복합식 추진체계 탑재 해경 함정(태평양 9호, 3,000톤 급, 최고 속력 28kts)을 건조하였는데, 이 함정은 순항 속력 이하에서 발전기(900kW 발전용 디젤 기관 4대 중 2대 구동)에서 생산한 전력을 전동 모터(750kW)에 공급하고 모터의 회전력을 감속기어에서 조정하여 추진기에 전달한다. 순항 속력 이상에서는 추진용 디젤 기관 4대가 구동하여 추진력을 생산하여 추진기에 직접 전달한다. 이 때, 전동모터는 구동 되지 않는다.

각국의 해군에서 현재 운용 중인 대표적인 복합식 추진체계는 고속 추진에서 추진용 가스터빈 기관이 구동되는 CODLAG(Combined Diesel-Electric And Gas turbine)과 CODLOG(Combined Diesel Electric Or Gas turbine)이다. 영국 해군의 TYPE-23 FFGHM (만재 4,267톤, 최고 속력 28kts)은 CODLAG을 운용 중인데 순항속력(15kts) 이하에서는 4대의 Paxman 12CM 발전용 디젤 기관에서 생산하는 총 6MW의 전력 중 3MW를 사용하여 2개의 전동 모터에서 추진력을 생산하고 순항 속력 이상의 범위에서는 모터의 추진력과 2대의 RR Spey SM1A 추진용 가스터빈 기관의 생산 동력을 합하여 추진력을 얻는다. Fig.2.2는 TYPE-23 함정과 그 기관의 추진동력 구성도이다.

또한 FREMM (Fregata Europea Multi-Mission) Project 로 개발되어 유럽의 다수 국가 해군에서 운용 중인 FREMM class FFGHM (만재 6,096톤, 최고속력 27.5kts) 등의 함정에서 운용 중인 CODLOG 시스템^[2]은 고속에서 전동 모터가 구동되지 않고 추진용 가스터빈 기관만 구동되어 추진력을 얻는다는 점이 CODLAG과의 차이점이다. (FREMM class는 유럽 국가 간의 다국적 프로젝트로, 함정의 건조 국가에 따라 CODLAG을 적용하기도 하였다.)

복합식 추진 체계는 저속에서 전기추진방식을 이용하지만, 고속에서는 기계식 추진 단독으로 또는 함께 추진력을 얻는다는 점에서 완전한 전기추진체계라고 할 수 없다.

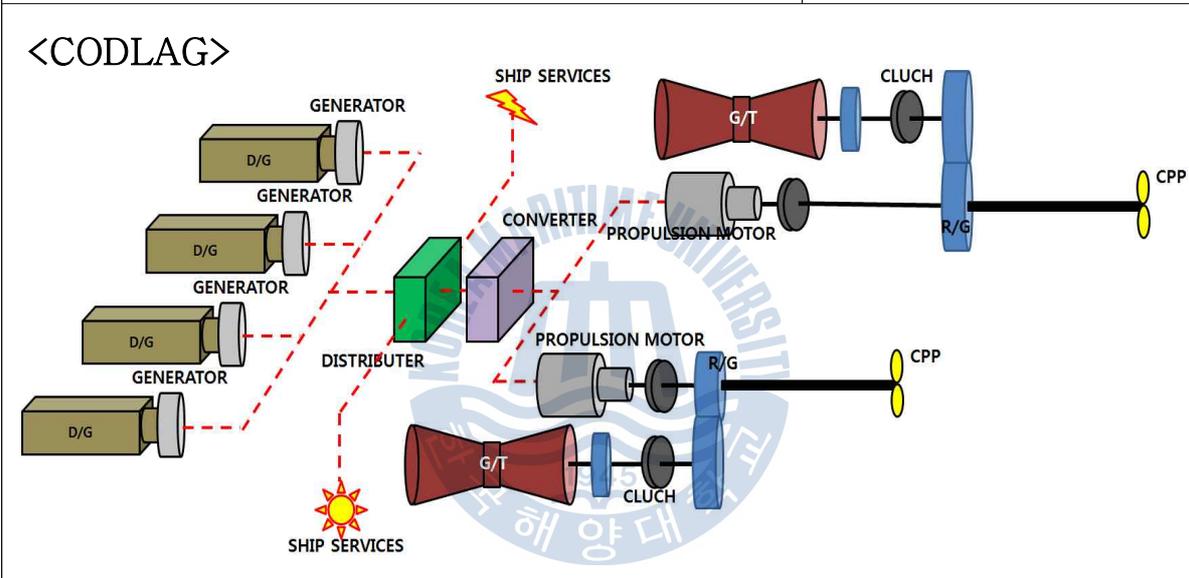


Fig.2.2 Schematic diagram of hybrid system (TYPE-23, CODLAG)

2.2 IPS (Integrated Power System)

2.2.1 IPS의 필요성

해양 전장 환경의 디지털화, 해군함정에 부여되는 임무의 다목적화, 전투능력을 장기간 지속화하기 위한 함정 생존성의 극대화 등 군사과학 기술에 대한 요구가 다양해지고 점차적으로 첨단화 되면서 함정에 탑재되는 무기체계, 전투체계, 추진체계 등 다양한 장비들이 모듈화 되고 있으며 고출력 에너지를 요구하는 체계로 변화되고 있다. 특히, 해상에서의 전장 환경은 정보기술과 광역 전장감시체계 등의 발전으로 보다 복잡하게 구성되며, 이러한 첨단 시스템을 유지하기 위하여 함정에서는 보다 높은 수준의 전력 공급 시스템이 필요하게 되었다.^[4] 이러한 과정에서 전자기 항공기 출격 시스템, 전자기포, 레이저 무기체계 등과 같은 고출력 에너지가 요구되고 있기 때문에, Fig.2.3^[5]에서 전망되어지듯 함정에 요구되는 전력은 급격히 증가하고 있다.

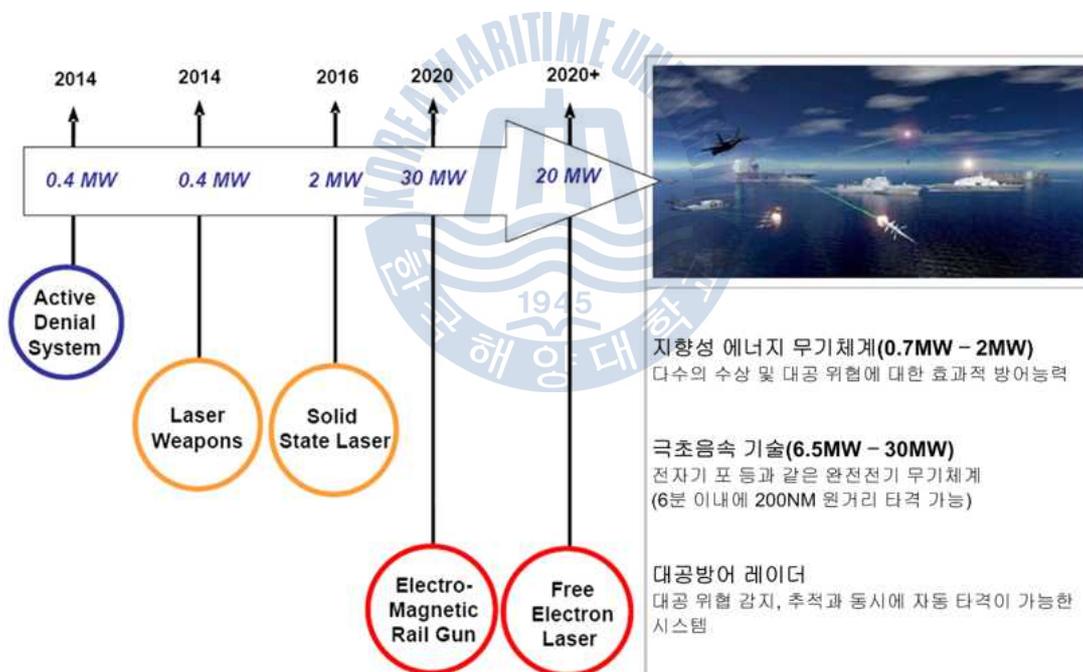


Fig.2.3 Increasing electrical power demands

해군 함정은 일반적으로 30kts 전후의 최고 속력을 낼 수 있도록 디자인 되어 있으나 일반적으로 Table 2.2^[7] 와 같이 전체 운항 시간의 80% 이상이 순항속력 (약 15~18 kts) 이하에서 이루어진다.^[6]

Table 2.2 A speed-condition profile indicates the percentage of time per year spent in each battle condition at representative speeds ; this sample profile is for a destroyer-type ship during peacetime.

Speed (kts)	Shore Pwr	Anchor	Peacetime Cruise	Wartime Cruise	Battle	total
0	53	1.58	0	0	0	54.58
5	0	0	6.79	5.15	0.11	12.05
10	0	0	4.74	3.59	0.07	8.4
15	0	0	6.40	4.86	0.10	11.36
20	0	0	6.02	4.57	0.09	10.68
25	0	0	1.54	1.17	0.02	2.73
max	0	0	0.13	0.10	0	0.23
total	53	1.58	25.62	19.44	0.39	100

순항 속력과 최고속력의 개념은 연료 소비를 최소화 하는 기계장치들의 조합과 조정으로 이루어지는데 각 속력 범위에서 구동되는 추진용 기관이 순항속력과 최고속력에서 구분되어지고 이들 원동기는 함정의 전력 생산과는 무관하게 추진만을 담당한다. 예를 들어 CODOG 시스템의 경우, 순항속력 이하에서는 추진용 디젤 기관이 구동되지만 그 이상에서는 추진용 가스터빈 기관이 구동된다. 이에 추가적으로 함정에는 각종 체계와 기계장비, 함정 내 승조원의 생활에 필요한 전력을 생산하기 위한 발전 체계 (power system) 또한 별도로 요구된다. 하지만, 앞서 언급한 함정의 생산 요구 전력의 증가를 고려할 때 앞으로 요구되는 함정의 발전 체계가 함정의 전체 기관 체계에서 차지하는 비중은 급증할 것이고, 함정의 실제 운항 패턴을 고려할 때, 이러한 발전 설비의 50%와 고속 추진용 기관은 함정의 전체 운항 시간 중 약 20% 밖에 가동되지 않을 것이다. 따라서 함정의 추진 동력과 전력으로 구분되는 기관체계가 아닌 한 가지 동력 (전력)만으로 통합 운용함으로써 추진 체계와 발전 체계의 구분을 없애고, 각 전력 소요 단계마다 별도의 발전용 기관이 운용되는 것이 아니라 기관 운용의 호환성을 갖도록 하는 새로운 체계가 요구되었다.

선진 해군의 차세대 전투함은 기존의 선형과 크기를 유지하면서 다목적 전투 성능을 가진 미래형 무기체계를 탑재하는 추세로 변화하고 있고 이에 함정의 제한된 플랫폼 안에서 전력 또는 에너지 밀도를 극대화하여야 할 필요성이 제기된다. 이러한 변화는 함정의 추진 체계와 발전 체계를 통합하여 운영하는 통합 동력 시스템(IPS, Integrated Power System)를 등장케 하였다. 통합 동력 시스템과 관련된 연구는 약 20년 전 부터 꾸준히 진행되어 왔으며, 초전도 영구자석 전동기나 전력변환 장치가 내장된 고속 가스터빈발전기가 현재 60Hz 시스템에 적용할 수 있는 대안으로 생각되고 있다. 현재 이렇게 통합 동력 시스템을 운영하는 대표적인 함정은 Fig.2.4의 영국 해군에서 운용중인 Type-45 DDGHM 과 미국 해군의 DDG-1000 이 있다. Type-45는 대형 가스터빈 발전기 (RR WR-21, 21MW) 두 대와 소형 디젤 발전기(Wartsila 12V200, 2MW) 두 대, 그리고 한 대당 20MW의 유도 전동기 및 전력 변환장치 (Converteam AIM + VDM 25000)로 구성되어 있다. DDG-1000은 대형 가스터빈 발전기 (RR RR4500, 4MW) 두 대와 20MW 유도 전동기를 직렬로 연결하여 한 대 당 34.6MW의 출력을 가지는 추진 전동기 시스템으로 구성되어 있다.^[8]

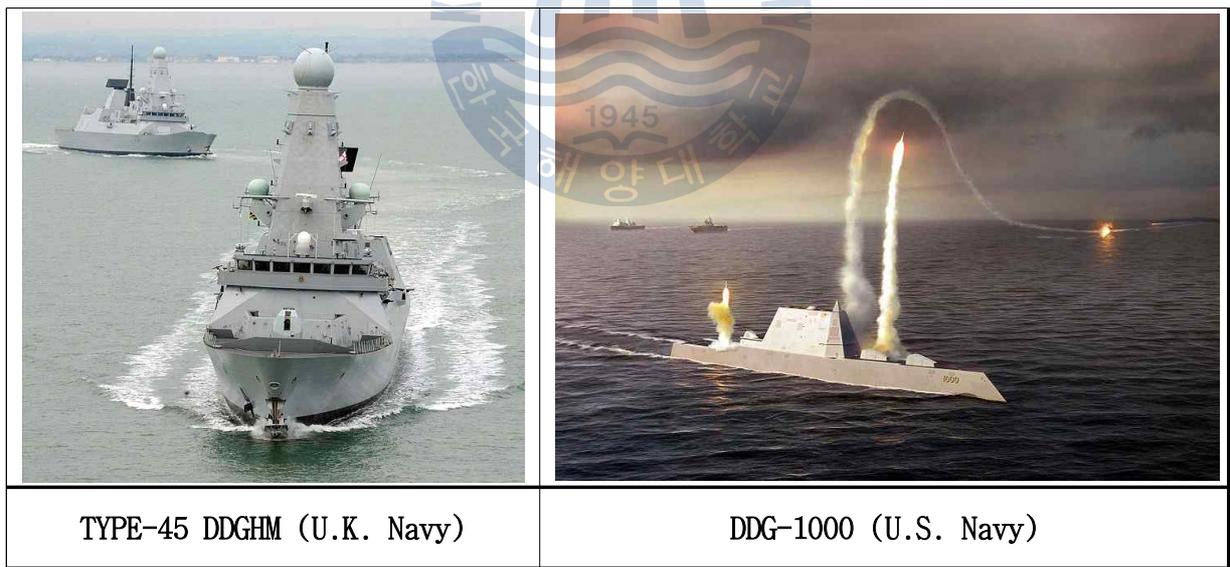


Fig.2.4 TYPE-45 DDGHM (U.K. Navy) & DDG-1000 (U.S. Navy)^[2]

Fig.2.5는 통합 동력 시스템(IPS ; Integrated Power System)의 구성도이다.

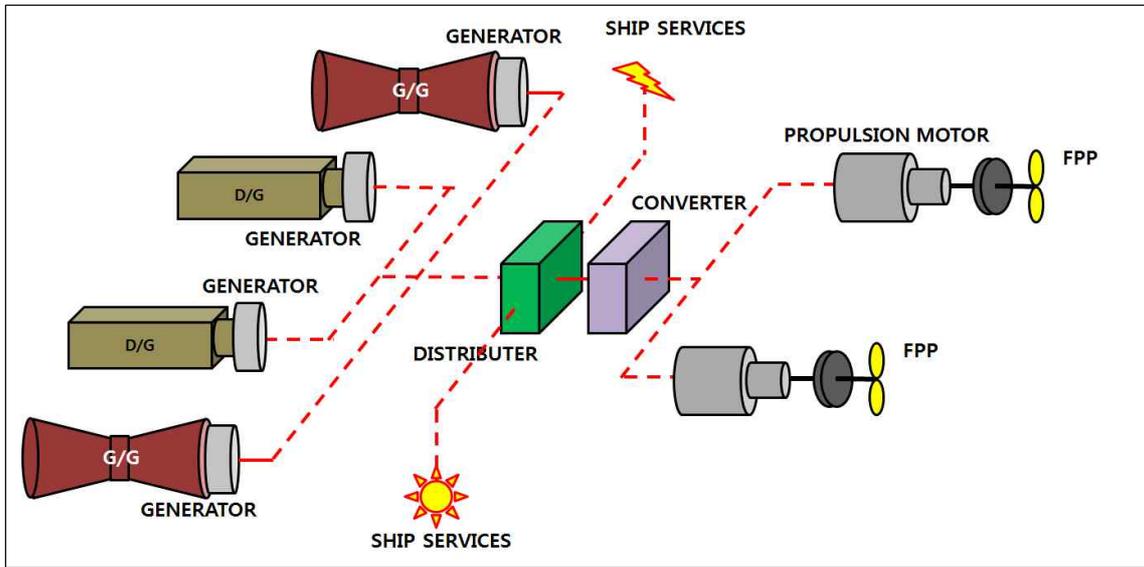


Fig.2.5 Schematic diagram of Integrated Power System

2.2.2 IPS 동력 시스템의 특징

각 동력 시스템의 비교를 통해서 구분되어지는 IPS 동력 시스템의 특징은 다음과 같다.

- 1) 기관(prime mover)에 발전기(generator)가 설치된 발전용 기관으로만 구성되어 모두 전력을 생산한다.
 - 모든 기관의 생산 동력은 전력으로, 통합과 분배, 저장이 용이
 - 비상상황을 대비한 여분(redundancy) 기관이 불필요
 - 자동제어가 용이하여 기관체계 제어를 위한 축 또는 케이블의 분리가 불필요
 - 연료 효율을 최적의 상태로 할 수 있는 사용 범위 증가
- 2) 함정 추진력의 생산과 추진기의 회전 속도 조정 역할을 전동 모터가 수행하면서 감속기어가 불필요하다.
 - 전동 모터를 구동하여 수중 방사 소음 감소로 대잠 작전 능력 강화
 - CPP (controllable pitch propeller) 대신 FPP (fixed pitch propeller)를 사용하여 축계 단순화
 - 축전지 등의 에너지 저장장치 (energy storage) 추가 시 기관 정지 상태에서 최대 정속 상태로 함정 운용 가능

- 3) 체계를 구성하는 원동기의 수량이 적어 필요 인력이 감소한다.
- 4) 전동모터의 전류 특성 (교류, 직류)에 따라 추가적인 대형 변전 시설과 기타 배전 시설이 필요하다.
- 5) 구성 기관을 연결하던 축이 사라지고 전력 케이블로 연결되어 기관의 배치성이 향상된다.
 - 기관의 설치 위치를 조정하고 직접 발생하는 소음과 진동을 차폐(shielding) 하여 함정 내 소음, 진동과 수중 방사 소음을 감소
 - 기관체계의 구성 요소를 모듈(module)화 하여 기관의 정비 및 교체 용이
 - 무기체계의 추가 설치로 함정 전투력 향상 가능
 - 함정 설계 시 융통성 향상
 - 함정의 연돌 구조 및 위치 변경 등으로 배기가스에 의한 열 추적 회피 가능

2.2.3 IPS의 배전 방식과 에너지 저장장치

IPS 동력 시스템에서 생산한 통합전력의 중간 분배는 직류와 교류 분배로 나뉜다. 기존 함정의 전력 분배는 교류로, 함정 내에서 사용되는 무기체계 및 기타 장비 또한 교류 전류를 사용하고 있다. 하지만 직류 배전 방식이 기술의 발전으로 가능하게 되고 배전 과정에서 발생하는 손실도 교류 배전 방식에 비해 적기 때문에 직류 배전의 사용이 부각되고 있다.^[9] 이에 직류 배전을 함정에 적용하기 위하여 급격한 외란(外亂)에 의한 송전 방해에도 불구하고 안정적인 전력의 공급을 가능하게 하는 배전 방식에 대한 연구가 진행되고 있다.^[10] 전력 배분의 안정성 문제에 대하여 축전지와 같이 신뢰성이 보장되는 에너지 저장장치는 새로운 해결책을 제시한다. 에너지 저장장치를 함정에서 운용할 경우, 원동기를 최적 효율에서 구동시켜 에너지 효율을 늘리고 잉여 전력의 문제를 해결할 수 있다. 또한 유압 및 기계 구동 방식에 의해 제어되는 보조 장비를 전기구동 시스템으로 전환함으로써 전체 함정의 체계는 더욱 간소화 될 수 있으며^[6] 에너지 저장장치를 각 장비와 직접 연결하여 사용의 신뢰성을 보장할 수 있다. 하지만 함정의 무게가 증가된다는 단점과 에너지 저장장치에서 제공되는 직류 전력을 교류로 전환하는 장치의 추가 설치, 직류 전력을 바로 장비에서 사용하기 위한 장비의 직류화 등 다소 복잡한 과정이 발생하는 단점이 있기 때문에 함정의 여건과 목적, 요구되는

용량에 따라 에너지 저장장치의 종류와 크기를 결정하여야 한다.

