

함정의 통합 전력시스템 구성에 관한 연구

백현민¹ · 정균식² · 이명호³ · 최재성[†]

(Received February 26, 2014 ; Revised June 18, 2014 ; Accepted September 11, 2014)

A study on the arrangement of integrated power system for warship

Hyun-min Baek¹ · Kyun-sik Jung² · Myung-ho Lee³ · Jae-sung Choi[†]

요약: IEEE 1662(2009)에 따르면 통합 전력 시스템(이하 IPS)은 함정의 모든 동력기관(Prime mover)이 전력만을 생산하고 생산된 전력을 통합하여 추진과 무기체계, 함정 내 소요처에 공급하는 체계를 말한다. IPS의 특징은 원동기 배치의 유연성, 원동기와 추진기의 기계적인 분리, 에너지전환 및 전달의 여유 증가 그리고 미래 전자무기의 사용을 위하여 재분배가 가능한 전력의 유연성들이다. IPS는 동력기관이 최적부하에서 운전될 수 있도록 전력생산단계를 다양하게 가질 수 있다.

본 연구는 IPS의 원동기 구성 방식에 따른 적합성을 정량적으로 평가할 수 있는 평가 인자와 평가 방법에 대한 연구이다. 즉, 구축함급 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 연구하였다. 평가 인자는 동력 시스템의 최적화 대상인 전투 능력과 경제성 두 요소를 고려하여 검토하였다.

주제어: 최신 함정, 통합 동력 시스템, 동력기관 배치, 전기추진, 자료포락분석법

Abstract: 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.

In this study, an evaluation method for optimal arrangement of movers was investigated when an IPS warship is projected. The two factors are utilized for the quantitative analysis which are the weight of system as the fighting power and the fuel consumption per year as the economic feasibility. 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)

Keywords: Naval vessel, Integrated power system(IPS), Arrangement of power, Electrical propulsion, Data Envelopment Analysis(DEA)

1. 서론

범선(Sailing ship) 시대 이전 군함에서 사용된 전투력은 인간의 근력이었으며, 범선 시대 이후 전함(Battle ship) 시대에 이르기 까지 무기체계의 주된 동력은 화약을 이용한 추진력과 폭발력이었다. 이후, 미사일은 화약을 대신하게 되었으며 이지스(Aegis) 전투체계를 시작으로 등장하게 되는 전자기를 이용한 무기체계는 함정에서의 전력의 소요를 급격히 증가시키게 되었다[1]. 이러한 변화에 따라, 영국 해

군의 TYPE-45급 구축함과 미국 해군의 DDG-1000 급 구축함은 통합 전기추진 체계(Integrated Power System, IPS)를 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]. 본 연구는 IPS 동력 시스템의 구성 방식을 검토하고, 동력 시스템의 구성 방식에 따른 적합성을 정량적으로 평가할 수 있는 평가 인자

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8247-3471>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: jschoi@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4262

1 Graduate school, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jeapo2812@naver.com, Tel: 051-410-4262

2 Ship Training Center, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: vikings99@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4477

3 Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: mhlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5396

와 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. 최적화를 위한 평가 인자는 함정의 전투 능력과 운용-경제성의 두 인자를 고려하였다.

2. 함정 추진체계의 종류와 IPS의 특징

2.1 기계식추진체계(Mechanical power 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. 해군 함정에서 주로 사용되는 추진용 기관은 고속 디젤 기관과 가스터빈 기관으로, 대부분의 함정이 감속기어를 통해 원동기의 회전력을 조절하여 사용한다.

2.2 복합식 추진체계(Hybrid power system)

복합식 추진체계는 순항 속력 이하에서는 발전기에서 생산한 전력을 이용하여 전동기로 추진기를 작동하고, 순항 속력 이상에서는 기계식 추진체계와 같이 추진축이 연결된 원동기만으로 추진력을 얻거나 전동기의 추진력을 함께 병렬로 추진에 사용하는 추진체계이다.

2.3 통합추진체계(Integrated Power System)

해상에서의 전장 환경은 정보기술과 광역 전장감시체계 등의 발전으로 보다 복잡하게 구성되면서 함정에 요구되는 전력은 급격히 증가하고 있다. 해군 함정은 일반적으로 30kts 전후의 최고 속력을 낼 수 있도록 디자인 되어 있으나 Table 1로부터 알 수 있는 바와 같이 일반적으로 전체 운항 시간에 80% 이상이 순항속력(약 15~18 kts) 이하에서 이루어지고 있다. Table 1은 함정의 연간 운항시간 중 상항에 따른 운항시간의 비율을 각 속력범위 별로 조사하여 나타낸 것이다[3].