기계식 추진 방식의 함정도 마찬가지로 배전 체계 손상 시 함정 전체의 기능이 마비되기 때문에 전력 배전 계통을 이중화하여 함정을 건조한다. 통합 전기 추진의 경우, 모든 시스템이 전력으로 통합되기 때문에 이러한 전력 배전 계통의 다중화는 필수요소이며, 배전 체계 손상 시 신속한 수리가 아닌 신속한 교체를 가능하게 하는 구역화 및 모듈화가 필요하다고 판단된다. Fig.2.6^[8]은 전력변환모듈 기반의 통합전력체계 구성 개념도이다.

이러한 전력변환장치에 의한 배전계통 구성은 구역별 중요 부하의 정상전원과 대체전원 교체가 즉각적으로 자동 전환될 수 있고, 고전압 추진 배전반과 전기적으로 격리되어 전력변동의 영향을 상호 차단할 수 있어 통합전력체계의 전투 생존성을 극대화할 수 있다.

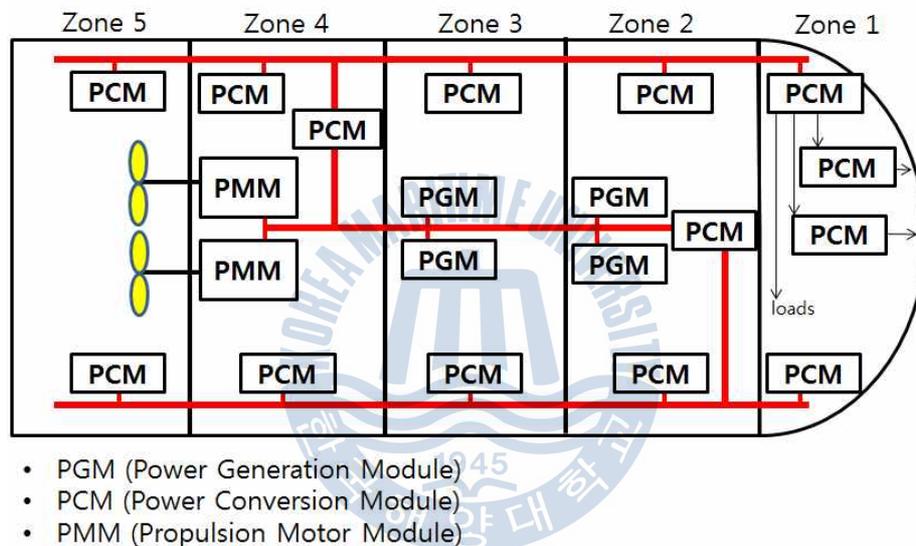


Fig.2.6 Configuration for IPS based electric power convert module

제 3 장 IPS의 동력 시스템 구성과 평가 방법

함정의 원동기에서 생산되는 동력은 함정의 추진(propulsion), 무기체계(weapon system), 함정 내 생활(ship service)에 사용된다. 본 장에서는 이러한 동력을 생산하는 원동기의 구성을 동력 시스템(power system) 이란 용어로 통일하였다. 동력 시스템은 추진력을 생산하는 추진 시스템(propulsion system)과 전력을 생산하는 발전 시스템(electric power system)으로 구성된다.

3.1 동력 시스템 구성 비교

3.1.1 기계식, 복합식 추진 함정의 동력 시스템 구성

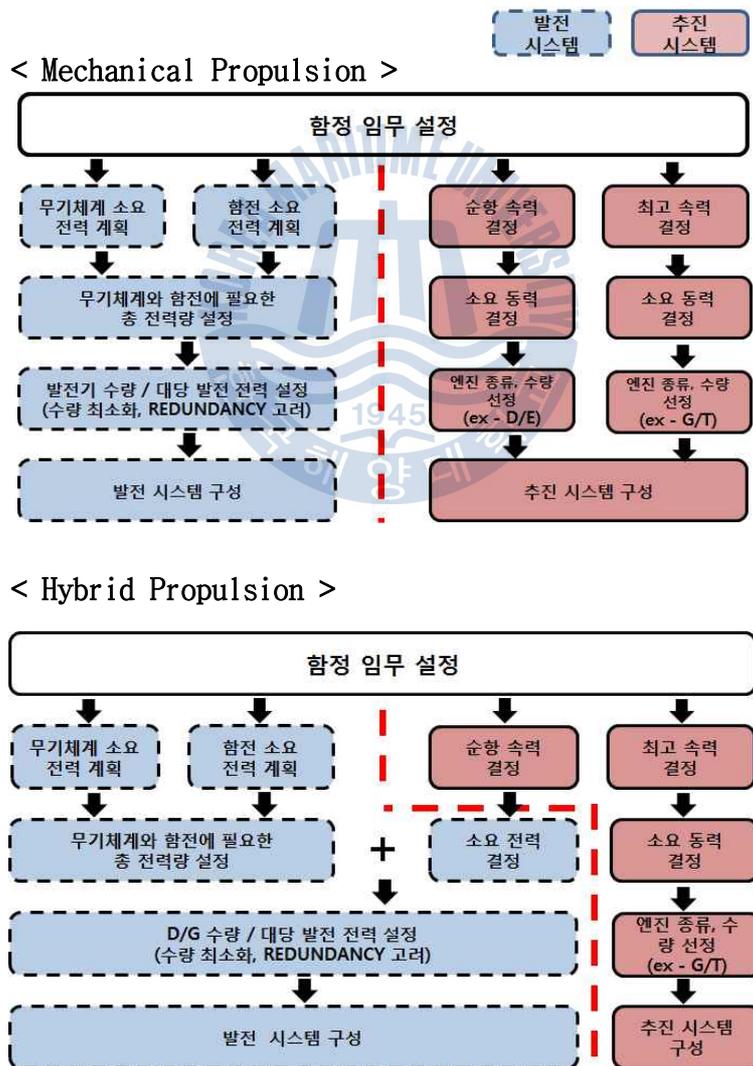


Fig.3.1 Concept for mechanical & hybrid system arrangement

함정의 목적과 임무가 설정되면 그 수행을 위한 함정의 배수량, 항속거리, 최고속력, 순항속력, 운용 무기체계 등의 개괄적인 군(軍)요구성능(ROC ; Required Operational Capability)이 제시 되고 이를 바탕으로 함정에 필요한 각종 체계의 세부적인 제원들이 최고요구성능조건(TLR ; Top level of Requirement)을 통해 결정된다. 이러한 과정으로 기계식 추진 함정의 추진 시스템에 요구되는 순항속력과 최고 속력에 따라 각각의 소요 동력을 결정하고 각 속력에서 필요한 추진기관의 최적의 수량과 그 종류를 결정하여 함정의 전체 동력 시스템을 구성한다. 또한 발전 시스템은 함정의 임무 수행을 위해 필요한 함정 내 모든 체계와 각종 장비, 승조원의 생활에 필요한 전력을 통합하고 추가적인 전력 여유 (redundancy)를 감안하여 총 생산 전력을 추정한 후 구성된다. 이 과정에서 추진 시스템과 발전 시스템은 각각 독립적으로 구성된다.

하지만 복합식 추진 함정의 경우, 순항 속력에서는 함정의 발전 시스템에서 생산한 전력을 추진에 함께 사용하기 때문에 추진 시스템과 발전 시스템이 일부 병렬로 구성되게 된다.

Fig.3.1은 기계식 추진 함정과 복합식 추진 함정의 동력 시스템 구성 개념을 나타낸 것이다.

3.1.2 IPS의 동력 시스템 구성의 고찰

IPS의 동력 시스템은 기계식, 복합식 추진 함정의 동력 시스템과는 다르게 추진력을 생산하는 추진 시스템이 없으며 발전 시스템에서 생산한 전력을 이용하여 전동 모터에서 추진력을 생산한다. 기계식 추진 함정의 동력 시스템은 추진 시스템과 발전 시스템이 분리되어 추진력과 전력이 독립적으로 생산되기 때문에 동력의 전환(전력→추진력 / 추진력↔전력)이 불가능하다. 하지만 IPS의 동력 시스템은 발전 시스템만으로 구성되어 동력의 전환(추진력↔전력)이 가능하다. 즉, 함정의 필요에 따라 동력 시스템이 생산하는 동력을 추진 전력, 무기체계 전력, 생활 전력에 다양한 비율로 배분이 가능하다. 따라서 함정 내 설치되어 있는 원동기의 조합을 통해 생산 가능한 동력의 경우의 수가 동일한 조건의 기계식 추진 함정에 비해 많다. Fig.3.2는 최적 부하에서의 출력이 1MW인 원동기 1대, 2MW인 원동기 2대, 5MW인 원동기 2대로 각각 기계식 추진 함정과 IPS 함정의 동력 시스템을 구성한 후 원동기를 최적 부하에서 구동하며 생산 가능한 동력의 경우의 수를 표현한 것이다. 기계식 추진 함정은 1MW 원동기 1대로 전력을 생산하

여 무기체계 사용 전력과 함정 내 생활 전력으로 사용하며, 2MW 원동기 2대, 5MW 원동기 2대로 추진 동력을 생산한다. 따라서 기계식 추진체계가 최적 부하에서 생산 가능한 동력의 경우의 수는 9 가지이다.

반면, IPS 함정의 동력 시스템은 기계식 추진 함정과 다르게 원동기의 최적 부하에서 생산 가능한 동력(전력)의 경우의 수가 15가지이다. 이 때 모든 운용 단계에서 IPS의 동력 시스템을 구성하는 원동기는 모두 최적 부하에서 구동한다.

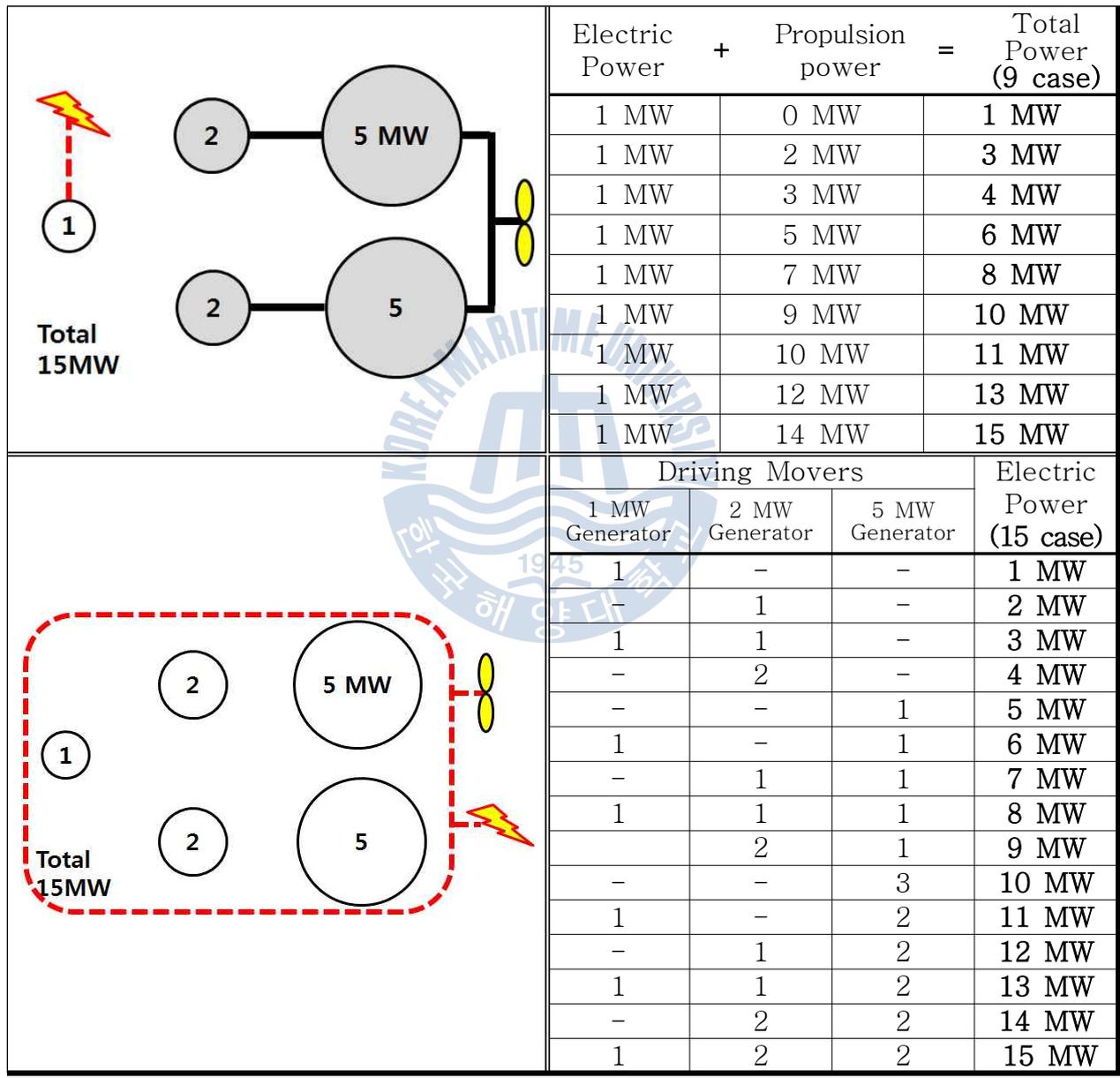


Fig.3.2 Comparison of the optimal efficiency stage between mechanical system and integrated power system

IPS 함정의 동력 시스템의 다양한 동력(전력) 운용은 함정 내 가용 전력의 극대화 및 전력 변환 장치에 의한 에너지 변환을 용이하게 하여 다양한 임무를 동시 다각적으로 수행하는 미래 함정에 능동적인 전력 공급을 가능하게 한다. 또한 무기체계의 사용 측면에서 볼 때, IPS 함정은 필요에 따라 15 단계의 동력을 모두 무기체계에 필요한 전력으로 사용 가능하다. 예를 들어 Fig.3.2와 동일한 기관체계로 구성된 미래 함정에서 최대 15MW를 사용하는 무기체계가 사용될 경우(실제로 美 해군은 2010년에 포구 에너지 33MJ의 레일건의 시험 발사를 성공하였고, 포구 에너지 64MJ의 레일건을 개발해 차기 구축함에 탑재할 계획이다.^[11]), IPS 함정은 경우에 따라 추진을 하지 않음으로써 추진에 소요되는 모든 동력을 모두 무기체계에 필요한 전력으로 전환하여 사용 가능하다. 하지만, 기계식 추진의 경우는 이와 같은 사용이 불가능하다. 이에 이러한 특징을 극대화시키기 위해서 IPS 함정의 동력 시스템 구성 개념은 기계식 추진체계의 구성 개념과 다르다.

IPS 함정의 동력 시스템 구성 시 추가적으로 필요하다고 판단되는 요소를 다음과 같이 정리하였다. 동력 시스템의 구성 시 이러한 요소들을 고려하여 발전기 용량과 수량을 선정하여야 할 것이다. Fig.3.3은 만재톤수 5,500톤, 함정 내 전력 요구량 5 MW의 함정을 대상으로 발전기 용량과 수량을 선정 하는 과정을 나타낸 것이다.

1) 함정 임무 세분화

- 정박(anchor), 기동(maneuver), 경비(patrol), 훈련(drill), 전투(combat) 등의 각 상황을 함정의 속력, 운용 장비 등에 따라 세분화된 임무를 설정한다.

2) 임무별 소요 전력 사용 범위 예측

- 설정한 함정의 각 임무 단계에서 함정에 필요한 전력의 사용 범위 및 총 요구 전력을 정확히 예측한다.

3) 예측된 소요 전력의 운용 시간 비율 예측

- 4) 높은 시간 비율을 갖는 소요 전력량을 우선 시 하여 각 소요 전력량에서 원동기가 최적 효율로 구동되도록 발전기를 구성

- 5) 기타 요소 (무게, 인력, 공간, 연료 소비, 환경 등)를 고려하여 발전 체계 구성 요소 선택 및 배치

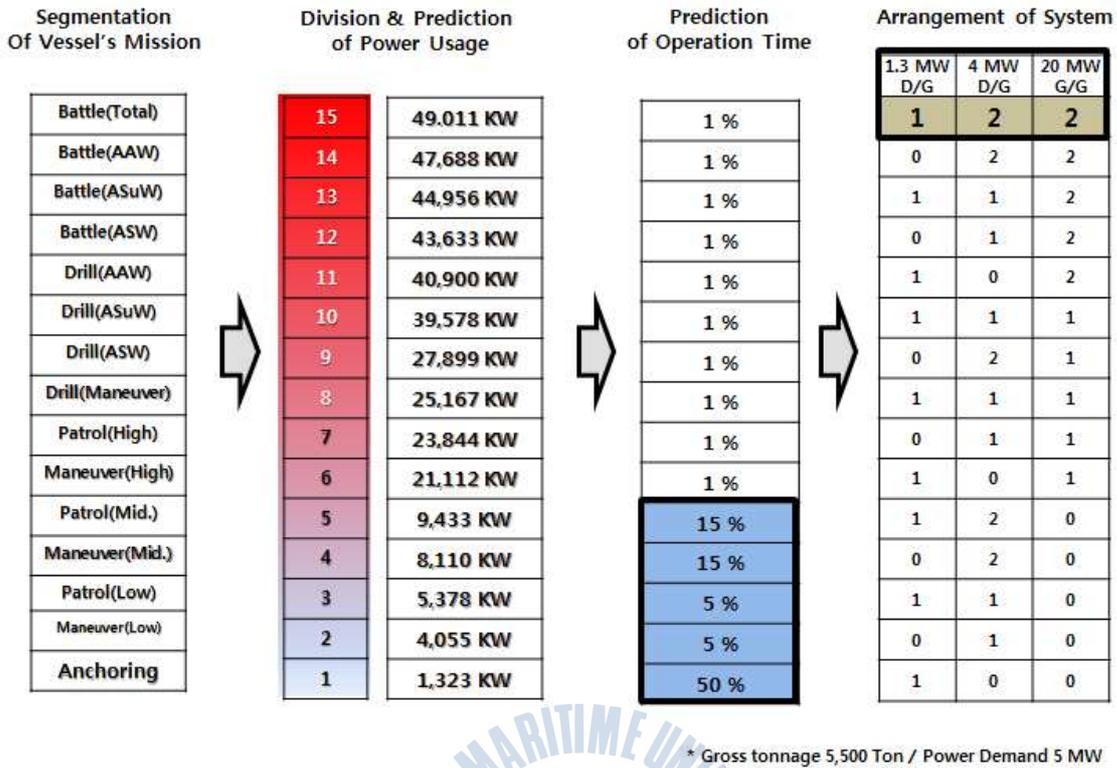


Fig.3.3 Procedure of generator selection for IPS

Fig.3.4는 IPS 함정의 최적의 동력 시스템 구성을 결정하기 위한 과정을 보인다.

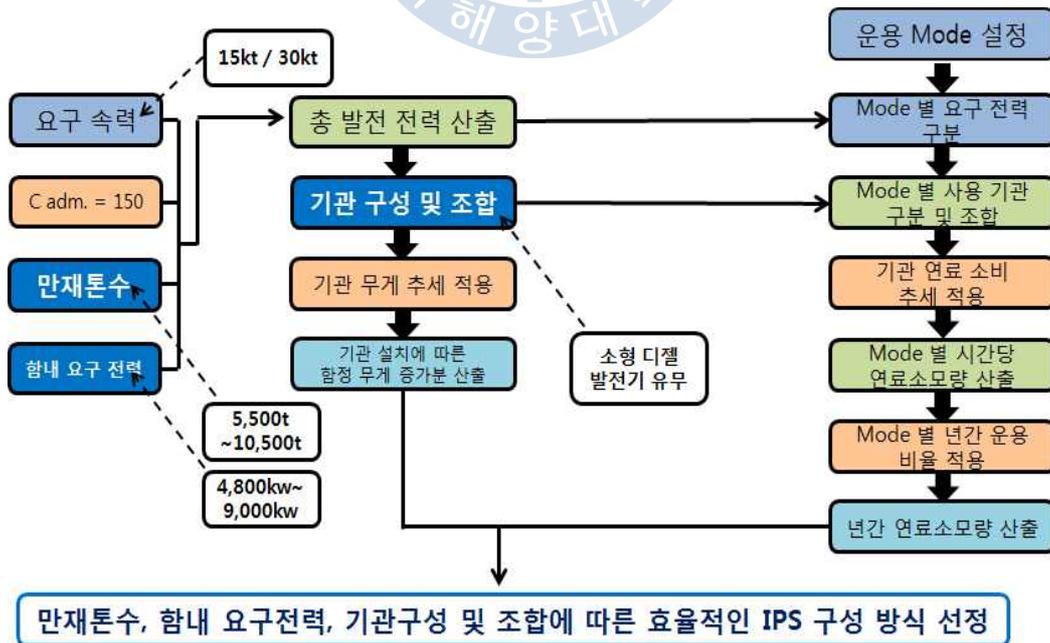


Fig.3.4 Process of optimizing arrangement for IPS

3.2 IPS 동력 시스템의 최적화 평가 인자

최적화(最適化)란, 어떤 조건 아래에서 주어진 대상의 효과를 최대 또는 최소로 하는 거나 가장 알맞게 하는 것을 말한다. 따라서 동력 시스템의 구성을 위한 최적의 원동기 용량, 수량 선택을 위해서는 그 효과를 최대 또는 최소로 하거나 가장 알맞게 해야 할 평가 인자(因子)가 필요하다. 일반적으로 상선과 같은 선박(船舶)의 경우, 경제성이 첫 번째 인자가 될 것이다. 경제성은 연료의 소비, 선박의 건조 비용, 소모품 비용, 수리비용 등으로 표현될 수 있으며 이들 요소는 동력 시스템의 최적 선택을 위해 중요한 역할을 한다. 그러나 해상에서의 전투를 주 임무로 하는 해군 함정(艦艇)의 특성 상 함정의 동력 시스템의 최적화 평가 인자는 이와 구별된다. 특히, 상선의 평가 인자로 우선시 되는 경제성은 함정의 평가 인자로서의 비중이 적으며 함정의 목적에 맞게 전투 능력에 보다 큰 비중을 두어야 한다.

본 연구에서는 IPS 동력 시스템의 최적화 평가 인자로 1)전투능력, 2)운용성, 3)경제성, 4)환경 친화성의 네 가지를 검토하였으며, 각 인자를 구성하는 요소를 고찰하였다.

3.2.1 전투 능력

함정의 전투 능력은 IPS 동력 시스템의 최적화 평가 인자 중 가장 큰 비중을 차지한다. 전투 능력은 함정의 기동력(機動力)과 무기체계의 능력, 작전 지속 시간, 최대 작전 반경 등의 유형(有形) 전투력과 구성원의 전투 능력, 교육 훈련, 부대 사기와 같은 무형(無形) 전투력으로 구성되며 유형 전투력은 정량화가 가능하다.

1) 기동력

기동력은 해상에서 특정 상황에 빠르게 대처하고 작전 지역까지 빠르게 이동할 수 있는 능력으로 함정의 최고 속도이나 엔진의 역전(逆轉)능력 등으로 결정될 수 있다. 최고속력은 엔진의 최대 출력, 함정 기관의 종류, 함정의 중량(무게) 등의 영향을 받으며 역전 능력은 함정 기관의 종류 (한국 해군의 참수리급 고속정에서 사용되는 소형 고속 디젤 기관은 충무공이순신급 구축함에서 사용되는 디젤 기관에 비해 역전 능력이 탁월하다.)에 따라 결정된다.

2) 무기체계 능력

무기체계 능력은 함포, 미사일, 어뢰 등의 적재 수량, 탐지 거리, 무장의 사정(射程) 거리, 작전 지속 능력 등을 통해 결정된다.^[12] 그리고 이들 능력들은 함정 기관체계와 특별한 관련이 없어 보인다. 하지만, 기관체계의 중량 증가는 상대적인 무기체계 적재량의 감소로 이어져 전투력의 손실을 가져오고, 또한 적재 가능한 유류의 양을 감소시켜 작전 지속 시간과 최대 작전 반경을 감소시킨다. 따라서 동력 시스템의 중량은 무기체계 능력을 결정짓는 모든 인자들의 적재량에 영향을 미치는 중요한 평가 인자라 할 수 있다.

3) 작전 지속 시간과 최대 작전 반경

함정의 임무 수행에 있어 선적 가능한 재화(載貨)의 양을 늘리거나 단위 시간 동안 소비되는 재화의 양을 줄일 수 있다면, 해상(기동 군수) 또는 육상에서의 보충 수급 없이 한정된 재화의 양으로 보다 오래, 보다 멀리 까지 임무의 수행이 가능해 진다. 이러한 재화에는 연료, 주식, 부식, 청수, 윤활유, 탄약 등이 포함된다. 그리고 동력 시스템의 중량은 선적 가능한 재화의 양에 영향을 미칠 수 있는 평가 인자이며 연료 소비율과 같은 재화의 소비 경향 또한 중요한 평가 인자가 된다.

기동력과 무기체계 능력, 작전 지속 시간과 최대 작전 반경에 공통적으로 중요한 영향을 미치는 함정 동력 시스템의 평가 인자는 기관체계의 중량이다. 중량의 증가는 동일한 원동기의 출력 대비 함정의 최고 속력을 줄여 기동력을 저하시키며, 무기체계의 적재량을 줄여 전체적인 전투력을 저하시킨다. 또한 작전 지속 시간과 최대 작전 반경에 영향을 미치는 연료와 같은 재화의 소비율 또한 중요한 평가 인자가 된다.

3.2.2 운용성

운용성이란 함정에 주어진 임무를 수행하기 위하여 부대 및 장비를 그 기능과 성능에 적절하게 사용하는 것으로, 동력 시스템을 운용할 때의 소요 인력, 정비 주기, 소음과 진동, 고장률, 수리를 위한 접근과 배치의 용이성 등으로 평가 될 수 있다. 그러나 이 요소들에 대한 동력 시스템의 선택 과정(ROC, TLR)과 함정 건조 단계에서의 평가는 그 한계가 있기 때문에 시운전 과정에서야 정확한 평가가 이루어질 수 있다. 따라서 함정 동력 시스템의 최적화를 평가하기에 그 한계가 있다. 특히 IPS의 경우, 세

계적으로 운용 중인 함정의 종류와 수가 매우 적기 때문에 기존 운용함의 자료를 바탕으로 한 검토 또한 어렵다. 하지만, 함정의 동력 시스템의 무게에 따라서 그 부피도 증가한다고 볼 때, 동력 시스템의 중량이 적을수록 함정 내에서의 접근과 배치의 용이성이 증가하며 절약된 공간은 승조원의 장비 운용 공간 및 생활 공간으로 사용이 가능하여 운용성이 향상될 것으로 판단된다.

3.2.3 경제성

경제성이라는 개념의 구체적 내용은 매우 다양하게 사용되는데 동력 시스템의 경제성을 검토할 때, 적용 가능한 경제성은 여러 가지 분류 중 기술적 경제성(技術的 經濟性)을 들 수 있다. 기술적 경제성은 생산성 또는 양적 경제성이라고도 하며, 재화 투입에 있어서의 그 양적 절약성(量的 節約性) 또는 달성 성과로 나타낸다.^[13] 함정 기관의 경우, 투입되는 재화는 구입비, 연료 소비량, 인건비, 소모품 및 수리 부속 구매비, 수리비 등을 들 수 있다. 따라서 이들 투입 재화를 얼마나 절약할 수 있는냐에 따라 경제성의 최적화가 가능하며, 이들 투입 재화로 평가 인에 대한 검토 가능하다. 이중 연료 소비량은 함정의 전 운용 기간 중 지속적인 경제적 영향을 미치며 현재의 에너지 시장과 미래 전망을 고려했을 때 큰 의미를 갖는다.

미국 에너지정보청(EIA : Energy Information Administration)이 최근 발표한 단기 에너지시장 전망보고서에 따르면 국제유가가 2014년까지 하락세를 보일 것으로 예측했다. 하지만, 지금의 유가는 1970년대 두 차례의 석유파동과 이라크전, 최근의 멕시코 만 원유 유출 사고, 환율의 급변, 중국 등 신흥 국가들의 급격한 성장 속도 등으로 인하여 이미 배럴당 100달러를 육박하고 있다. (두바이유 : 107.81 달러/배럴, 브렌트유 : 113.28 달러/배럴, 서부텍사스유 : 95.88 달러/배럴 - 2013년 1월 기준) 이러한 상황은 필연적으로 선박에서 어떻게 보다 적은 연료로 많은 화물을 멀리까지 운송하느냐에 대한 고민을 가져왔으며 해군 함정에서는 보다 적은 연료로 먼 작전 구역 까지 오래 작전을 지속 가능하게 하느냐는 고민을 가져왔다. 적은 연료의 사용은 재화의 양적 절약성을 증가시키며 지속 작전 가능 시간의 확보는 전투력의 향상을 가져온다는 점은 앞서서도 언급하였다.

3.2.4 환경 친화성

지구온난화에 의한 기후 변화는 특정 국가, 특정 계층의 문제가 아닌 전 지구적인 공통 관심사가 되었으며 정치와 경제 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있다. 따라서 해운

업계에서는 경제성과 더불어 환경 친화성을 선박 동력 시스템 최적화하기 위한 기술적, 제도적 조치들이 진행되고 있다.

선박의 연료 소비가 많을수록 배출되는 CO₂ 등의 온실가스의 양은 증가한다. 해운 분야에서 발생하는 온실가스(GHG : Green House Gas)의 양은 전체 온실가스 배출량의 3%를 차지하는데 국제해사기구(IMO : International Maritime Organization)에서도 선박의 에너지 효율을 향상시켜 배기 배출물을 저감하기 위한 기술적, 운항(運航)적 조치 방안을 다음과 같이 채택하였다.^[14]

- 1) 선박 에너지효율관리계획(SEEMP : Ship Energy Efficiency Management Plan)
 - 총중량 400톤 이상의 전체의 선박에 SEEMP 유지를 의무화
 - 현존하는 선박의 CO₂ 배출량 등을 지속적으로 모니터링하고 CO₂ 배출저감을 위해 가장 효율적인 운항 방법(최적 항로 선정, 선박의 적절한 관리 등)을 선별하도록 관리

- 2) 운항선 에너지 효율지수(EEOI : Energy Efficiency Operational Indicator)
 - 선박의 운항 중 배출되는 CO₂의 양을 운송량(ton · nmile)로 나누어 지표화
 - 실제 연료 소비에 해당하는 지수로 운항 조건에 따라 다름

$$EEOI = \frac{CO_2 \text{ 환산계수} \times \text{연료소모량} \times CO_2 \text{ 저감기술인자}}{\text{실화물량} \times \text{실항해거리}}$$

(g CO₂ / ton · nmile)

- 3) 신조선 에너지효율지표(EEDI : Energy Efficiency Design Index for new ships)
 - 총중량 400톤 이상의 신조선에 대하여 EEDI 계산을 의무화
 - 선박의 연비지수로 선박의 설계자료로부터 운송능력(톤마일)당 CO₂ 배출량(g)을 지표로 표시

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ 환산계수} \times \text{연료소모량} \times \text{기관출력} \times CO_2 \text{ 저감기술인자}}{\text{화물량} \times \text{선속}}$$

(g CO₂ / ton · nmile)

이중 EEOI와 EEDI는 배기 배출물의 배출량을 지수화 함으로써, 환경에 미치는 영향을 정량화 했다는 점에 선박 동력 시스템의 최적화를 위한 평가 인자로 적용이 가능하다. 그러나 전투 함정의 경우, 그 전투 임무 수행이라는 특수성과 EEDI, EEOI의 중요 평가 인자인 화물량을 정의할 수 없다는 점에서 위 규제를 적용하기에 어려움이 있다. 또한 운항 중인 상선의 수와 그 운항 규모에 비해 극히 낮은 비율로 운항되는 함정의 배출 가스를 감소시키기 위한 투자 대비 효과에 대한 의문이 제기될 수 있으며 함정의 가스터빈 기관의 고속 회전, 고온 연소 등의 특성에 따라 배출되는 배기가스의 특성이 상이(相異)함을 고려할 때 그에 맞는 새로운 규제와 평가 방법의 필요성이 필요할 것으로 판단된다.

단, 함정에서 배출되는 CO₂의 양은 소모되는 연료의 양과 비례한다는 점에서 전투 능력과 경제성의 평가 인자인 연료 소비량은 환경 친화성 또한 추가적으로 평가할 수 있다.

함정 추진 체계의 최적화 평가 인자로서 전투 능력은 그 비중이 가장 크다고 할 수 있다. 유형화된 전투 능력은 대표적으로 함정의 기동 속도와 무기체계의 탑재량, 작전 지속 시간과 작전 반경을 들 수 있으며, 기관 체계의 중량은 이 능력들에 공통적인 영향을 끼친다.

다음으로 중요한 평가 인자는 운용성으로 판단되나, 운용성은 앞서 언급한 바와 같이 정량화의 어려움과 운용 자료의 부족으로 기관 체계의 선택 과정에서 적용하기 어렵다.

경제성은 현재 그리고 미래의 유가 시장을 고려했을 때 주목할 만한 평가 인자로 연료 소비량, 구매비 등 기관 체계의 선택 과정에서 정량화가 가능한 요소들에 의해 결정 가능하다. 이중 연료 소비량은 첫 번째 최적화 대상인 전투 능력의 작전 지속 시간과 최대 작전 반경에 영향을 미치는 요소로써, 경제성을 최적화 하는 것과 더불어 전투 능력을 최적화하는데 또한 적용 가능하다.

마지막 평가인자로, 환경 친화성은 현재 함정에 적용하기에는 그 필요성에 대한 의문과 규제나 장치의 비현실성이 문제로 제기될 수 있다. 하지만 경제성의 고려 요소인 연료 소비량을 통해 배출되는 CO₂를 정량화할 수 있다는 점은 주목할 만하다.

Table 3.1은 네 가지 평가 인자에 대한 각각의 고려 요소의 영향을 나타낸다.

Table 3.1 Evaluation factors for optimization

Factors	Efficiency	Combat	Operation	Economic	Environment	Quantization	Prediction
Engine Max. Power		○				○	○
Type of Engines		○	△				○
Weight of System		○	△	△	△	○	○
Weapon System (Type, Quantity, Range, duration)		○				○	○
Man power		○	○				
Maintenance Cycle			○			○	
Noise & Vibration		△	○			○	
SFC (Specific Fuel Consumption)		○		○	○	○	○
UPC (Unit Production Cost)				○		○	○
RC (Running Cost)				○		○	
Fault Rate			○	○		○	
EEDI (Energy Efficiency Design Index)				△	○		
EEOI (Energy Efficiency Operation Indicator)				△	○		

따라서 본 연구에서 함정 동력 시스템의 최적화를 위하여 평가 인자 중 전투 능력의 주요 고려 요소이며 운용성, 경제성, 환경 친화성에도 영향을 줄 수 있는 동력 시스템의 중량(Weight of System)과 전투 능력, 경제성, 환경 친화성의 주요 평가 인자인 연료 소비량(SFC)을 통해 동력 시스템의 최적화 평가를 수행하였다.

3.3 평가 인자의 정량화 및 평가 방법

평가 인자인 동력 시스템의 중량과 연료 소비량은 모두 최소화할수록 시스템의 효율이 증가하는 인자로, 두 평가 인자에 의한 동력 시스템의 최적화 평가는 효율성의 수준으로 평가될 수 있다. 효율성 수준은 주어진 투입으로 생산 가능한 산출량 수준으로 표시된다. 혹은 산출량이 주어졌을 때 절약 가능한 투입량의 수준으로 표시되기도 한다. 자료 포락 분석법, 비모수효율성분석법 등으로 불리는 자료포락분석법(DEA : Data Envelopment Analysis)은 유사한 환경에 놓인 경영단위(DMU; Decision Making Unit)들

의 효율성을 상호 분석하는 방법으로 1970년대 후반 공식적으로 등장한 이래 많은 연구 분야에서 널리 활용되었다.^[15] 동력 시스템의 중량과 연료 소비량은 이 분석 방법에 적용할 경우, 동일한 산출량(최대속력, 순항속력, 함정 내 전력 요구량)을 위해 필요한 두 가지 투입량에 해당한다. 즉, 적은 중량을 가지면서 적은 연료를 소비하는 시스템이 탑재된 함정일수록 보다 효율적이라고 표현할 수 있다. Fig.3.5는 자료포락분석법의 2투입-1산출의 모델이다. 동일한 산출량(최대속력, 함정 내 전력 요구량)을 동력 시스템이 만족할 때, 산출량을 만드는 연료 소비량(input x)과 시스템의 무게(input y)에 따라 모든 시스템은 강효율(strongly efficient), 약효율(weakly efficient)에 상관없이 모두 생산가능집합 (output possibility set)에 포함된다. 연료의 소비량을 최소화 하는 것이 동력 시스템 선정의 최우선 기준이 될 경우 생산변경 (production frontier)의 강효율 지점인 산출 B (output B)의 구성이 다른 구성에 비해 최적화 되었다고 할 수 있으며, 기관체계의 무게를 최소화 하는 것이 기준이 될 경우 산출 C (output C)의 구성이 다른 구성에 비해 최적화 되었다고 할 수 있다. 하지만 연료의 소비량과 시스템의 중량을 동시에 고려할 경우 산출 A (output A)의 구성이 최적화 되었다고 할 수 있다.

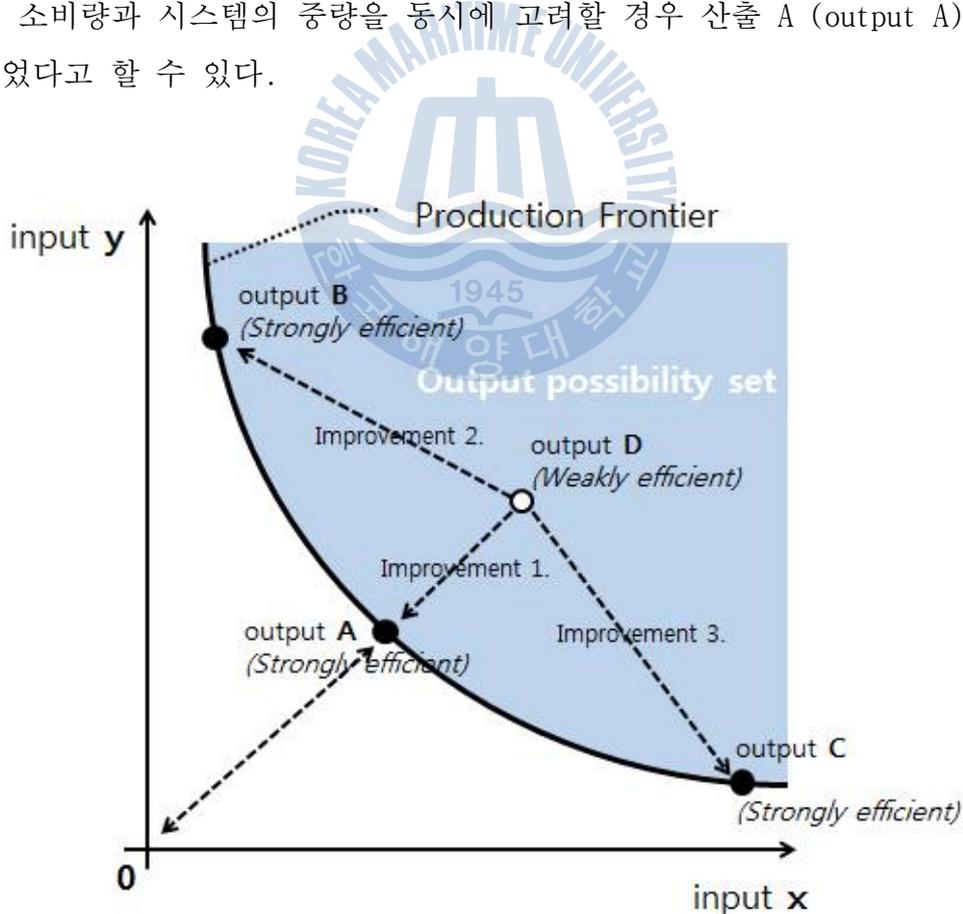


Fig.3.5 '2 input - 1 output' DEA model

산출 D (output D)의 경우, 산출량은 동일하나 투입량이 생산 변경 내 산출보다 커 약효율(weakly efficient)에 해당된다. 이 때, 산출 D를 산출 A, B, C로 개선하는 방법 (improvement 1.2.3) 모두 효율성 개선에 해당된다. 하지만, 본 연구에서는 연료의 소비량과 시스템의 중량이 모두 적은 산출 A와 같은 구성을 선정하여 원점과 두 투입량의 거리인 $\overline{O-output}$ 을 산출하였으며 이 때, 산출 값은 효율성의 수준으로 그 값이 최소가 될수록 최적화된다. 원점(O)의 투입량 x,y는 CODOG 체계의 연료소비량과 동력 시스템의 중량으로 하였으며 최적 선택을 판단할 경우, 두 투입량의 중요도에 따라 가중치(weight factor α, β)를 적용할 수 있다. 본 연구에서 가중치 α 와 β 를 동일하게 적용하였다.