따라서 함정의 추진용 동력과 소요전력용 동력을 구분하지 않고 하나로 통합된 동력체계를 운용함으로써 기관 운용의 호환성을 갖도록 하여 효율성을 높일 수 있는 새로운 체계가 요구되게 되었다. 또한 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 운용하는 통합 동력 시스템을 등장케 하였다. 각 동력 시스템의 비교를 통해서 구분되어지는 IPS 동력 시스템의 특징은 다음과 같다.

Table 1: The ratio of operation time per year spent in each battle condition at representative speeds.

Speed (kts)	Shore Pwr	Anchor	Peace time 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

- 기관(prime mover)에 발전기(generator)가 설치된 발전용 기관으로만 구성되어 모두 전력을 생산.
- 전기식 추진방식의 채택으로 속도조정은 전동기에 의함.
- 체계를 구성하는 원동기 수량의 감소로 필요 인력 감소
- 전동기의 전류 특성(교류, 직류)에 따라 추가적인 대형 변전 시설과 기타 배전 시설 필요.
- 구성 기관을 연결하던 축이 사라지고 전력 케이블로 연결되어 기관의 배치성이 향상.

3. IPS 동력시스템의 구성과 평가 방법

3.1 IPS 동력시스템 구성의 고찰

IPS 동력시스템은 기계식과 복합식 추진 함정의 동력시스템과는 다르게 발전시스템에서 생산한 전력을 이용하여 전동기에서 전기적 추진력을 생산한다. 기계식 추진 함정의 동력시스템은 추진 시스템과 발전시스템이 분리되어 추진력과 전력이 독립적으로 생산되기 때문에 동력의 호환성(전력→추진력, 추진력→전력)이 없다. 그러나 IPS의 동력시스템은 발전시스템만으로 구성되어 동력의 전환(추진력↔전력)이 가능하다. 즉, 함정의 필요에 따라 동력 시스템이 생산하는 동력을 추진 전력, 무기체계 전력 및 생활 전력으로 공급하며 다양한 비율로 배분이 가능하다. 따라서 함정 내 설치되어 있는 원동기의 조합을 통해 생산 가능한 동력의 경우의 수가 동일한 조건의 기계식 추진 함정에 비해 많다.

이러한 IPS의 이점은 IPS 동력 시스템의 원동기의 용량과 수량의 적절한 선택에 의하여 극대화될 수 있다.

3.2 IPS 동력 시스템의 최적화 평가 인자

본 연구에서는 IPS 동력 시스템의 최적화 평가 요소로서 그 중요도에 따라 전투능력, 운용성, 경제성 및 환경친화성의 네 요소를 고려하고자 하였다. 각 요소를 정량화함에 있어서 함정의 전투능력에는 많은 인자가 포함되었지만 대표적으로는 함정의 기동성을 중요인자로 고려하여 이에 관계하는 함정의 중량변화를 정량화하여 나타낼

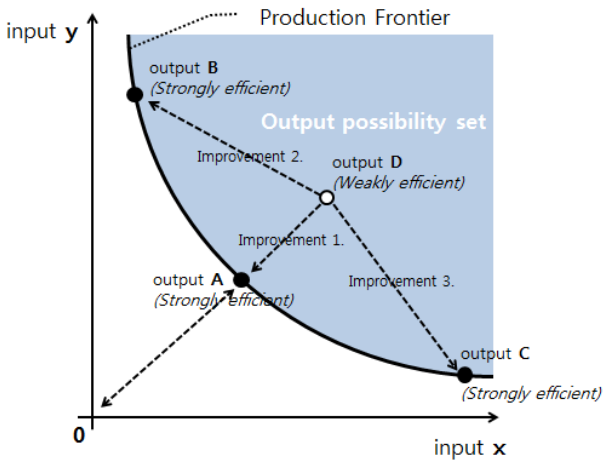


Figure 1: '2 input - 1 output' DEA model [4].

수 있다고 가정하였다. 따라서 기계식 추진체계를 기준대상으로 하여 각 동력시스템과의 중량비를 평가인자로 하였다. 또한, 운용성, 경제성 및 환경 친화성의 요소들은 공통적으로 연료소비량과 밀접한 관계를 가진다. 따라서 각 동력 시스템의 연간 연료 소비량(SFC)을 정량화하여 함정의 경제성을 대표할 수 있다고 가정하였다. 결과적으로 함정의 전투능력과 경제성을 최적화를 위한 평가인자로 선택하여 동력 시스템의 최적화 평가를 수행하였다.