$\overline{O-output}$ 은 아래의 과정으로 산출하였다.

$$\overline{O-output} = \sqrt{\alpha \left(\frac{input\ x_A - input\ x_{min.}}{input\ x_{min.}} \right)^2 + \beta \left(\frac{input\ y_A - input\ y_{min.}}{input\ y_{min.}} \right)^2} \quad (3-1)$$

$\overline{O-output}$: 효율성 수준 (최소값 = 최적화)

$input\ x_A$: 동력 시스템 구성 A의 연료 소비량

$input\ x_{min.}$: CODOG 체계의 연료 소비량

$input\ y_A$: 동력 시스템 구성 A의 기관 체계 중량

$input\ y_{min.}$: CODOG 체계의 기관 체계 중량

α : 연료 소비량 가중치

β : 동력 시스템 중량 가중치 ($\alpha + \beta = 1$)

3.4 동력 시스템의 연료소비 추세와 증량 추세 산출

함정에서 운용되는 추진용 기관과 발전용 기관은 그 목적과 생산 동력, RPM, 사용 연료 등에 따라 그 종류가 다양하다. 또한 함정의 기관은 군 규격(MILSPEC : Military Specification)을 만족하여야 하기 때문에 일반 선박에서 사용되는 기관과 구별되어진다. 특히, 전투함에서는 일반적으로 추진용 디젤 기관과 발전용 디젤 기관을 사용하지만 최고 속력을 위한 동력을 생산하기 위하여 대용량 추진용 가스터빈 기관이 사용되며, 이지스(Aegis) 전투체계를 운용하는 함정과 같이 높은 전력이 요구되는 경우에는 발전용 가스터빈 기관이 사용되기도 한다.

동력 시스템별 연간 연료 소비량과 증량을 비교하기 위해서는 이러한 특징을 갖는 함정의 기관을 추진용 디젤 기관, 발전용 디젤 기관, 추진용 가스터빈 기관, 발전용 가스터빈 기관의 4가지 종류로 구분하여 각 기관마다 공통적으로 적용할 수 있는 연료 소비 추세와 증량 추세를 산출할 필요가 있다. 따라서 현재 각국 함정에서 실제 운용 중인 기관의 자료를 종합하여 연료 소비 추세와 무게 추세를 산출하였다. Fig.3.6은 각 기관의 연료소비 추세이며 Fig.3.7은 무게 추세이다. 추세를 산출하는데 사용한 자료는 MTU, GE, MAN diesel, Wartsila, Rolls-Royce, Caterpillar, Pielstick 사에서 제작한 기관의 제원을 사용하였다.

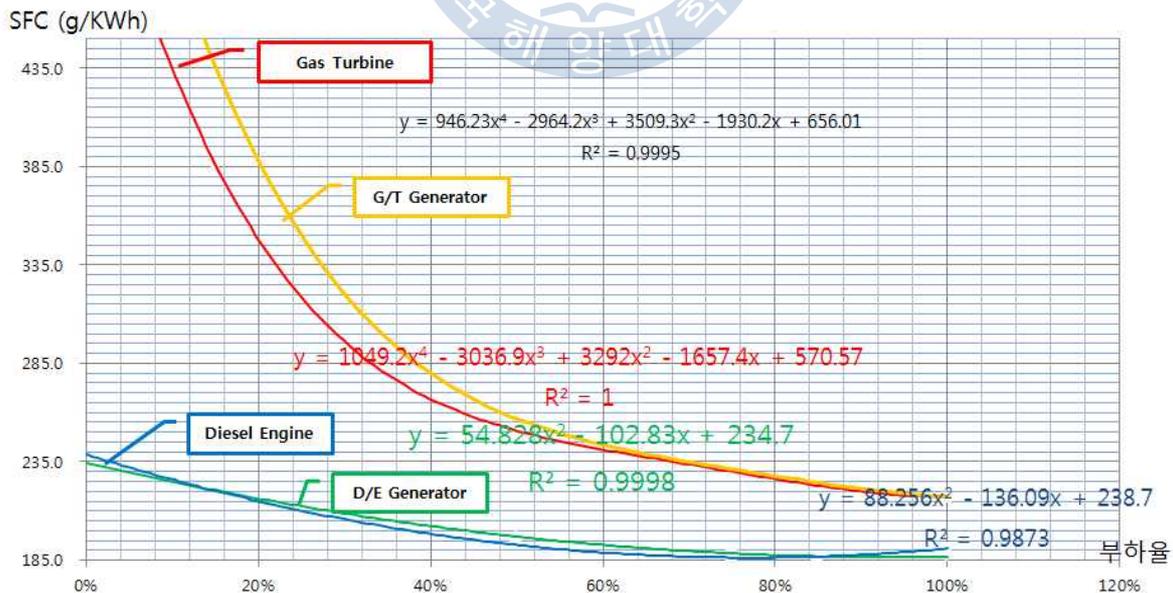


Fig.3.6 SFC tendency of diesel engine (Gen.) & gas turbine (Gen.)

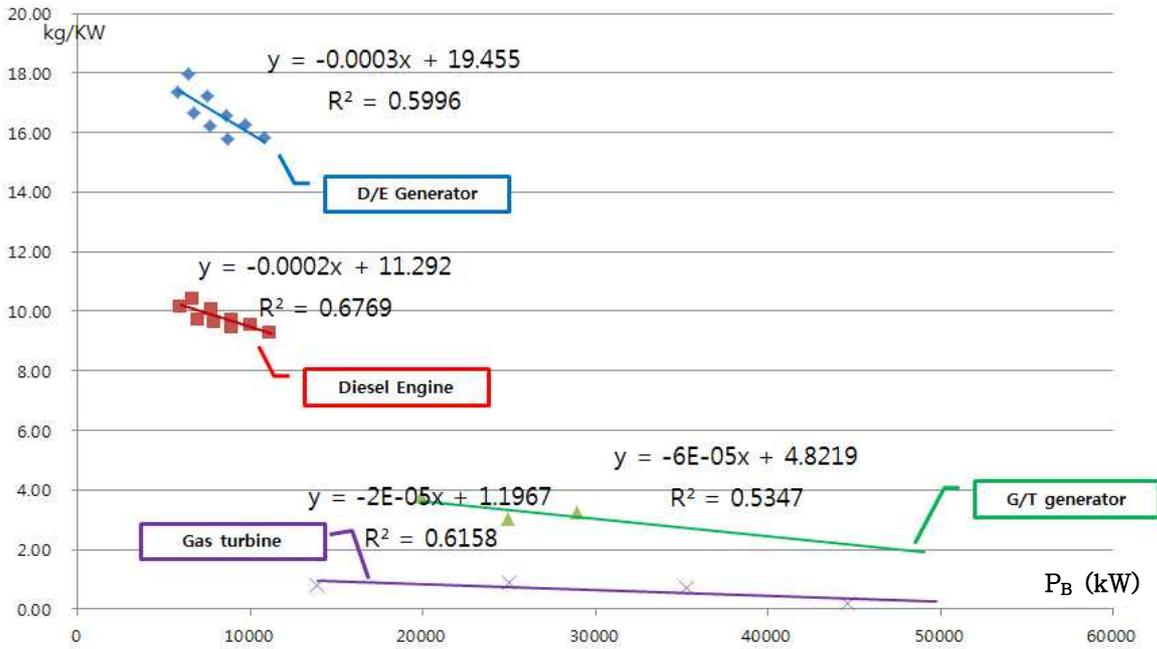


Fig.3.7 Weight tendency of diesel engine (Gen.) & gas turbine (Gen.)

산출된 추세를 통해서 살펴보면, 가스터빈 기관은 추진용, 발전용의 구분 없이 부하가 높으면 높을수록 kWh 당 연료의 소비량이 감소하여 최대 부하에서 이상적인 연료 소비 측면에서 최적 구동을 하며, 디젤 기관은 추진용은 77% 부하에서, 발전용은 94% 부하에서 최적 구동을 하는 것을 확인할 수 있다. 함정의 기관에서 배출되는 CO₂의 양은 연료소비량과 정비례하기 때문에 연료 소비 추세는 배출되는 CO₂의 추세와 동일한 양상을 갖는다고 할 수 있다.^[16]

중량 추세는 4종의 기관 모두 제동 동력(P_B)이 증가할수록 kW당 중량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 출력을 생산하는 동력 시스템에서 기관의 수량이 증가할수록 전체 시스템의 중량은 증가함을 나타낸다. 또한 발전용 기관이 추진용 기관보다 2배에 가까운 중량을 갖는 것은 기관의 생산 동력을 전력으로 전환하기 위한 발전기(Generator)가 장착되기 때문이며, 이를 통해 살펴볼 때 기계식 추진체계에 비해 발전기의 크기가 크고 수량이 많은 IPS의 경우, 전체 동력 시스템의 무게가 증가할 것으로 예상된다.

본 연구의 목적은 IPS 동력 시스템의 구성 단계를 고찰하고 최적화 정도를 비교함으로써 이상적인 동력 시스템의 구성 단계와 평가 방법을 고찰하기 위함이기 때문에 자료를 통해 산출된 추세를 같은 목적을 수행하는 기관에 각각 동일하게 적용하였다.

3.5 추진기관의 제동 동력 산출 방법

선박 또는 함정의 동력은 추진용 기관과 발전용 기관에서 생산되며 이 동력이 프로펠러에 전달되어 추진력을 만들거나 발전기를 통해서 전력을 생산한다. 이 생산된 동력이 배를 추진하거나 기타 장비, 생활에 유효한 동력으로 쓰이기까지는 여러 단계에 걸쳐 동력의 전달 과정을 거치게 된다. 그리고 이때마다 동력의 손실을 가져온다.

동력 전달의 각 단계에서 정의되는 동력의 종류는 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Classification of Power for Ship's Propulsion

Power	Symbol	Content
Indicated power	P_I [kW]	$P_I = C \cdot P_{mi} \cdot V_h \cdot n \cdot z$ <ul style="list-style-type: none"> - P_{mi} : Mean effective pressure [bar] - V_h : Swept volume [m] - n : Engine speed [RPM] - z : No. of cylinder - C : Constant
Brake power	P_B [kW]	$P_B = P_I \cdot \eta_M$ <ul style="list-style-type: none"> - η_M : Mechanical efficiency. 80~85% (in Diesel engine)
Shaft power	P_s [kW]	$P_s = P_I * \eta'_M = 2\pi \cdot T_s \cdot n / 60$ <ul style="list-style-type: none"> - η'_M : Mechanical efficiency. (included shaft bearing loss) - T_s : Torque [N·m] - n : Shaft speed [RPM]
Delivered power	P_D [kW]	$P_D = P_s \cdot \eta_T$ <ul style="list-style-type: none"> - η_T : Delivery efficiency
Thrust power	P_T [kW]	$P_T = P_D \cdot \eta_B$ <ul style="list-style-type: none"> - η_B : Propeller efficiency

원동기의 실린더에서 생산된 지시 동력(P_I)로부터 선박이 물과 공기의 저항을 이기고 전진하기 위해 필요한 유효 동력(P_E)까지는 다음의 단계로 동력의 손실이 발생한다.

$$\frac{P_E}{P_I} = \frac{P_E}{P_T} \times \frac{P_T}{P_D} \times \frac{P_D}{P_B} \times \frac{P_B}{P_I} \quad (3-2)$$

함정 추진기관의 소요 동력을 추정하는 방법은 다음과 같다.^[17]

1) 예인수조에서의 저항시험에 의한 방법

- 저항시험방법에 의해 얻어진 전달 동력 P_D 을 사용하고, 전달 효율 η_T 및 기계 효율 η_M 을 가정하여 기관의 소요 동력 P_I 을 구한다.

2) 유효 동력과 추진 요소에 의한 방법

- 저항시험 혹은 유사선의 저항자료로부터 유효동력 P_E 를 구하고, 추진 요소 또는 추진 효율을 추정하여 전달 동력 P_D 또는 직접 지시 동력 P_I 를 구한다.

3) 유사선의 자료에 의한 방법

- 선형, 기관, 프로펠러, 속력, 흡수 상태 등이 가까운 배의 정확한 항해실적, 해상 시운전 성적, 또는 예인수조에서의 저항시험 결과가 있는 경우에 그들 자료를 수정하여 필요한 동력을 추정한다.

4) Admiralty 계수에 의한 방법

- 배를 일정한 속도로 항주시키는데 필요한 기관의 동력(지시동력, 제동 동력 또는 축 동력)은 배수량 Δ (ton)의 2/3 제곱과 배의 속도 V_K (kts)의 3제곱의 곱에 비례하는 것으로 가정한다. 이때의 비례 상수를 Admiralty 계수(C_{adm})라고 한다. 이 계수 값을 기존 선박의 자료로부터 아래의 식을 통해 도출한다.

$$P_B = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V_K^3}{C_{adm}} \quad (3-3)$$

본 연구에서는 각국 해군의 전투함정에서 사용하는 기관의 제동 동력과 만재톤수, 속력을 바탕으로 C_{adm} 를 추정, 그 대푯값을 가상함정에 역으로 적용하는 방법을 통해 제동 동력을 산출하였다.

3.6 함정 동력 시스템의 연간 운용 시간 비율의 추정

실제 해군 함정이 작전 구역에서 경비 중일 때 시간에 따른 기관의 운용 비율을 분석하는 것은 큰 어려움이 있다. 함정 추진용 기관의 운용은 함정의 속력과 관련되며 발전용 기관의 운용은 함정 내 소비되는 전력과 그 운용에 관련되어 이것을 분석하여 자료로 사용하기에는 함정의 보안성에 관련된 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 아래와 같은 가정을 통해 해군 전투함정의 연간 기관운용 시간 비율을 추정하였다. Fig.3.8은 추정한 연간 운용 시간 비율을 나타낸다.

- 1) 함정은 년 중 3 개월의 함정 수리 기간과 9 개월의 함정 운용 기간을 갖는다.
- 2) 함정 운용 기간 9 개월 중 1/2은 항내 대기 한다.
- 3) 함정 운용 기간 9 개월 중 1/2은 해상에서 기동하며, 그 중 80%는 순항 속력 이하로 기동한다.^[6]
- 4) 순항 모드와 고속 모드에서 추진 기관이 최적의 효율로 구동되도록 함정은 기동한다.

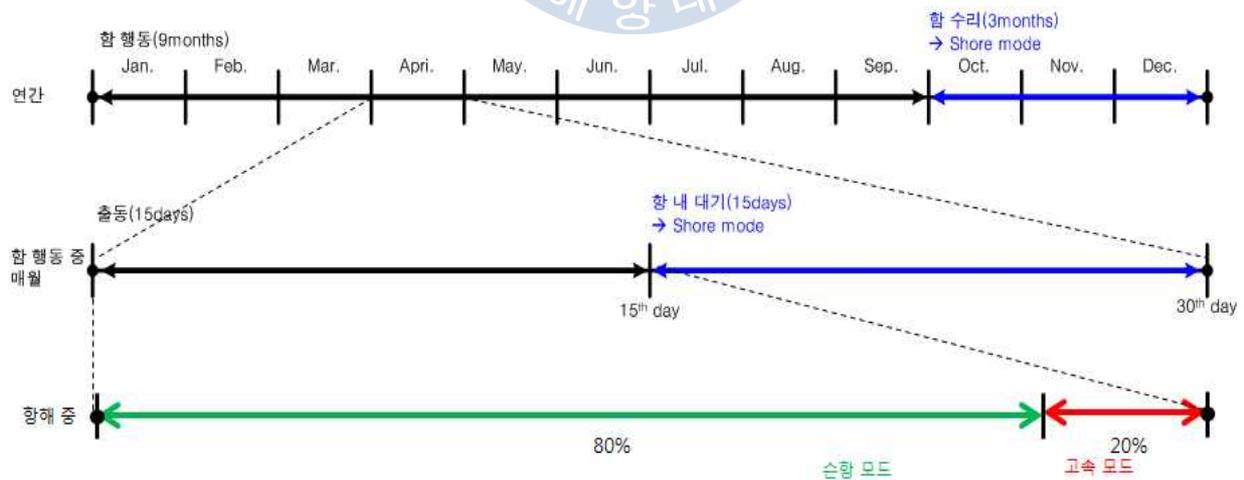


Fig.3.8 Supposed operational time rate of naval battle ship

동력 시스템별 연료의 소비량을 비교하기 위하여 각 시스템의 원동기가 최적 부하로 구동하는 가상함정의 운용 모드를 기계식 추진 중 CODOG 체계를 기준으로 다음과 같이 구분, 가정 하였다. 이 운용 모드에서 CODOG 체계의 동력 시스템을 구성하는 원동기는 최적 부하로 구동되어 연료의 소비가 최소가 된다.

- 1) STBY : 정박 (0 kts) - 발전기 1대 운용 : 시간 비율 50% (3,285 hour)
- 2) A : 순항 속도 (15 kts) - 발전기 2대 운용 : 시간 비율 20% (1,314 hour)
- 3) B : 순항 속도 (15 kts) - 발전기 3대 운용 : 시간 비율 20% (1,314 hour)
- 4) C : 최고 속도 (30 kts) - 발전기 3대 운용 : 시간 비율 5% (329 hour)
- 5) D : 최고 속도 (30 kts) - 발전기 4대 운용 : 시간 비율 5% (329 hour)



제 4 장 IPS의 동력 시스템 최적화

4.1 IPS 가상함정 설정

현재 우리 해군에서 운용 중인 전투함의 추진 방식은 모두 기계식 추진 방식으로 전기 추진 방식을 적용하여 운용 중인 함정은 소수(쌍동선형의 정보 수집함)에 불과하다. 따라서 앞서 살펴본 IPS 동력 시스템의 구성 단계에 따라 시스템을 구성하기 위하여 현재 해군에서 운용 중인 충무공이순신급 구축함과 유사한 제원을 갖는 가상의 함정을 가정하였다. 이 가상함정은 기계식 추진 방식 중 CODOG 추진 체계를 사용하며, 본 장에서는 가상함정의 동력 시스템을 IPS로 전환하기 위한 최적화 과정을 고찰하고자 한다. Table 4.1은 가상함정의 제원이다.

Table 4.1 Specification of supposed vessel

Gross Tonnage	5,500 Ton
Maximum Power Demand	5.0 MW
Quantity of Generator	4
Maximum Speed (Boost Mode)	30 kts
Cruise Speed (Cruise Mode)	15 kts

가상함정의 경우, 자항 시험이 불가능하기 때문에 구축함급 함정과 유사한 선형을 갖는 각국 함정들의 추진기관의 제동동력(P_B)과 만재톤수, 최고속력과 순항 속력을 바탕으로 구한 애드미럴티 계수(C_{adm})를 가상함정의 C_{adm} 로 가정하고 제동 동력을 산출하였다. Table 4.2는 각국 해군 함정 중 전투함의 C_{adm} 를 최고속력을 바탕으로 산출한 결과이다.

선형이 유사한 배 사이에서는 Froude 수가 동일하면 C_{adm} 이 동일하다고 할 수 있기 때문에 기계식 추진 체계가 적용된 각국 함정의 값들의 대푯값으로 가상함정의 C_{adm} ($= 150$)를 가정하였다. 식 (3-3)에 가상함정의 만재톤수($\Delta = 5,500\text{ton}$), 최고속력($V_K = 30\text{kts}$), Admiralty 계수($C_{adm} = 150$)를 통해 구한 가상함정에 필요한 추진기관(기계식 추진 방식)의 제동 동력(P_B)은 최고 속도에서 41,839kW, 순항 속도에서 5,230kW 이다.

Table 4.2 C_{adm} . of various naval vessels

case	Brake Power (P_B)(kW)	Dead Weight (Ton)	Max. Speed (kts)	C_{adm}	Remark
A1	37,389.52	5,588	29	153	CODOG
A2	37,389.52	5,947	28	143	
A3	39,000.88	6,145	28	140	
A4	43,417.2	3,917	30	115	
A5	47,020.38	7,163	31	175	
B1	38,524.93	5,690	29	150	CODAG
B2	28,610.59	5,375	26	140	
C1	78,330	10,455	30	122	COGAG
C2	74,600	9,302	31	131	
C3	64,156	10,117	30	146	
C4	76,211.36	10,160	30	123	

본 연구에서는 각 동력 시스템별 전달 손실을 고려하기 위하여 먼저 CODOG 체계의 제동 동력(P_B)에 전달 손실(loss)을 적용하여 각 시스템에 동일하게 적용할 유효 동력(P_E)을 산출하였다. 이후 각 시스템별로 서로 다른 전달 손실을 유효 동력에 역산(逆算)하여 원동기의 제동 동력(P_B)을 산출한 후 최적화 평가 인자인 연료 소비량과 중량을 추정하였다. Fig.4.1은 그 계산 과정의 이해이다.

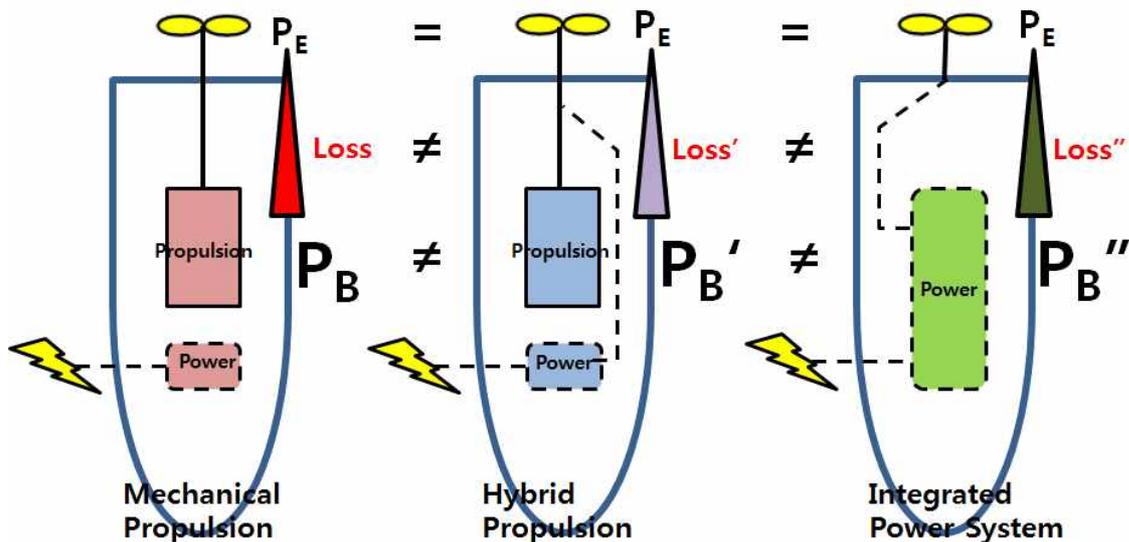


Fig.4.1 Comprehension for different P_B presume

4.2 기관 체계별 동력 전달

4.2.1 기계식 추진 체계의 동력 전달

제동 동력(P_B)이 함정과 물, 공기의 저항을 이기고 전진하는데 필요한 유효 동력(P_E)으로 전환되기까지는 추진기로 FPP를 사용할 경우 5%, CPP를 사용할 경우, 7%의 손실이 발생한다.^[2] 해군 전투함은 대부분 CPP를 사용하므로 기계식 추진 방식을 사용하는 가상함정은 동력의 전달 과정 중 7%의 손실이 발생한다. Fig.4.2^[6]는 기계식 추진체계에서의 동력 전달 과정에서 발생하는 손실을 나타낸 것이다.

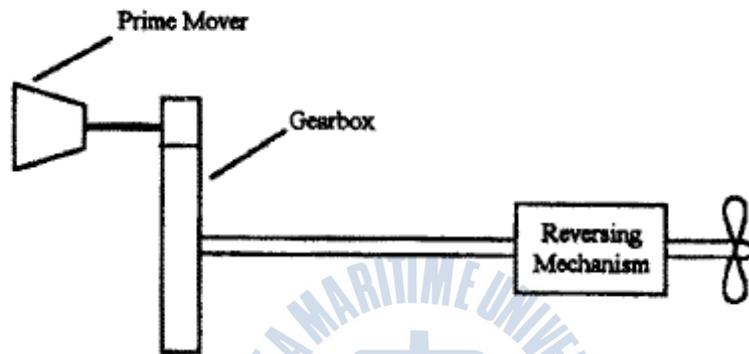


Fig.4.2 Mechanical transmission - typical efficiency at full power
fpp-95%, cpp-93%

또한 기계식 추진 방식의 함정 내에서 전력의 생산은 추진 체계와 별도로 구성되며 전력의 생산 과정에서 Fig.4.3^[6]에서 설명하는 것과 같이 5.5%의 전달 손실이 발생한다.

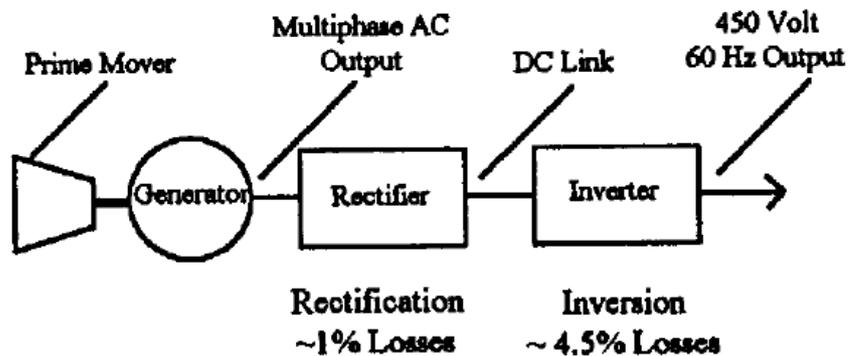


Fig.4.3 High speed generator - typical efficiency

4.2.2 복합식 추진 체계의 동력 전달

복합식 추진체계(CODLAG)를 운용하는 함정은 최고 속력에서 추진용 가스터빈 기관과 발전용 디젤 기관이 동시에 구동된다. 따라서 함정에 필요한 유효동력(P_E)을 만들기 위한 제동 동력(P_B)은 추진용 가스터빈 기관과 발전용 디젤 기관에서 함께 생산한다. 복합식 추진체계 함정은 순항 속력에서 전기 에너지로 구동하기 때문에 Fig.4.2^[6]와 달리 Fig.4.4^[6]와 같은 전달 손실이 발생한다.

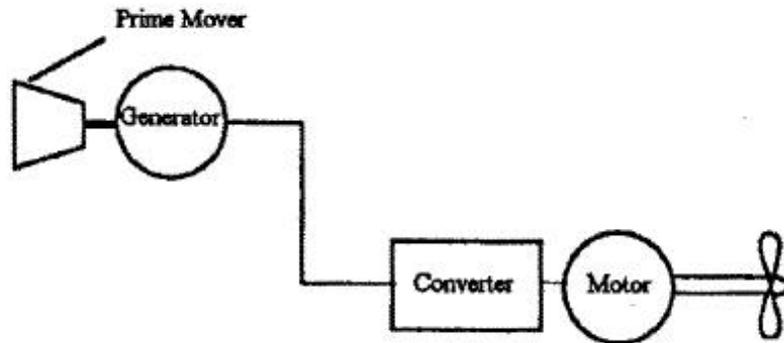


Fig.4.4 Electrical transmission
typical efficiency at full with fpp - 89%

또한 복합식 추진 방식의 함정 내에서 전력의 생산은 기계식 추진 방식과 동일하게 추진 체계와 별도로 구성되며 전력의 생산 과정에서 5.5%의 전달 손실이 발생한다.

4.2.3 IPS의 동력 전달

IPS 함정은 최고 속력과 순항 속력에서 필요한 유효동력을 추진용 기관이 아닌 발전용 기관에서 모두 생산한다. 따라서 전 속도 범위에서 추진에 사용되는 전력의 전달 과정의 손실은 Fig.4.4^[6]와 같이 11%가 발생하며 함정 내 무기체계의 사용과 생활 전력을 위한 전력의 배전 과정에서는 5.5%의 손실이 발생한다. 전형적인 전기추진 함정의 전력 배전 과정의 세부적인 전달 손실은 Fig.4.5^[18]와 같다. IPS는 그 특성 상 추진에 사용되는 전력과 무기체계, 함정 내 생활에 사용하는 전력의 비율을 조정 가능하다. 따라서 동일한 전력을 배분하여 고속에서 소수의 무기체계를 사용할 경우, 저속에서 다수의 무기체계를 사용하는 경우보다 손실되는 동력의 양은 증가할 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 가상함정 내에서 무기체계와 생활에 소요되는 전력은 이러한 배분에 따른 전력의 변동 없이 5MW를 사용하는 것으로 가정하였다.

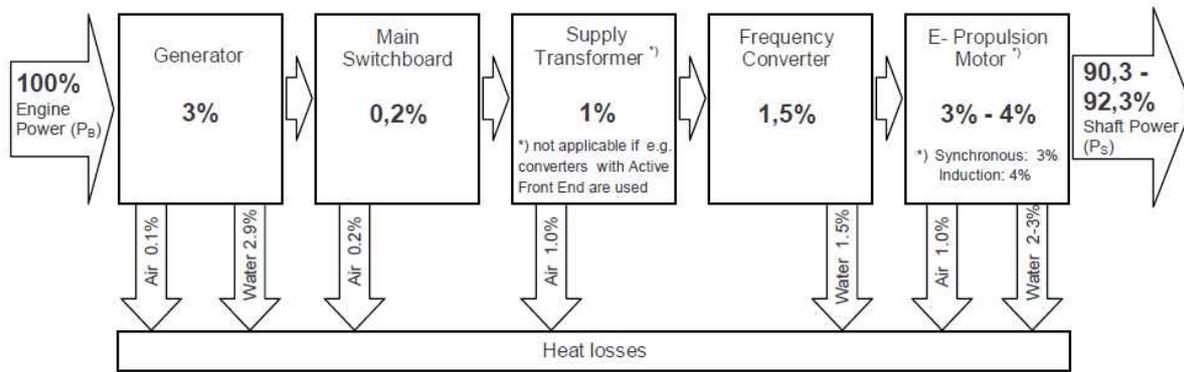


Fig.4.5 Electric propulsion plant of standard electrical components ; Typical losses



4.3 가상함정의 추진 방식에 따른 동력 시스템 구성

본 절에서는 가상함정의 동력 시스템을 현재 우리 해군이 주로 운용하는 광개토대왕함급, 충무공이순신함급 구축함과 같은 전투함에서 사용하고 있는 CODOG 시스템으로 구성하고, 이를 IPS의 동력 시스템으로 전환하여 재구성하였다.

4.3.1 CODOG 시스템의 구성

CODOG 시스템은 순항 속력에서는 추진용 디젤 기관을 이용하고 최고 속력에서는 추진용 가스터빈 기관을 이용하는 체계로 우리 해군의 전투함의 추진체계 중 가장 많이 사용되고 있다. Table 4.3은 가상함정(만재톤수 5,500톤, 최대 전력 요구량 5MW)에 구성된 CODOG 시스템의 원동기 수량과 제동 동력을 나타낸다. 가상함정에 필요한 최대 소요 동력 5MW를 생산하기 위하여 CODOG의 발전 체계는 4대의 발전용 디젤 기관이 최적 부하 94%로 구동되어 총 5,291kW의 제동 동력을 생산한다. 또한 만재톤수 5,500톤의 가상함정이 순항 속력인 15kts로 구동하기 위해서 추진용 디젤 기관이 최적 부하 77%로 구동되어 총 5,230kW의 동력을 생산하며, 최고 속력(30kts)에서는 추진용 가스터빈 기관이 100% 부하로 총 41,840kW를 생산한다.

Table 4.3 Arrangement of prime mover for CODOG propulsion system

Propulsion System		for electric power		for Propulsion	
		D/E Generator	G/T Generator	Diesel Engine	Gas Turbine
CODOG (Mechanical Propulsion)	Quantity	4	0	2	2
	P _B (kW) at 100% Load	5,629 (1,407 * 4)	-	6,792 (3,396 * 2)	41,840 (20,920 * 2)
	P _B (kW) at Optimal Load	5,291 at 94%	-	5,230 at 77%	41,840 at 100%

본 구성은 각 기관이 연료 소비 추세에 따라 최적 부하 구동이 가능하도록 한 임의 구성으로 실제 기관의 생산 동력과 부하, 주변 보기 장비 등의 구성 및 조건에 따라 변할 수 있다.

4.3.2 IPS 동력 시스템의 구성

IPS의 동력 시스템 최적화하기 위하여 발전기의 용량과 수량에 변화를 주어 다양한 구성을 비교할 필요가 있다. 본 연구에서는 발전용 소형 디젤 기관의 유무, 디젤 발전기와 가스터빈 발전기의 용량 배분, 발전용 디젤 기관의 수량에 따른 다양한 IPS 동력 시스템의 구성을 비교하였다.

현재 영국 해군에서 운용 중인 TYPE-45 함정의 동력 시스템은 대형 발전용 가스터빈 기관 2대와 중형 발전용 디젤 기관 2대, 총 4대의 발전기로 구성되어 있다. 하지만, 정박 시의 소요 전력을 생산할 경우 중형 발전용 디젤 기관을 운용하기 때문에 저부하에서의 운전으로 인한 높은 연료 소비율과 저부하 운전에 따른 오손 등의 문제점으로 인해 발전용 소형 디젤 기관의 필요성이 인식되고 있다. 따라서 본 연구에서는 TYPE-45 함정과 구성이 동일한 IPS 동력 시스템을 바탕으로 발전용 소형 디젤 기관의 유무와 중형 발전용 디젤 기관의 최적 수량에 관하여 고찰하고자 한다. TYPE-45 함정의 IPS 동력 시스템 구성은 Fig.4.6^[2]과 같으며 이것은 Fig.4.7에서 분류한 (A-2-N) 구성과 같다.

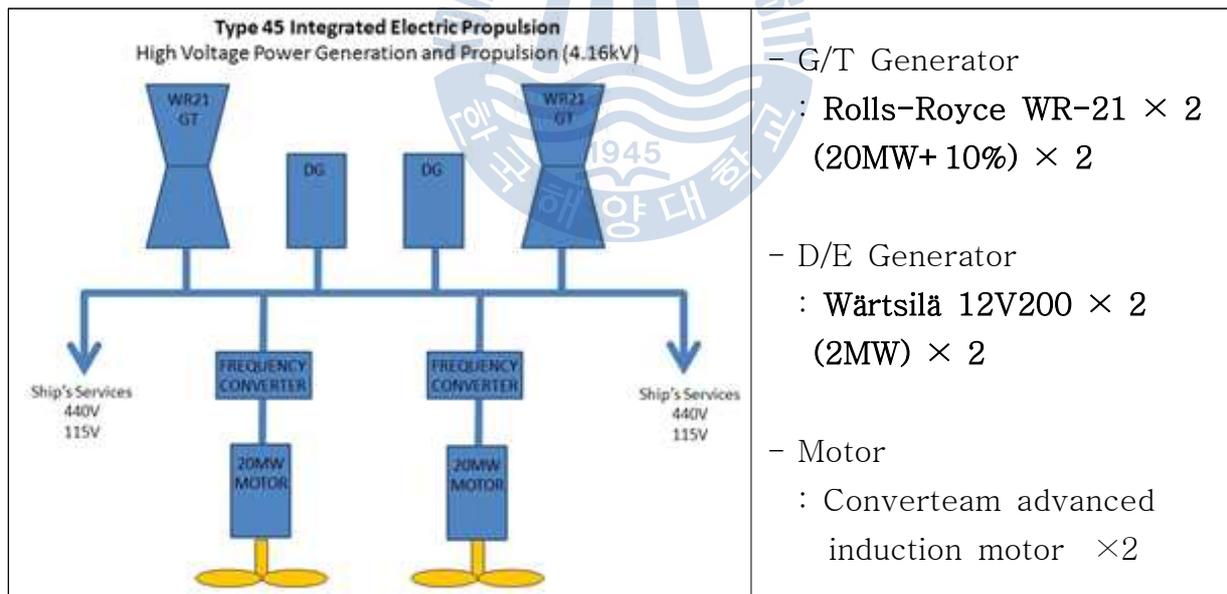


Fig.4.6 Arrangement of TYPE-45 (UK navy) propulsion system

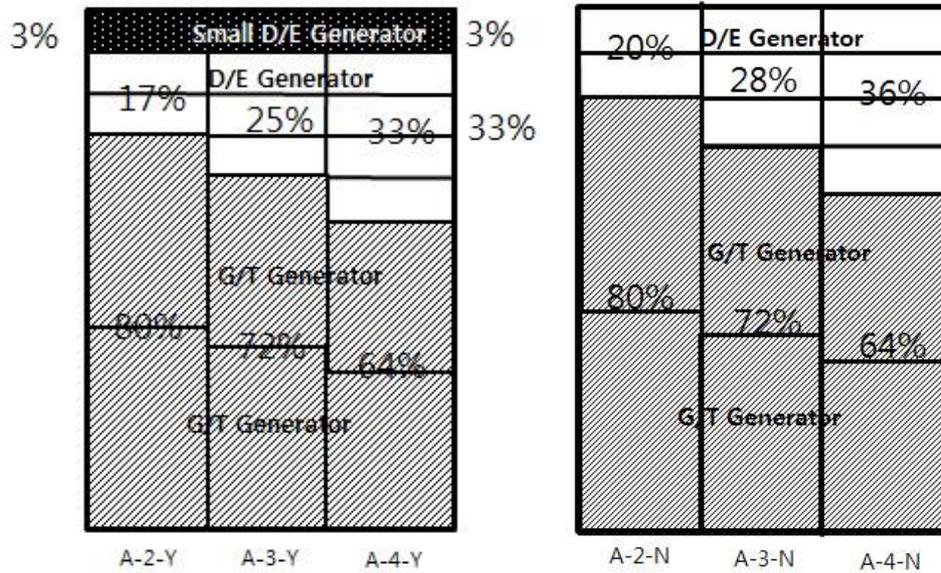


Fig.4.7 Arrangement for IPS (alteration in D/E generator)

[A-No.(중형 발전용 디젤 기관 수량)-Y(N)(발전용 소형 디젤 기관 유무)] 항목에서는 큰 전력을 생산하는 발전용 가스터빈 기관은 2대로 고정하고 발전용 디젤 기관의 수량을 2대, 3대, 4대로 변화를 주어 동력 시스템을 구성 하였다. 또한 각 기관체계는 소형 발전기의 유무에 따라서 구분되기 때문에 A- 항목은 Fig.4.7과 같이 총 6 개 구성이 고려된다.

4.4 동력 시스템의 연간 연료 소비량 및 중량 산출

4.4.1 CODOG의 연간 연료 소비량과 중량 산출

CODOG 추진 체계를 운영하는 가상함정(만재톤수 5,500톤, 최대 전력 요구량 5 MW)이 3.6절에서 가정한 운용 모드(STBY, A, B, C, D)의 시간 비율로 구동할 경우, 연간 연료 소비량은 아래 식(4-4)으로 구할 수 있으며 결과를 Table 4.4에 나타낸다.

Total Fuel Consumption/year

$$= P_B(kW) \times \text{Optimal Load Rate} (\%) \times \text{Fuel Consumption Rate} (g/kWh) \times \text{Operation Time /year} (h) \quad (4-1)$$

Table 4.4 Fuel consumption of CODOG at each operating mode

Mode (Rate)	Quantity Operating			Brake Power at Opt. driving (kW)			SFC (g/kWh)			Fuel Consumption (Ton/h)			Total Fuel /year (Ton)
	D/E Gen.	D/E	G/T	D/E Gen. (94%)	D/E (77%)	G/T (100%)	D/E Gen.	D/E	G/T	D/E Gen.	D/E	G/T	
STBY (50%)	1	0	0	1,323	0	0				0.247	0	0	11,536
A (20%)	2	2	0	2,646	5,230	0				0.493	0.974	0	
B (20%)	3	2	0	3,968	5,230	0	186.5	186.2	217.5	0.740	0.974	0	
C (5%)	3	0	2	3,968	0	41,839				0.740	0	9.099	
D (5%)	4	0	2	5,291	0	41,839				0.987	0	9.099	

계산 결과, 구성된 동력 시스템은 가정한 운용모드에서 항상 최적 부하로 구동된다. 발전용 디젤 기관은 94%의 최적 부하로 kWh 당 186.5g의 연료를 소비하고 추진용 디젤 기관은 77% 부하로 kWh 당 186.2g, 추진용 가스터빈 기관은 100%의 최적 부하로 kWh 당 217.5g의 연료를 소비하여 연간 11,536 Ton의 연료가 사용된다. 본 연구에서 추정 한 발전용 디젤기관의 연료유 소비율은 다수의 엔진 제작사의 V type 발전기의 연료소비율 자료를 바탕으로 구하였으며, 실제 해군함정에서 주로 사용되는 발전용 디젤 기관(MTU 社)과 가스터빈 기관(GE or RR)은 각각 약 200~210g/kWh, 210~220g/kWh 범위의 연료 소비율을 나타낸다.