3.3 평가 인자의 정량화 및 평가 방법

자료포락분석법(DEA : Data Envelopment Analysis)은 유사한 환경에 놓인 경영단위(DMU; Decision Making Unit)들의 효율성을 상호 분석하는 방법으로 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. Figure 1은 자료포락분석법의 2투입-1산출의 모델이다.

본 연구에서는 연료의 소비량과 시스템의 중량에 의하여 구성되는 output A를 선정하여 원점과 두 투입량의 거리인 $\overline{O-output}$ 을 이용한다[4].

$\overline{O-output}$ 는 효율성의 수준으로 그 값이 최소가 될수록 최적화된다. $\overline{O-output}$ 의 산출식은 아래와 같다.

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

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

x_A : 동력 시스템 구성 A의 연료 소비량

$x_{min.}$: CODOG 체계의 연료 소비량

y_A : 동력 시스템 구성 A의 기관 체계 중량

$y_{min.}$: CODOG 체계의 기관 체계 중량

α : 연료 소비량 가중치

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

각 평가인자 x_A 와 y_A 는 동력 시스템을 구성하는 원동기의 종류에 따른 연료 소비 추세와 중량 추세를 산출하여 정량화하였고 함정의 동력 시스템 운용 시간 비율을 가정하여 적용하였으며, 고려대상으로 선정된 각각의 동력 시스템의 평가결과들을 비교, 고찰하였다.

4. IPS 동력 시스템의 최적화

4.1 IPS 가상함정의 설정

현재 우리 해군에서 운용 중인 전투함의 추진 방식은 모두 기계식 추진 방식으로 전기 추진 방식을 적용 중인 전투함정은 없다. 따라서 현재 해군에서 운용 중인 OO급 구축함과 유사한 제원을 갖는 가상의 함정을 가정하였으며, 이 가상 함정의 추진체계를 CODOG에서 IPS로 전환하는 과정을 가상하여 동력 시스템의 최적 선택과정을 고찰하였다. Table 2는 가상함정의 제원이다.

Table 2: Specification of simulated vessel

Gross Tonnage	5,500 Ton
Maximum Power Demand	41.8 MW
Quantity of Generator	4
Maximum Speed (Boost Mode)	30 kts
Cruise Speed (Cruise Mode)	15 kts

가상함정의 경우, 자항 시험이 불가능하여 유사한 선형을 갖는 각종 함정들의 추진기관 제동동력(Brake Power)과 만재톤수, 최고속력과 순항 속력을 선정하여 최고속력과 순항속력에서의 가상함정의 제동 동력을 구하였다. (가상함정의 소요동력 : 최고 속도 시 41,839KW / 순항 속도 시 5,230 KW)

4.2 기관 체계별 소요동력

4.2.1 기계식 추진 체계의 소요동력

추진용 기관의 제동 동력(PB)이 함정의 추진저항을 이기고 전진하는데 필요한 유효 동력(PE)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 손실을 적용하였다.

4.2.2 IPS의 소요동력

IPS 함정은 최고 속력과 순항 속력에서 필요한 유효동력을 추진용 기관이 아닌 발전용 기관에서 모두 생산한다. 따

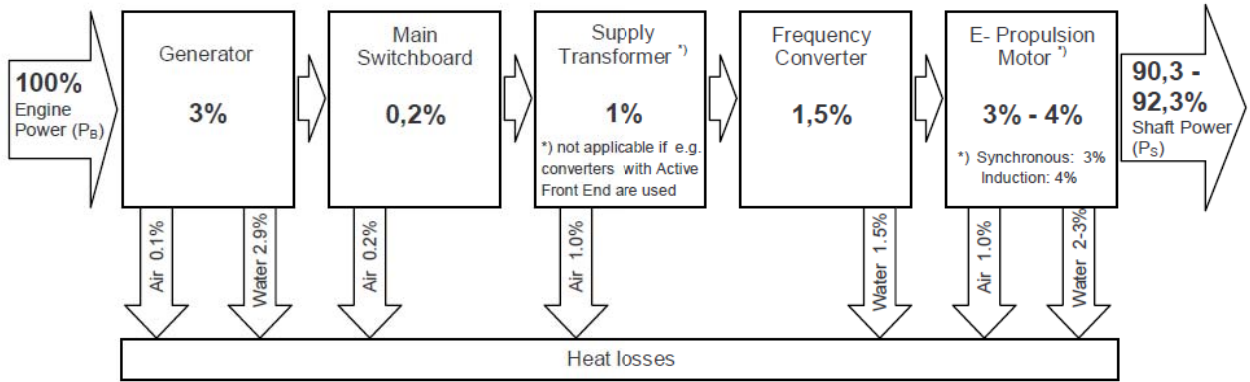


Figure 2: Typical losses of electric propulsion plant of standard electrical components [5].