동력 시스템의 중량은 kW당 추세와 기관의 제동 동력(P_B)을 곱하여 구한다. 가상함정이 CODOG 추진 시스템을 사용 시 추진과 발전에 필요한 원동기와 발전기 구성의 총 중량을 계산한 결과는 Table 4.5와 같다.

Table 4.5 Weight of prime mover & generator of CODOG

	Brake Power (kW)	Tendency of Weight (kg/kW)	Quantity	Weight (Ton)
D/E Generator	1,407	19.0	4	106.9
Diesel Engine	3,396	10.6	2	72.0
Gas turbine	20,920	0.78	2	32.6
Total		-		212

4.4.2 IPS 동력 시스템의 연간 연료 소비량과 중량 산출

4.3절의 6개 IPS 동력 시스템의 구성 중 발전용 소형 디젤 기관을 구동하는 3개 구성(A-2-Y, A-3-Y, A-4-Y)과 구동하지 않는 3개 구성(A-2-N, A-3-N, A-4-N)이 3.6절에서 가정한 운용 모드 (STBY, A, B, C, D)의 시간 비율로 구동할 경우, 연간 연료 소비량을 계산한 결과는 Table 4.6과 같으며 각각의 구성을 이루는 원동기와 발전기의 총 중량 계산 결과는 Table 4.7과 같다.

6개 동력 시스템의 연간 연료소비량을 비교를 통해 발전용 소형 디젤 기관을 구동하는 3개의 구성이 미구동하는 구성에 비해 연료의 소비량이 적음을 확인하였다. 그 이유는 총 운용 비율의 50%(3,285h)에 해당하는 정박 중에 요구되는 전력을 발전용 소형 디젤 기관이 최적 부하에서 생산하는 -Y 항목에 비해 소형 디젤 기관이 없는 -N 항목은 발전용 중형 디젤 기관이 소형 디젤 기관을 대신하여 낮은 부하에서 높은 연료소비율로 정박 중의 전력을 생산하기 때문이다. 또한 발전용 소형 디젤 기관은 가정한 5개 운용 모드에서 발전용 중형 디젤 기관과 발전용 가스터빈 기관이 최적 효율에서 구동될 수 있게 하여 연료의 소비를 줄이게 한다.

-Y 항목의 경우 발전용 중형 디젤 기관의 수량이 증가할수록 연료의 소비량이 감소하는 반면, -N 항목은 발전용 중형 디젤 기관의 수량이 증가할수록 연료의 소비량이 증가한다. 이것은 -Y 항목의 발전용 디젤 기관의 수량이 증가하면서 디젤 기관에서 생

산하는 전력이 많아짐에 B, C 모드에서 일부 디젤 기관이 낮은 부하에서 구동되기 때문이며 -Y 항목에서는 이러한 경우, 발전용 소형 디젤 기관이 대신 구동하여 모든 기관이 최적 부하에서 구동되거나 아니면 정지 상태로 유지하게 하는 역할을 하기 때문에 중형 디젤 기관의 수량이 많을수록 C, D 모드에서 높은 연료 소비율을 갖는 발전용 가스터빈 기관의 전력 생산량을 줄여 연료의 소비를 줄일 수 있다. 반면, 가상함정의 기관체계를 구성하는 원동기와 발전기 전체의 중량은 발전용 소형 디젤기관이 구동될 경우 약 3톤의 중량 증가가 있다. 또한 발전용 중형 디젤 기관의 수량이 1대 증가할수록 약 70톤의 중량 증가가 있는 것으로 계산되었다.



Table 4.6 Fuel consumption of IPS at each operating mode

IPS	Mode (Rate)	Quantity Operating			Brake Power at Opt. driving (kW)			SFC (g/kWh)			Fuel Consumption (Ton/h)	Total Fuel /year (Ton)
		Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.	Small D/E Gen.	D/E Gen. (94%)	G/T Gen. (100%)	Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.		
A-2-Y	STBY (50%)	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,830
	A (20%)	0	2	0	0	8,110	0	-	186.5	-	1.512	
	B (20%)	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	186.5	-	1.759	
	C (5%)	0	2	2	0	8,110	39,578	-	186.5	217.1	10.106	
	D (5%)	1	2	2	1,323	8,110	39,578	186.5	186.5	217.1	10.353	
A-3-Y	STBY	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,749
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	186.5	-	1.512	
	B	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	186.5	-	1.759	
	C	0	3	2	0	12,166	35,522	-	186.5	217.1	9.982	
	D	1	3	2	1,323	12,166	35,522	186.5	186.5	217.1	10,229	
A-4-Y	STBY	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,667
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	186.5	-	1.512	
	B	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	186.5	-	1.759	
	C	0	4	2	0	16,221	31,468	-	186.5	217.1	9.858	
	D	1	4	2	1,323	16,221	31,468	186.5	186.5	217.1	10,104	
A-2-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	211.4	-	0.280	11,951
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	187.4	-	1.520	
	B	0	2	0	0	9,433	0	-	186.5	-	1.759	
	C	0	2	2	0	8,110	39,578	-	187.4	217.1	10.114	
	D	0	2	2	0	9,433	39,578	-	186.5	217.1	10.353	
A-3-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	210.5	-	0.278	11,989
	A	0	3	0	0	8,110	0	-	194.1	-	1.574	
	B	0	3	0	0	9,433	0	-	190.8	-	1.800	
	C	0	3	2	0	12,166	35,522	-	186.9	217.1	9.987	
	D	0	3	2	0	13,488	35,522	-	86.5	217.1	10.229	
A-4-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	210.0	-	0.278	12,045
	A	0	4	0	0	8,110	0	-	200.4	-	1.516	
	B	0	4	0	0	9,433	0	-	196.7	-	1.762	
	C	0	4	2	0	16,221	31,460	-	186.7	217.1	10.082	
	D	0	4	2	0	17,544	31,460	-	186.5	217.1	0.328	

Table 4.7 Weight of prime mover & generator of IPS

		Brake Power (kW)	Tendency of Weight (kg/kW)	Quantity	Total (Ton)
A-2-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	327
	D/E Generator	4,314	18.2	2	
	G/T Generator	19,789	3.63	2	
A-3-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	395
	D/E Generator	4,314	18.2	3	
	G/T Generator	17,761	3.76	2	
A-4-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	462
	D/E Generator	4,314	18.2	4	
	G/T Generator	15,734	3.76	2	
A-2-N	D/E Generator	5,018	17.9	2	324
	G/T Generator	19,789	3.63	2	
A-3-N	D/E Generator	4,783	18.0	3	392
	G/T Generator	17,761	3.76	2	
A-4-N	D/E Generator	4,666	18.1	4	459
	G/T Generator	15,734	3.88	2	

4.5 IPS 동력 시스템의 최적화 비교

Fig.4.8은 4.4절의 6개 IPS 동력 시스템 구성의 연료 소비량과 동력 시스템의 중량을 두 투입량(input X,Y)으로 하는 효율성 수준(O -output)을 나타낸다.

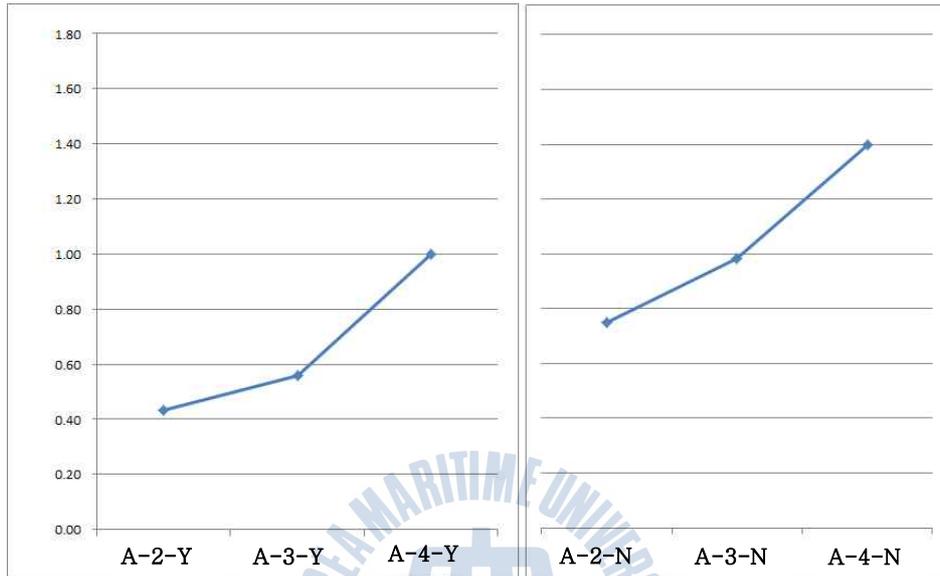


Fig.4.8 Comparison among 6 IPS arrangement by efficiency evaluation

효율성 수준의 평가 결과, 발전용 소형 디젤 기관의 유무에 따른 IPS 동력 시스템의 구성 중 가장 최적화된 구성은 모두 발전용 중형 디젤 기관이 2대 구동되는 (A-2-Y), (A-2-N) 이며 이중 (A-2-Y)가 보다 최적화 되었다. 이후, (A-2-Y)와 (A-2-N)의 발전용 디젤 기관 2대가 생산하는 전력의 비율을 (A-2-Y)와 (A-2-N)를 기준으로 10% 씩 늘려가며 Fig 4.9와 같은 10개의 구성을 재평가 하였다.

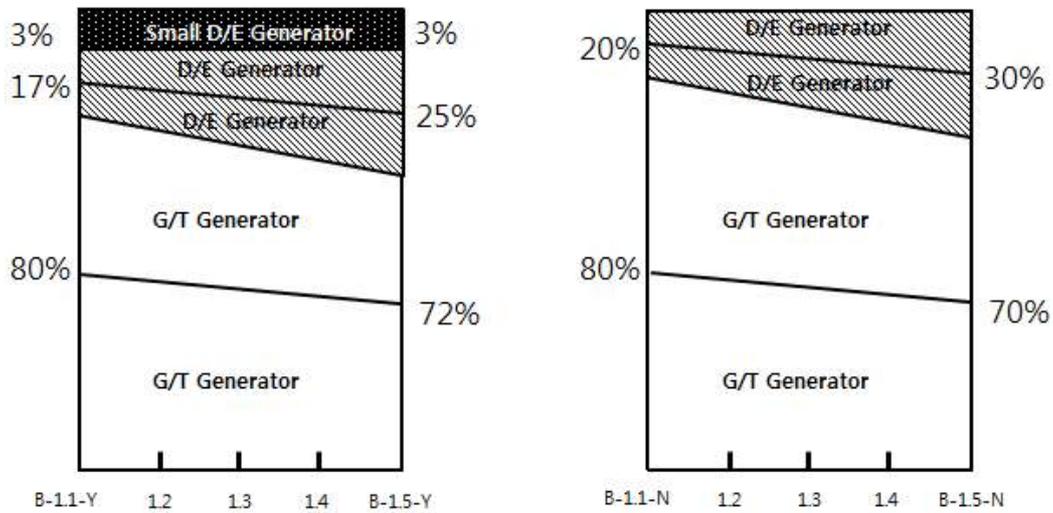


Fig.4.9 Arrangement for IPS (alteration in D/E Gen. power rate)

(B-1.1-Y)의 경우, (A-2-Y)의 구성에 발전용 중형 디젤 기관의 생산 전력량을 (A-2-Y)의 1.1배로 증가시킨 구성에 해당한다. 따라서 (B-1.1-Y(N))에서 (B-1.5-Y(N))로 갈수록 발전용 디젤 기관의 생산 전력은 증가하고 발전용 가스터빈 기관의 생산 전력은 감소한다. 이와 같이 10 종류의 IPS 동력 시스템 구성에 대하여 5개의 운용 모드를 적용한 경우의 연간 연료 소모량의 계산 결과를 Table 4.8에 보인다. Table 4.9는 이 경우의 동력 시스템 중량 변화를 나타낸 것이다.

Table 4.8 Fuel Consumption of IPS at each operating mode

IPS	Mode (Rate)	Quantity Operating			Brake Power at Opt. driving (kW)			SFC (g/kWh)			Fuel Consumption (Ton/h)	Total Fuel /year (Ton)
		Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.	Small D/E Gen.	D/E Gen. (94%)	G/T Gen. (100%)	Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.		
B-1.1-Y	STBY (50%)	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,822
	A (20%)	0	2	0	0	8,110	0	-	186.9	-	1.516	
	B (20%)	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	186.9	-	1.765	
	C (5%)	0	2	2	0	8,922	38,766	-	186.5	217.1	10.082	
	D (5%)	1	2	2	1,323	8,922	38,766	186.5	186.5	217.1	10.328	
B-1.2-Y	STBY	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,825
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	187.8	-	1.533	
	B	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	187.8	-	1.770	
	C	0	2	2	0	9,733	37,956	-	186.5	217.1	10.057	
	D	1	2	2	1,323	9,733	37,956	186.5	186.5	217.1	10.303	
B-1.3-Y	STBY	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,835
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	189.0	-	1.533	
	B	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	189.0	-	1.780	
	C	0	2	2	0	10,544	37,144	-	186.5	217.1	10.032	
	D	1	2	2	1,323	10,544	37,144	186.5	186.5	217.1	10.278	
B-1.4-Y	STBY	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,848
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	190.4	-	1.544	
	B	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	190.4	-	1.791	
	C	0	2	2	0	11,355	36,334	-	186.5	217.1	10.007	
	D	1	2	2	1,323	11,355	36,334	186.5	186.5	217.1	10.254	
B-1.5-Y	STBY	1	0	0	1,323	0	0	186.5	-	-	0.247	11,862
	A	0	2	0	0	8,110	0	-	191.8	-	1.556	
	B	1	2	0	1,323	8,110	0	186.5	191.8	-	1.802	
	C	0	2	2	0	12,166	35,522	-	186.5	217.1	9.982	
	D	1	2	2	1,323	12,166	35,522	186.5	186.5	217.1	10.229	

IPS	Mode (Rate)	Quantity Operating			Brake Power at Opt. driving (kW)			SFC (g/kWh)			Fuel Consumption (Ton/h)	Total Fuel /year (Ton)	
		Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.	Small D/E Gen.	D/E Gen. (94%)	G/T Gen. (100%)	Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.			
B-1.1-N	STBY (50%)	0	1	0	0	1,323	0	-	213.0	-	0.282	11,957	
	A (20%)	0	2	0	0	8,110	0		188.5		1.529		
	B (20%)	0	2	0	0	9,433	0		186.8		1.762		
	C (5%)	0	2	2	0	8,922	38,766		187.3		217.1		10.088
	D (5%)	0	2	2	0	10,244	38,766		186.5		217.1		10.328
B-1.2-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	214.3	-	0.284	11,969	
	A	0	2	0	0	8,110	0		189.9		1.540		
	B	0	2	0	0	9,433	0		187.5		1.769		
	C	0	2	2	0	9,733	37,144		187.2		217.1		10.063
	D	0	2	2	0	11,055	37,144		186.5		217.1		10.303
B-1.3-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	215.6	-	0.285	11,985	
	A	0	2	0	0	8,110	0		191.3		1.551		
	B	0	2	0	0	9,433	0		188.5		1.778		
	C	0	2	2	0	10,544	37,144		187.1		217.1		10.038
	D	0	2	2	0	11,866	37,144		186.5		217.1		10.278
B-1.4-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	217.3	-	0.287	12,014	
	A	0	2	0	0	8,110	0		193.6		1.570		
	B	0	2	0	0	9,433	0		190.4		1.796		
	C	0	2	2	0	11,884	35,804		186.9		217.1		9.996
	D	0	2	2	0	13,207	35,804		186.5		217.1		10.237
B-1.5-N	STBY	0	1	0	0	1,323	0	-	218.3	-	0.289	12,034	
	A	0	2	0	0	8,110	0		195.2		1.583		
	B	0	2	0	0	9,433	0		191.8		1.809		
	C	0	2	2	0	12,827	34,862		186.9		217.1		9.967
	D	0	2	2	0	14,150	34,862		186.5		217.1		10.208

Table 4.9 Weight of prime mover & generator of IPS

		Brake Power (kW)	Tendency of Weight (kg/kW)	Quantity	Total (Ton)
B-1.1-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	340
	D/E Generator	4,746	18.0	2	
	G/T Generator	19,383	3.66	2	
B-1.2-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	352
	D/E Generator	5,177	17.9	2	
	G/T Generator	18,978	3.68	2	
B-1.3-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	364
	D/E Generator	5,608	17.8	2	
	G/T Generator	18,572	3.71	2	
B-1.4-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	375
	D/E Generator	5,608	17.6	2	
	G/T Generator	18,572	3.73	2	
B-1.5-Y	Small D/E Gen.	1,407	19.0	1	387
	D/E Generator	6,471	17.5	2	
	G/T Generator	17,761	3.76	2	
B-1.1-N	D/E Generator	5,449	17.8	2	336
	G/T Generator	19,383	3.66	2	
B-1.2-N	D/E Generator	5,881	17.7	2	348
	G/T Generator	18,978	3.68	2	
B-1.3-N	D/E Generator	6,312	17.6	2	359
	G/T Generator	18,572	3.71	2	
B-1.4-N	D/E Generator	7,025	17.3	2	378
	G/T Generator	17,902	3.75	2	
B-1.5-N	D/E Generator	7,527	17.2	2	391
	G/T Generator	17,431	3.78	2	

Fig.4.10은 Table 4.8과 Table 4.9의 계산 결과를 바탕으로 평가한 효율성 수준 ($\overline{O-output}$)을 나타낸다.

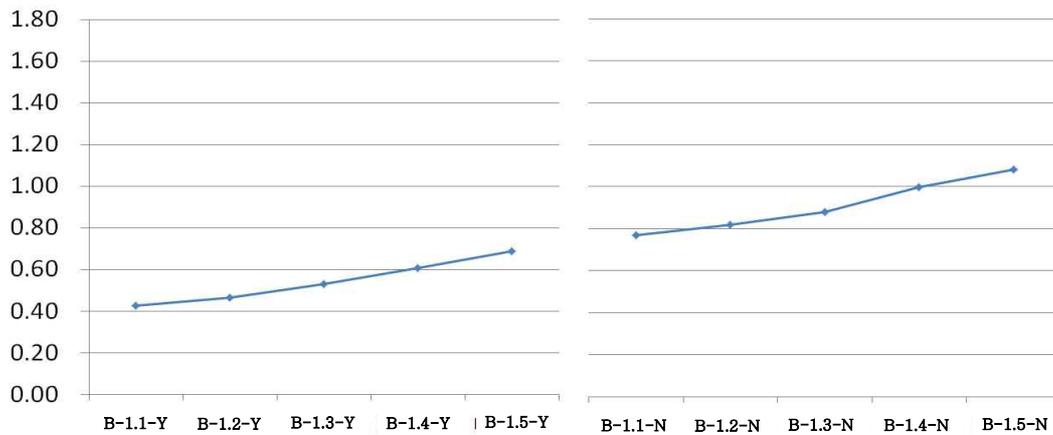


Fig.4.10 Comparison among 10 IPS arrangement by efficiency evaluation

Fig.4.10에서 동력 시스템의 연간 연료소비량과 중량을 동시에 반영하는 $\overline{O-output}$ 가 가장 낮은 기관 구성은 (B-1.1-Y)이며 지수는 0.43이다. (A-2-Y)의 $\overline{O-output}$ 은 0.42로 전체 IPS 동력 시스템 구성 중 (A-2-Y)의 구성이 연료소비량과 중량을 동시에 고려하였을 경우, 가장 최적화 되었다고 표현할 수 있다.

소형 발전기가 운용될 경우 중대형 발전기들이 항상 최적 효율에서 운용됨으로써 미 운용 시에 비해 연료의 소비는 감소하고 중량은 증가함을 확인할 수 있다. 소형 발전기는 정박 중 육상 전력의 이용이 어려운 경우(국외항 등)에도 유용하기 때문에 IPS 함정을 운용, 연구하고 있는 영국, 미국 해군 등에서도 그 필요성을 공감하고 있다. 하지만 소형 발전기로 인한 함정 무게의 증가, 정비 소요의 증가와 기타 유지 보수 비용, 운용 인력의 증가 문제가 발생하기 때문에 함정의 전력 운용 단계와 비율을 바탕으로 그 필요성을 판단 후 적용할 필요가 있다. 특히, 동력 시스템의 중량과 부피 증가는 함정의 배치성과 기동성을 감소시키므로 함정이 소형화될수록 소형 발전기의 운용은 반드시 고려되어야 한다. 소형 발전기가 없이 IPS를 구성하는 경우, 중대형 디젤 발전기의 최적 효율에서의 발전 용량은 운용 비율과 전력량이 높은 단계(B mode)보다 크거나 같도록 하여 가스터빈 발전기를 운용 비율이 낮은 전력 단계에서만 운용되도록 하여야 한다. 만약 그 이하의 단계 (A mode)에서 최적 효율로 구동되는 중대형 디젤 발전기를 설치하면, 전력 사용량이 상대적으로 적은 단계에서부터 가스터빈 발전기가 구동되어 연료 소모가 증가하게 된다.

4.6 CODOG과 IPS 동력 시스템의 비교

4.6.1 연료 소비량 비교

3.6절에서 가정한 운용 모드(STBY, A, B, C, D)는 현재 해군에서 운용되는 기계식 추진 함정이 최적 부하에서 구동되는 모드를 시간 비율에 따라 구분한 것이다. 이 운용모드에서 가상함정을 IPS 동력 시스템의 최적화된 구성으로 운용할 경우 연간 연료유 소비량은 11,830TON 이며, CODOG 체계로 운용할 경우 연간 연료유 소비량은 11,536TON 이다. IPS로 운용할 경우에 CODOG 체계에 비해 294TON 의 추가적인 연료유 소비가 발생한다. 가정한 운용 모드에서 CODOG 함정과 IPS 함정은 모두 최적 부하로 구동되지만 기계식 추진인 CODOG의 동력 전달 효율이 IPS의 효율에 비해 높기 때문에 최적 부하 구동이라는 동일 조건 하에서는 IPS의 연료유 소비가 많게 된다. 이 결과만을 통해 IPS의 연료 소비가 CODOG 체계에 비해 크다고 단정할 수 없다. 실제 군함은 가정한 운용모드에서 주로 운용되지만 그 임무와 해상상태, 필요성에 따라 세부적인 속도의 조절이 이루어지며 이 과정에서 기계식 추진의 기관은 최적 부하 구동이 불가하다. 또한 저속 운전의 경우, 기관의 저부하 운전을 피하기 위해 특정 부하 또는 최적 부하에서 기관을 구동 시킨 후 가변 피치 프로펠러(CPP)를 이용하여 속도를 조절(Pitch Control)하기 때문에 필요한 동력에 비해 소비되는 동력이 커 연료의 소비가 증가하게 된다.

4.6.2 동력 시스템의 중량 비교

본 연구에서는 전동 모터, 축계, 배전 시설, 보기 장비 등의 중량을 제외한 원동기와 발전기의 중량만을 다루었다. 계산 결과, 가상함정의 동력 시스템을 CODOG 체계에서 IPS로 전환 시 원동기와 발전기만의 중량만으로 약 115톤이 증가한다. 중량이 증가하는 주된 이유는 발전기(Generator) 수량과 용량의 증가이다. CODOG 체계의 경우, 추진력을 원동기(Prime Mover)에서 생산하여 축계로 전달하지만 IPS는 원동기의 회전력을 전력으로 변환하여야 하므로 모든 원동기에 발전기가 별도로 필요하여 그에 따른 중량 증가가 발생한다. 물론, 동력 시스템을 제외한 타 구성요소의 중량 절감으로 기관 체계의 중량 증가를 상쇄할 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 하지만 영국의 MOD (Ministry of Defense)에서 수행된 연구는 IPS로 전환되는 과정에서 대폭 짧아지는 축

과 이에 따라 줄어드는 베어링, 클러치 등의 축계 요소, 제거되는 감속기어 등으로 감소한 중량에 비해 원동기에 설치된 발전기의 중량만큼이나 큰 전동 모터, 대용량의 배전 시설 등이 추가 설치됨으로써 증가되는 중량과 부피가 더 커져 전체적인 구성의 중량과 부피는 더더욱 증가할 것으로 판단하였다.^[2]

만재톤수 5,500톤급 함정을 대상으로 기관체계의 중량 증가분 115톤은 함정의 최고 속력을 약 0.1~0.2kts 감소시킬 것으로 계산되었다. 이러한 속력의 감소는 해상 상태와 함정이 최고 속력에서 운항되는 빈도가 크지 않음을 고려할 때 큰 의미를 갖는다고 할 수 없다. 하지만, IPS 함정이 CODOG 체계 함정과 동일한 속력을 낼 때, 동력 시스템의 중량 증가는 증가된 중량 만큼의 무기체계 탑재량의 감소, 적재 가능 유량의 감소, 연료 소비량의 증가로 이어지며 이것은 결국, 함정 전투력의 감소를 가져온다.



4.7 COGAG과 IPS 동력 시스템의 비교

CODOG 체계와 IPS의 최적 구성의 비교와 동일한 과정으로 가상함정을 현재 한국 해군에서 운용 중인 Fig.4.11^[19]의 세종대왕급 DDGHM (만재톤수 10,000 Ton)과 유사한 함정으로 가정하여 COGAG 체계와 IPS 최적 구성을 비교하였다. COGAG 추진체계를 이용하는 세종대왕급 이지스 구축함은 4대의 추진용 가스터빈 기관으로 추진력을 생산하고 3대의 발전용 가스터빈 기관으로 무기체계와 함정 내 필요한 전력을 생산한다.

COGAG 추진 체계는 4대의 추진용 가스터빈 기관의 운용 모드에 따라서 아래의 4개 운용 모드로 구분된다.

	L*H*W	165 × 21 × 6
	Displacement	- Light : 7,700 Ton - Gross : 10,000 Ton
	Max. Speed	30 kts
	Crews	300
	Propulsion System	COGAG

Fig.4.11 Specification of Sejong the Great class DDGHM

1) Locked Shaft (Emergency)

- 1축에 1대의 추진용 가스터빈만 연결되어 구동되고 다른 축은 미구동(Locked)
- 비상 운용으로 평상시 운용 지양

2) Trail Shaft (Economy)

- 1축에 1대의 추진용 가스터빈만 연결되어 구동하고 다른 축은 기관은 미연결 상태로 가변피치 프로펠러의 피치각(Pitch Angle)만 조정
- 美 DDG-51의 경우, 12 kts 이하 운용

3) Split Plant Mode (Cruising)

- 일반적 운항 모드로 양 측에 각 1대의 추진용 가스터빈이 연결되어 구동
- 美 DDG-51의 경우, 21 kts 이하 운용

4) Full Plant Mode (Boost)

- 최대 속력을 위한 모드로 양 측에 각 2대의 추진용 가스터빈이 연결되어 구동

4 개의 운용 모드 중 비상 모드인 Locked Shaft 모드를 제외하고 가상함정의 제원과 시간 비율에 따른 운용 모드를 Table 4.10과 같이 가정하였다.

Table 4.10 Supposed ship's specification & operating mode

Displacement (Gross Ton.)		10,500	Operating Mode	Speed (kts)	Power (kW)	Rate (%)
Speed (kts)	Max.	30	STBY	0	1,500	50%
	Midium	21				
	Min.	12	A	12	3,000	40%
	Anchoring	0				
Power Demand (kW)	Max.	9,000	B	21	6,000	5%
	Midium	6,000				
	Min.	3,000	C	30	9,000	5%

가상함정이 가정한 운용 모드로 그 시간 비율에 따라 운용될 경우, IPS 최적 구성인 (A-2-Y)와의 연간 연료 소비량과 중량 증가량의 계산 과정은 앞서 살펴본 바와 동일하다. 계산된 결과는 Table 4.11, Table 4.12와 같다.

Table 4.11 Fuel consumption of COGAG & IPS at 4 operating mode

Mode (Rate)	Quantity Operating		Brake Power at Opt. driving (kW)		SFC (g/kWh)		Fuel Consumption (Ton/h)		Total Fuel /year (Ton)
	G/T Gen.	G/T	G/T Gen. (100 %)	G/T (100 %)	G/T Gen.	G/T	G/T Gen.	G/T	
STBY (50%)	1	0	3,127	0	217.1	217.5 ~ 383.2	0.689	0	17,412
A (40%)	1	1	3,127	2,393			0.689	0.917	
B (5%)	2	2	6,349	10,689			1.379	3.007	
C (5%)	3	4	9,524	62,327			2.068	13.554	

IPS	Mode (Rate)	Quantity Operating			Brake Power at Opt. driving (kW)			SFC (g/kWh)			Fuel Consumption (Ton/h)	Total Fuel /year (Ton)
		Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.	Small D/E Gen.	D/E Gen. (94%)	G/T Gen. (100%)	Small D/E Gen.	D/E Gen.	G/T Gen.		
A-2-Y	STBY (50%)	1	0	0	3,127	0	0	186.5	-	-	0.592	14,626
	A (40%)	0	2	0	0	5,676	0	-	186.5	1.058		
	B (5%)	0	0	1	0	0	17,519	-	-	245.4	4.30	
	C (5%)	1	2	2	0	8,110	39,578	186.5	186.5	217.1	14.706	

Table 4.12 Weight of prime mover & generator of COGAG & IPS

COGAG	Brake Power (kW)	Tendency of Weight (kg/kW)	Quantity	Weight (Ton)
G/T Generator	3,175	4.3	3	41
Gas turbine	15,582	0.89	4	56
Total	-			96

IPS (A-2-Y)	Brake Power (kW)	Tendency of Weight (kg/kW)	Quantity	Weight (Ton)
Small D/E Generator	3,377	18.4	1	62.1
D/E Generator	3,019	18.5	2	111.7
G/T Generator	30,063	3.02	2	181.6
Total	-			356

계산 결과, COGAG 함정의 연간 연료유 소비량은 17,412Ton 이며 IPS의 구성 중 (A-2-Y) 구성의 연간 연료유 소비량은 14,626Ton로 연간 약 2,800Ton의 연료유를 절감 ('11년 면세유 기준 연간 25억 절감 / 30년 운용 시 750억 절감) 할 수 있다. 하지만, 동력 시스템의 무게 증가량은 약 260Ton으로 이로 인해 함정의 최고 속력은 약 0.1~0.2kts 감속 될 것으로 판단된다. 실제 함정의 운용 중 최고 속력으로 함정이 기동하는 경우는 큰 비율을 차지하지 않으며 대형 전투함정의 임무는 근거리 함대함(艦對艦) 전투가 아닌 원거리 전력의 투사가 주이다. 따라서 최고 속력을 기존의 수준보다 1~2kts 감속(derating)하여 동력 시스템을 구성하면 함정의 중량을 줄일 수 있고 절약한 중량과 공간만큼 무기체계의 적재와 운용이 가능하기 때문에 IPS의 효율을 극대화하는 방법으로 고려할 수 있다.

4.8 만재톤수와 전력량에 따른 IPS 최적화 비교

본 절에서는 가상함정의 만재톤수를 5,500~10,500Ton, 함정 내 최대 전력 요구량을 5MW~10MW 의 범위에서 각각 1,000Ton, 1MW 씩 변화시키면서 연료유 소비량과 시스템의 중량을 바탕으로 최적화 비교하였다. 비교 기준은 기계식 추진체계 중 CODAG 체계를 선정하였다. CODAG 체계는 논의되는 전체 기관 체계 중 연료 소비량과 동력 시스템의 중량을 동시에 반영한 $\overline{O-output}$ 이 최소인 동력 시스템이다. Fig.4.12와 Table 4.13은 CODAG, CODOG, COGAG, CODLAG 과 앞서 살펴본 IPS의 여러 구성안 중 연료의 소비량과 동력 시스템의 중량을 최대값 1과 최소값 0 사이에서 각각 지수화한 후 CODAG의 지점을 원점(O)으로 IPS의 최적 구성의 $\overline{O-output}$ 를 함정의 만재톤수와 함정 내 전력 요구량에 따라 계산한 결과이다.

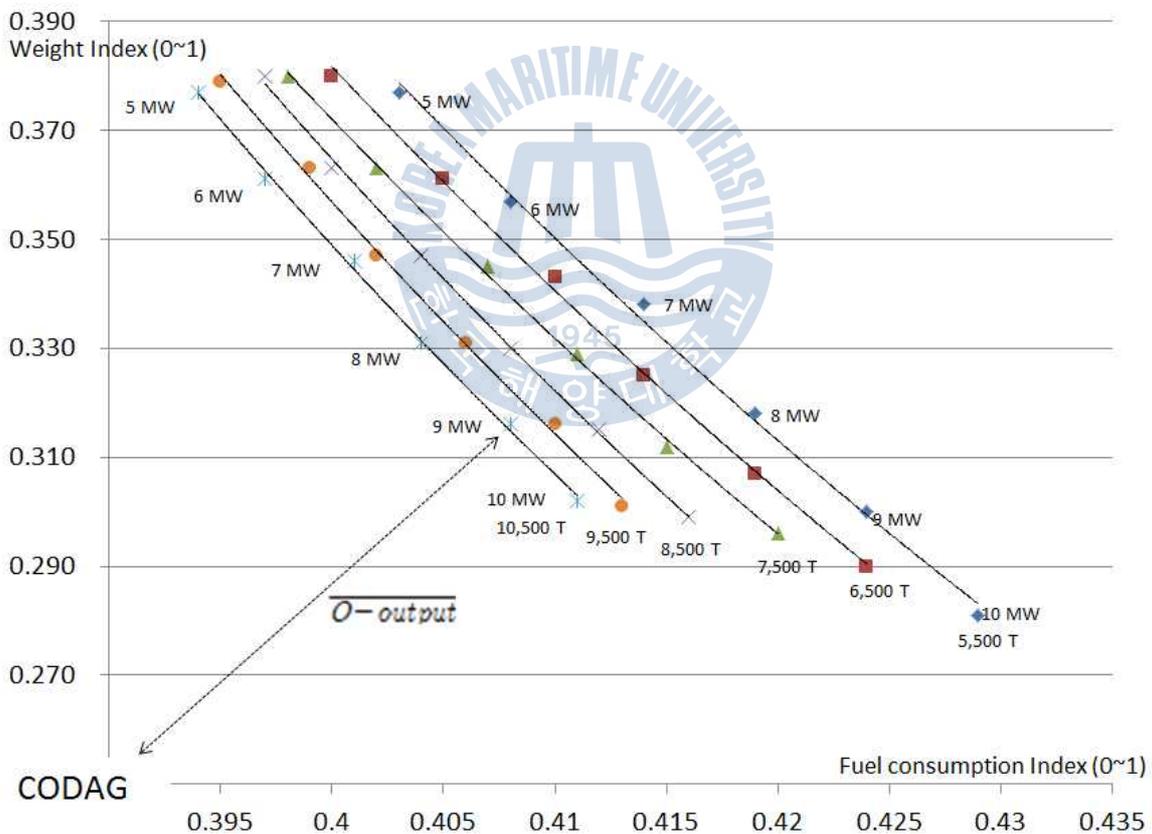


Fig.4.12 $\overline{O-output}$ by gross tonnage & power demand

Table 4.13 $\overline{O-output}$ by gross tonnage & power demand

Power Demand \ Gross Tonnage	5,500 Ton	6,500 Ton	7,500 Ton	8,500 Ton	9,500 Ton	10,500 Ton
5 MW	0.552	0.552	0.551	0.549	0.547	0.545
6 MW	0.543	0.543	0.542	0.541	0.539	0.537
7 MW	0.534	0.534	0.534	0.533	0.531	0.529
8 MW	0.526	0.526	0.526	0.525	0.524	0.522
9 MW	0.519	0.519	0.519	0.519	0.517	0.516
10 MW	0.513	0.513	0.513	0.512	0.511	0.510

결과를 살펴보면, 함정의 만재톤수가 증가하고 함정의 전력 요구량이 증가할수록 CODAG을 기준으로 한 $\overline{O-output}$ 은 CODAG에 보다 근접하게 된다. 이는 함정이 대형화되고 고(高)전력화 될수록 IPS의 효과가 증가함을 의미한다. 특히, CODAG이나 CODOG 체계로는 요구되는 추진력을 생산할 수 없는 세종대왕급 구축함과 같은 대형 함정의 미래 소요 전력이 증가할 경우, IPS 동력 시스템의 필요성은 증가할 것으로 판단된다.

제 5 장 IPS 동력 시스템 최적화를 위한 추가 고려 요소

연료 소비량과 동력 시스템의 중량만을 평가 인자로 한 IPS 동력 시스템의 최적화는 실제 동력 시스템의 다양한 특성과 평가 인자들을 고려했을 때 3장과 4장에서 살펴본 평가 방법만으로 한계가 있다. 특히, Admiralty 계수를 이용한 소요 동력의 계산과 동일한 연료 소비 추세와 중량 추세의 적용, 제한된 평가 인자의 적용은 실제 함정 동력 시스템의 현실성을 반영하지 못한다.

이에 3.2절의 평가 인자 중 다양한 최적화 대상에 영향을 미치며 정량화와 예측이 가능한 평가 인자를 최적화 평가에 추가적으로 적용할 수 있다면 보다 효과적인 평가가 될 것이다. 따라서 본 장에서는 동력 시스템의 최적화 과정과 그 평가에서 다루지 못한 추가적인 고려 요소들과 동력 시스템 외에 기타 요소들을 고찰하였다.

5.1 인력 운용

Table 5.1^[2]은 현재 운용되는 각국 함정의 추진체계별 승조원의 수이다.

기계식 추진체계에서 복합식, 전기식 추진체계로 기관체계가 변화할수록 함정의 승조원 수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향이 동력 시스템의 특징에 기인한다고는 볼 수 없지만, 장비에 사용되는 동력이 모두 전력으로 통합되면서 관리적 측면의 용이성이 향상된 것 또한 그 이유라고 판단된다. 10,500 톤급의 함정의 추진체계를 COGAG과 IPS로 각각 구성하여 Table 5.1^[2]의 평균값을 통해 계산하면 COGAG 체계의 경우, 약 340명의 인력이 필요한 반면 IPS 함정의 승조원은 약 180명이 필요하다. 감소한 승조원 160명은 기존 승조원의 약 47%로, IPS를 통해 전체 체계를 통합 운용하여 함정의 인력 운용에 필요한 예산을 현저히 감소시킬 수 있음을 나타낸다. 절약된 예산은 보다 복잡해지고 기술이 집약된 미래 함정의 운용에 필요한 전문 인력 양성과 획득, 교육, 훈련에 사용될 수 있을 것이다.

평가 인자의 고찰에서 인력 운용은 전투 능력과 운용성에 영향을 미친다고 판단하였다. 그러나 동력 시스템을 운용하기 위해 필요한 인력을 정확히 예측하기 어렵기 때문에 함정의 임무와 역할, 선형, 무기체계 등의 다양성에 따라 운용되는 인력을 정량화하는 방법(crews/Gross Ton., crews/kW for power, crews/kW for Weapon Use 등)의 타당성 검토가 필요하다고 판단된다.

Table 5.1 Crews of Naval Vessel

	Gross Tonnage (Ton)	Crews (including officers)	Crews / Ton	Propulsion System
A1	5,588	218	0.039	CODOG
A2	5,947	235	0.039	
A3	6,145	236	0.038	
A4	3,917	185	0.047	
A5	7,163	232	0.032	
B1	5,690	294	0.051	CODAG
B2	5,375	170	0.032	
C1	10,455	300	0.029	COGAG
C2	9,302	300	0.032	
C3	10,117	372	0.037	
C4	10,160	336	0.033	
AVERAGE			0.037	Mechanic
D1	4,267	181	0.042	CODLAG
D2	7,316	110	0.015	
D3	5,980	145	0.024	
E1	6,096	130	0.021	CODLOG
AVERAGE			0.026	Hybrid
F1	7,570	191	0.025	IPS
F2	15,494	148	0.0095	
AVERAGE			0.017	IPS

5.2 획득 및 유지 비용

실제로 IPS가 적용, 건조되어 운용되는 함정의 사례가 극히 적기 때문에 함정의 초기 건조 비용 및 운용 유지 비용을 정확히 추산할 수 없다. 하지만 IPS에 필요한 함정 내 장비의 초기 획득 비용을 제조사 자료를 통해 추정된 영국 국방부 연구소(MOD)의 문헌을 바탕으로 간략히 살펴볼 수 있다. Table 5.2^[6] 는 COGAG, CODLAG과 전기추진 함정의 획득, 유지 비용을 비교한 자료이다.