라서 전 속도 범위에서 추진에 사용되는 전력의 전달 과정에서 5.5%의 손실이 발생한다. 그 세부적인 손실내용을 Figure 2에 나타낸다[5]. IPS는 그 특성 상 추진에 사용되는 전력과 무기체계의 운용에 사용되는 전력으로 구분되고 각각의 동력전달효율이 다르기 때문에 그 비율에 따라 총 소요 동력이 다르게 된다. 즉, 총 소요전력이 동일한 경우라도 고속에서 소수의 무기체계를 사용할 경우는 저속에서 다수의 무기체계를 사용하는 경우보다 손실동력이 증가할 것이다. 여기서 함정내 생활에 사용되는 전력은 무기체계의 운용전력에 포함시키기로 하며, 본 연구의 가상함정의 경우 5.0MW로 가정하였다.

4.3 가상함정의 IPS 동력 시스템 구성

IPS의 동력 시스템을 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 장시간 저부하 운전으로 인한 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 Figure 3과 같으며 이것은 Figure 4에서 분류한 A-2-N 구성과 같다.[2]

각 구성시스템의 표기를 편의상 다음과 같이 정의한다. “A-No.-Y(N)”에서 “A-No.”는 발전용 중형디젤기관의 수량을 그리고 “Y(N)”는 발전용 소형 디젤기관의 유무를 나타낸다. 즉, 전력을 대량생산하는 발전용 가스터빈 기관은 2

대로 고정하고, “A-No.”항목에서는 발전용 디젤 기관의 수량을 2대, 3대, 4대로 변화를 주어 동력 시스템을 구성하였다. 또한 각 기관체계는 소형 발전기의 유무에 따라서 구분되기 때문에 A항목은 Figure 4와 같이 디젤기관만으로 구성된 총 6개 경우를 고려한다.

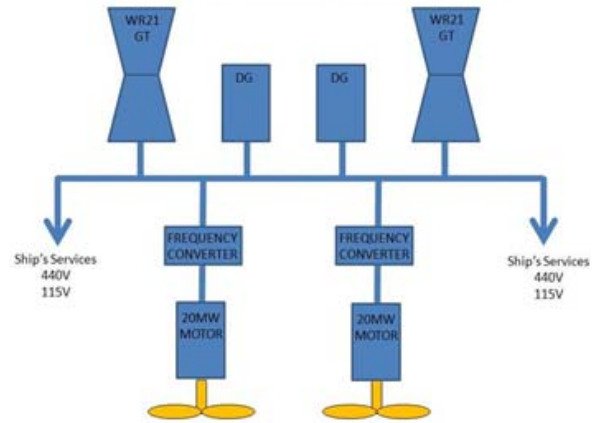


Figure 3: Arrangement of TYPE-45 (UK navy) propulsion system[2].

3% Small D/E Generator			D/E Generators		
D/E Generators			D/E Generators		
17%	25%	33%	20%	28%	36%
G/T Generators			G/T Generators		
80%	72%	64%	80%	72%	64%
A-2-Y	A-3-Y	A-4-Y	A-2-N	A-3-N	A-4-N

Figure 4: Arrangement type for IPS (alteration in D/E generator)

4.4 IPS 동력 시스템의 최적화 비교

4.3절의 6개 IPS 구성의 연간 연료 소비량과 동력 시스템의 중량을 두 투입량으로 하는 효율성 수준($\overline{O-output}$)을 계산한 결과는 Figure 5와 같다.

6개의 구성 중소형 디젤 발전기 1대와 중형 디젤 발전기 2대, 대형 가스터빈 발전기 2대로

구성된 A-2-Y의 구성이 가장 최적으로 판단되었다. 이후 중형 디젤 발전기의 발전량을 10%씩 증가시키고 반대로 가스터빈의 발전량을 10%씩 감소시키며 최적화 비교를 한 결과에서도, 많은 운용 시간에서 디젤 발전기만으로 전력을 생산하는 A-2-Y의 구성이 IPS 원동기 구성 중 최적으로 판단되었다.

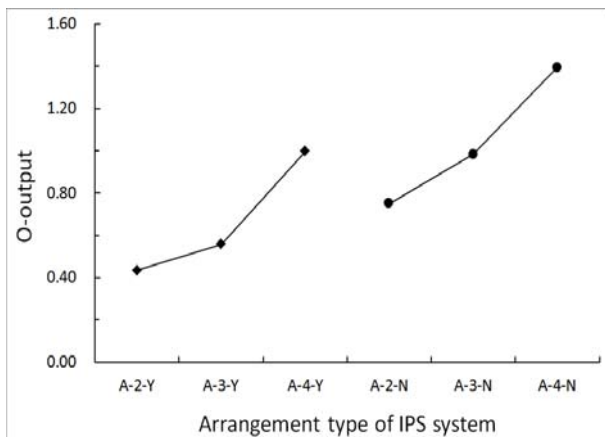


Figure 5: Comparison among 6 IPS arrangement by efficiency evaluation

4.5 만재톤수와 전력량에 따른 IPS 최적화 비교

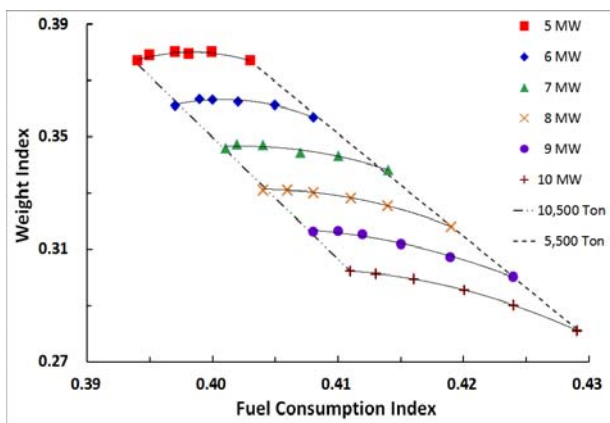


Figure 6: Trends of $\overline{O-output}$ by gross tonnage & power demand

가상함정의 만재톤수를 5,500~10,500Ton, 함정 내 최대 전력 요구량을 5~10MW의 범위에서 각각 1,000Ton, 1MW

씩 변화시키면서 연료유 소비량 변화와 시스템의 중량 변화를 인자로 하여 최적화 비교를 하였다. 비교 기준은 기계식 추진 체계 중 연료 소비량과 동력 시스템의 중량이 가장 적은 CODAG으로 선정하였다. Figure 6은 그 결과를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 함정의 만재톤수와 전력 요구량이 증가할수록 CODAG을 기준으로 한 $\overline{O-output}$ 은 CODAG에 근접하게 된다. 이는 함정이 대형화되고 고전력화 될수록 IPS의 효과가 증가함을 의미한다. 특히, 미래에는 무기체계의 운용전력이 더욱 증가할 것을 고려하면 CODAG이나 CODOG 체계로는 한계가 있을 것으로 판단되기 때문에 IPS의 필요성은 더욱 강조될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) IPS 동력 시스템의 최적 구성을 평가하기 위한 주요 인자로 전투능력과 운용-경제성의 두 인자를 고려하였으며, 각각 동력 시스템의 중량과 연간 연료 소비량을 정량화하여 시스템의 최적 평가를 시도하였다.
- (2) 발전용 소형 디젤 기관은 중대형 발전기들이 최적 효율에서 운용될 수 있도록 하는 역할을 한다.
- (3) IPS 동력 시스템 구성의 최적화 판단 결과, 가상 함정의 경우 검토된 구성 중 발전용 소형 디젤 기관 1대, 중대형 디젤 기관 2대, 대형 발전용 가스터빈 2대의 구성이 최적 구성으로 판단되었다.
- (4) IPS는 CODOG, CODAG 체계의 중소형 전투함정보다 COGAG 체계를 운용하는 대형 함정에 적합한 동력 시스템으로, COGAG에 비해 많은 양의 연료를 절감할 수 있다.

References

- [1] D. H. Kie, and C. 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>, Accessed May 19, 2012.
- [3] C. G. Hodge, The Electric Warship Then, Now and Later, Paper on Electric Propulsion and Advances Over the Last 30 Years Presented at International Nano-electronics Conference in Hamburg, Germany, 2008.
- [4] J. D. Lee and D. H. Oh, Data Envelopment Analysis (DEA), iB Book, p. 15, 2010 (in Korean).
- [5] MAN B&W, Diesel-electric Propulsion Plants, Diesel Electric Propulsion Plants Engineering Guideline, p. 4, 2012.