Table 5.2 Comparative Costings

	COGAG	CODLAG	E-ship
UPC (Unit Production Cost)	Baseline	+ £ 2.6M	+ £ 1M
RC (Running Cost)	+ £ 5.3M	+ £ 1.3M	Baseline
Total	+ £ 4.3M	+ £ 2.9M	Baseline
Discounted Total (6%)	+ £ 1.5M	+ £ 2.2M	Baseline

전기추진 시스템은 초기 획득 과정에서 COGAG 시스템의 105% 가량의 비용이 소모되지만 일단 함정이 운항되기 시작하면 이 차이는 빠르게 회복된다. 전기추진 시스템이 30년 수명 주기 동안에 경제적으로 얻는 이득을 COGAG 시스템과 비교했을 때, 약 £4M 가 넘는 차이가 발생한다. 이러한 차이는 기어박스에 의한 저속에서의 추가적인 손실과 윤활 계통, 기타 보조 장치들에 대한 추가적인 정비 소요를 포함한다면 더 커질 수 있다.^[6] 하지만, IPS가 적용되는 미 해군의 DDG-1000 급 구축함 건조 계획이 막대한 건조 비용으로 인해 3척으로 종료 예정임을 감안할 때 건조비와 운용유지비에 대한 보다 세밀한 검토가 요구된다.

5.3 선형과 추진기에 따른 공간 활용도, 소요 동력의 변화

IPS의 동력 시스템을 함정에 적용하여 가질 수 있는 이점 중 원동기 배치의 유연성은 선체의 형태와 추진기 선택에 유연성을 제공한다. 기계식 추진의 경우, 축 배열에 의한 제약으로 기관실은 수면 하, 후부에 위치한다. 하지만 IPS의 경우, 축에 의한 제약이 없기 때문에 함정 내 다양한 위치에 기관을 분산 배치가 가능하며 수면 하 격실이 아닌 상부 격실에 또한 배치가 가능하다. 이러한 배치의 유연성은 수면 방사 소음의 제어와 장비의 모듈화를 가능하게 한다. 영국의 Type-45 함정의 선형은 기존 전투함의 선형과 동일하나 미국의 차기 구축함인 DDG-1000의 선형은 Fig.5.1과 같이 일반적인 전투함의 선형과 뚜렷한 차이를 두었다. 함정의 동력 시스템의 종류가 선형에 미치는 영향을 뚜렷이 확인할 수는 없으나 IPS를 구성하는 원동기의 배치 유연성은 다양한 선형을 적용하는데 보다 유리한 여건을 제공할 것이다.



Fig.5.1 A cutting plane of DDG-1000

그 예로 쌍동선형(Catamaran)을 들 수 있다. 현재 전기 추진으로 운용되는 특수함정 중 일부는 쌍동선형을 채택하고 있다. Fig.5.2는 전기추진, 기계식 추진(Water jet)으로 구동되는 쌍동선형과 삼동선형 해군 함정이다.



Fig.5.2 Catamaran & Trimaran vessel of U.S navy

이들 선형은 조파저항을 감소시켜 속력의 저하를 방지하고 단동선형(Mono hull)에 비해 안정성이 좋고 상부 구조부분을 넓게 이용할 수 있다. 또한 수면 상부의 구조를 대상으로 장비의 모듈화가 가능하여 임무에 따른 장비의 전환이 용이하다. 하지만, 대형화 될수록 선체의 강도면에서 제약이 발생하여 배수량이 큰 함정에는 적당하지 않다. Victorious 함은 만재톤수가 약 3,300Ton 이며, Independence 함은 만재톤수가 약 2,780 Ton 에 불과하다.

Fig.5.3은 전방위추진기(Azimuth Thruster)이다. 전방위추진기는 전후좌우 모든 방향으로 추진력을 발생시킬 수 있는 추진기로 함정의 추진만이 아닌 방향전환을 위한 회전력도 발생시킨다. 전방위추진기를 구동하기 위해서는 보통 전기모터가 사용되며 전기모터를 수평으로 설치하여 동력의 방향 전환을 2번 하게 되는 Z-drive system 과 전기모터를 수직으로 설치하여 동력의 방향 전환을 1번만 하게 하는 L-drive system 으로 구분된다. 전방위추진기는 기존의 축형 추진기와 다르게 유압으로 구동되는 타(rudder)가 불필요하기 때문에 유압계통을 간소화할 수 있고 타기 구동을 위한 별도의 공간이 불필요하지만 HPU(Hydraulic Power Unit), CAU(Cooling Air Unit) 등 부수적인 장비의 추가 배치를 위한 공간이 증가하여 오히려 함정 후부의 폭과 높이는 증가되어야 한다. 현재 전방위추진기의 최대 생산 동력은 대당 약 6MW로, 고속의 추진력을 생산하기에는 부족하여 저속의 함정 및 함정의 위치 유지 체계 (DPS, Dynamic Positioning System)가 필요한 구조함 등의 추진체제로 사용이 가능하다.



Fig.5.3 Azimuth Thruster

기계식 추진체계로 구동되는 기존의 전투함은 원동기와 축이 감속기어를 통해 연결되고 선미를 관통한 축의 끝단은 CPP와 연결되어 속도의 미세 조정을 CPP에서 담당한다. 이러한 관통형 추진을 전기추진에 적용할 경우, 속도의 미세 조정을 전동모터에서 담당한다. 따라서 CPP 대신 FPP의 사용이 가능하여 축의 길이를 최소화하고 축계를 단순화할 수 있지만 전방위추진과 다르게 타 구동을 위한 별도의 공간이 필요하다. 하지만, 기존의 기계식 추진과 전방위추진기 설치에 비하여 공간의 활용도는 증가한다.

5.4 환경 요소

3.2절에서 함정 동력 시스템의 최적화 대상 중 환경 친화성은 적용의 현실성과 평가 방법에 대한 한계로 인해 본 연구에서 중요하게 다루지 않았다. 하지만, 전투가 주 임무인 함정이라고 해도 현재 그리고 미래의 전 지구적인 이슈인 환경 문제로부터 언제까지나 예외일 수는 없을 것이다. 따라서 환경 친화성도 최적화 대상으로 적극적인 검토가 필요하다.

일반 선박의 환경 친화성을 정량적으로 평가 가능한 요소로는 4.2절에서 언급한 IMO의 규제 중 기술적 조치(EEDI, Energy Efficiency Design Index), 운항적 조치(EEOI, Energy Efficiency Operational Indicator)를 들 수 있다. 물론, 전투력을 우선하여야 하는 해군 함정에 대하여 화물을 운송하는 일반 선박에 대한 규제를 적용할 수는 없다. 하지만 에너지 효율을 높이기 위한 이러한 기술적 조치들과 제도적 장치들은 함정의 작전 지속력을 증가시키고 함정의 운용 예산의 절감 효과가 있다는 점에서 주목할 만하다. 따라서 함정의 배출 가스가 환경에 미치는 영향을 정량화하여 동력 시스템의 최적화를 위한 평가 요소로 반영하기 위한 연구 검토가 추가적으로 필요하다.

함정의 동력 시스템 기인(起因) 배출가스의 정량화 방법에 EEDI, EEOI는 중요한 참고가 된다.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ 환산계수} \times \text{연료소모량} \times \text{기관출력} \times CO_2 \text{ 저감기술인자}}{\text{화물량} \times \text{선속}}$$

(g CO₂ / ton · nmile)

$$EEOI = \frac{CO_2 \text{ 환산계수} \times \text{연료소모량} \times CO_2 \text{ 저감기술인자}}{\text{실화물량} \times \text{실항해거리}}$$

(g CO₂ / ton · nmile)

위의 지수 산출 과정에서 볼 수 있듯이, 두 지수를 결정하는 인자로 선박이 운송하는 화물량이 적용된다. 그러나 수송함과 같은 함정을 제외한 전투 함정의 경우, 화물량(ton)을 하나의 인자로 적용하기 부적합하다. 하지만, EEDI, EEOI에서 화물량(ton)이라는 인자가 이 규제를 적용하는 선박의 주 역할에 관련된 인자라면 전투 함정은 그 역할에 맞게 전투 능력과 관련된 평가 인자 즉, 무기체계의 수량, 레이더 탐지거리, 사정거리, 최대 작전 반경 등을 대신 적용 가능할 것이다.

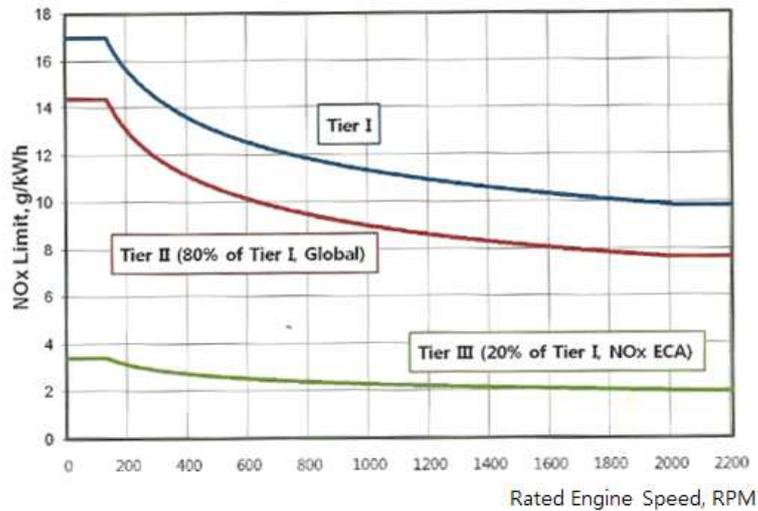
IMO에서 규제하는 대표적인 유해 배기로는 온실가스인 CO₂, 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 입자상물질(PM, Particulate Matter) 등이 있다.

배출 가스의 배출 계수와 배출 제한은 Table 5.3^[16]과 Fig.5.4^[20]와 같으며 이를 바탕으로 기계식 추진, 복합식 추진, IPS에서 연간 발생하는 CO₂와 NO_x 양의 계산 결과는 Table 5.4와 같다. GWP(Global Warming Potential)을 고려한다 해도 CO₂를 제외한 배출가스가 지구온난화에 미치는 비중은 CO₂의 비중(77%)에 비해서 극히 적으며 배출 가스의 양 중 CO₂ 비율이 다른 성분에 비해 훨씬 높기 때문에^[16] 결국 함정이 대체 연료를 사용하지 않을 경우, 함정의 운항이 환경에 미치는 영향은 연료의 소모량과 직결된다고 볼 수 있다.

Table 5.3 Fuel-based exhaust gas emission factors used in the 2007 inventory

Emission		Emission factor (kg emitted/tonne of fuel)	Guideline reference
CO		7.4	CORINAIR
NMVOC (Non-Methane VOC)		2.4	CORINAIR
CH ₄		0.3	IPPC 2006/ CORINAIR
N ₂ O		0.08	IPPC 2006/ CORINAIR
CO ₂	Residual fuel oil	3,130	IPPC 2006
	Marine diesel oil	3,190	IPPC 2006
SO ₂	Residual fuel oil	54	CORINAIR
	Marine diesel oil	10	CORINAIR
NO _x	Slow-speed diesel engines	90/78(85)*	-
	Medium-speed diesel engines	60/51(56)*	-
	Boilers	7	-
PM	Residual fuel oil	6.7	CORINAIR
	Marine diesel oil	1.1	CORINAIR

* NO_x Emission factors : non-regulated/subject to IMO NO_x regulation



	Application Date	NO _x Limit		
		n<130 (rpm)	130≤n<2,000	2,000≤n
Tier I	2000.1.1.	17.0	45 × n ^{-0.2}	9.8
Tier II	2011.1.1.	14.36	44 × n ^{-0.23}	7.668
Tier III	2016.1.1.	3.4	9 × n ^{-0.2}	1.93

Fig.5.4 Regulation of ship's NO_x emission

Table 5.4 Propulsion system-based CO₂ & NO_x emission (per year)

Gross Tonnage (Ton)	Power Demand	CODAG		CODOG		COGAG		CODLAG		IPS	
		CO ₂ (TON)	NO _x * (TON)	CO ₂	NO _x						
5,500	5 MW	36,260	347	36,600	331	39,400	221	37,000	347	37,540	278
6,500	6 MW	41,300	398	41,680	380	44,850	257	42,200	398	42,740	320
7,500	7 MW	46,200	448	46,600	428	50,100	293	47,175	448	47,770	361
8,500	8 MW	50,940	496	51,391	475	55,200	328	52,000	497	52,700	400
9,500	9 MW	55,570	544	56,000	520	60,140	363	56,700	545	57,450	440
10,500	10MW	60,100	591	60,645	566	65,000	397	61,370	591	62,125	478

* Supposed NO_x Emission by IMO NO_x limit line

이 결과는 IMO 규제를 최소한으로 만족할 경우, 즉 NO_x의 배출량이 IMO 규제의 상한을 만족할 경우를 가정하고 엔진의 RPM에 따른 배출량을 계산한 것으로 정확한 측정량이 아니며 계산 결과 또한 한계가 있다.

현재 함정과 같은 특수선이 아닌 일반 선박을 보다 친환경 선박으로 만들기 위한 노력이 엔진 제작사, 조선소, 연구소, 기타 기관에서 활발하게 진행 중이며 이러한 노력을 통해 얻어진 기술은 향후 함정에도 적용 가능한 기술이 될 것이다.



제 6 장 결 론

본 논문에서는 IPS 동력 시스템의 구성 방식을 검토하고, 각 구성 방식 중에서 최적 구성의 선택을 위해 고려해야할 평가 인자와 평가 방법에 관하여 연구하였다. 평가 인자로는 동력 시스템의 중량과 연간 연료 소비량으로 하였으며, 비교를 위한 동력 시스템의 구성 방식은 발전용 소형 디젤 기관의 유무, 중형 디젤 발전기의 수량 및 발전 용량에 따라 구분하였다.

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. IPS 동력 시스템의 최적 구성을 평가하기 위한 인자로 동력 시스템의 중량과 연간 연료 소비량을 선택하였다. 중량 인자는 전투 능력과 운용성, 연료 소비량은 경제성과 환경 친화성에 영향을 미치는 인자로 정량화가 가능하며 이를 통해 시스템의 최적 평가가 가능하였다.
2. TYPE-45급 구축함의 동력 시스템 구성과 유사하게 가상함정의 동력 시스템을 구성할 경우, 발전용 소형 디젤 기관은 중대형 발전기들이 최적 효율에서 운용될 수 있도록 하는 역할을 한다. 또한, 정박 중 육상전력의 이용이 어려울 경우 대체 사용이 가능하다는 점에서 그 필요성이 강조된다.
3. IPS 동력 시스템 구성의 최적화 판단 결과, 가상 함정의 경우 검토된 구성 중 발전용 소형 디젤 기관 1대, 중대형 발전용 디젤 기관 2대, 대형 발전용 가스터빈 2대의 구성이 최적 구성으로 판단되었다. 이 때 중대형 발전용 디젤 기관의 최대 발전 용량은 높은 운용 시간 비율을 갖는 운용 모드(3.6절의 A,B 모드)에 적합하게 선택되어야 한다.
4. IPS는 CODOG, CODAG 체계의 중소형 전투함정보다 COGAG 체계를 운용하는 대형 함정에 적합한 동력 시스템으로, COGAG에 비해 많은 양의 연료를 절감할 수 있다. 이 때, 추진이 아닌 무기체계, 생활에 소요되는 전력이 증가할수록 IPS의 효과는 증가한다.

5. 함정에 적용 가능한 IPS 동력 시스템의 최적 구성을 위해 인력 운용, 획득 및 유지 비용, 선형과 추진기, 배전방식과 에너지 저장장치에 따른 효과, 환경요소 등도 정량화 하여 고려되도록 하여야 한다. 이에, 앞으로 건조되어 운용되는 IPS 함정에 대한 세부적인 연구를 통한 자료와 경험의 축적은 물론 최적화 판단 시 고려 가능한 평가 인자들의 정량화를 위한 지속적인 연구가 요구된다.



참 고 문 헌

- [1] David H Kiel, CAPT USN, 「A Vision For Directed Energy and Electric Weapons in the Current and Future Navy」, NAVSEA(NAVAL SEA SYSTEMS COMMAND), 2007.
- [2] <http://www.janes.com>
- [3] 허재현, 빈재구, 공영경, 「The trend on technology of naval electric propulsion system」, 국방과학연구소, 2003.
- [4] C.G. Hodge, 「The Electric Warship then, now and later」, Paper on electric propulsion and advances over the last 30 years presented at INEC in Hamburg, germany, 2008.
- [5] 이형민, 조병진, 「고출력 에너지 사용 체계 플랫폼 실현을 위한 해군함정의 통합 동력 시스템 발전 경향 분석」, 한국마린엔지니어링학회지 제35권 제6호 pp. 796~801, 2011.9
- [6] CDr. C.G Hodge and CDr. D.J Mattick, 「The Electric Warship」, Trans IMarE, Vol. 106, Part 2, pp. 109-125.1995.
- [7] Steve Surko and Michael Osborne. Operating Speed Profiles and the Ship Design Cycle. Naval Engineers Journal, pp.79-85, 2005.
- [8] 김소연, 이대한, 설승기, 「차기 구축함에 적용 가능한 통합전력체계 최적화 구성 방안 연구」, 2012년 함정기술세미나, pp.108-114. 2012.
- [9] R.G. Blakey and S.C. Mason, 「A development scheme for high power electric propulsion」, Proceedings AES 2000, SEE France, 2000.
- [10] S.D. Sudhoff, S.F. Glover, P.T. Lamm. D.H. Schmucker and D.E. Delisle, 「Stability Analysis of DC Power Electronics Based Distribution System Using Admittance Space Constraints」, IEEE Trans, 2000.
- [11] 안석호, 「세계최강 ‘전자기포’ 만든다」, 세계일보, 2011.

- [12] 유윤진, 최석철, 「DEA 기법을 이용한 함정무기체계의 구조적 효율성 평가 방안 연구」, 한국국방경영분석학회 제36권 제3호, 2010.12.31.
- [13] <http://www.doopedia.co.kr>
- [14] 신윤미, 조권희, 「선박용 폐열회수 시스템의 적용에 관한 연구」, 한국해양대학교 대학원 석사논문, 2012.
- [15] 이정동, 오동현 「Data Envelopment Analysis(DEA) 효율성 분석이론」, iB Book, p.15, 2010.
- [16] 대우조선해양(주), 한국해양대학교 산학협력단, 「선박 주기관용 디젤엔진으로부터의 CO2 가스 배출량 산정에 관한 연구」, 2009.
- [17] 대한조선학회, 「조선기술」, 지성사, p.197, 2011.
- [18] MAN B&W, 「Diesel-electric Propulsion Plants」, Diesel Electric Propulsion Plants Engineering Guideline, p.4, 2012.
- [19] <http://www.navy.mil.kr>
- [20] KR Green & Industrial Technology Center, 「KR Technical Report 2012」, 2012.

감사의 글

지난 2년간의 시간을 되돌아보며 본 논문을 마무리하고자 합니다.

바쁜 일정들 속에서도 사랑의 마음으로 부족한 후배이자 제자에게 학업과 삶에 대한 자세를 가르쳐 주신 최재성 교수님께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 또한, 교육 과정에서 세부적인 사항까지 지도해 주시고, 논문을 심사해주신 조권희 교수님, 김정렬 교수님께도 마음 속 깊이 감사드립니다.

2년간 내연기관 연구실에서 즐겁고 행복했던 시간을 보낼 수 있도록 도움을 주신 정균식, 노범석, 김정도, 이지웅 선배님께 감사드리며, 장하식, 배진우, 김동민, 박상준 후배님께 더 잘 해드리지 못한 아쉬움을 전합니다. 또한 함께 위탁교육 생활을 하며 많은 도움을 주신 김태현 소령님, 홍용표, 유호취 대위님께도 깊은 감사를 전합니다. 앞으로 해군의 품으로 돌아가더라도 잊지 않고 소식 전하겠습니다.

항상 자식이 잘되기만 바라시며 희생하시는 아버지·어머니, 든든한 버팀목으로 항상 옆에서 많은 조언을 주는 형님께도 감사드립니다.

열악한 인력 운용 사정에도 저에게 학업의 기회를 준 해군과 부족한 능력을 높이 평가해주시고 학업의 길을 열어주신 울곡이이함 초대 남동우 함장님, 실무에서 못한 후배가 더 바르게 커나가길 바라는 마음에 많은 조언과 지도 아끼지 않아주신 선배님들, 사랑하는 친구들과 동기들, 후배들에게도 깊은 감사를 드립니다. 감사합니다.