

전투함 하이브리드 전기추진 시스템의 PTO 운전모드 적용 및 연료절감 효과 연구

김소연[†]

A Study on the Adoption of Power Take Off Operation Mode and Fuel-Saving Effect in the Hybrid Electric Propulsion System for a Warship

So-Yeon Kim[†]

Abstract

Hybrid electric propulsion systems (H-EPSs) are an intermediate step for integrated full electric propulsion warships. H-EPSs are a dynamic combination of mechanical and electrical propulsion systems to achieve the required mission performances. The system modes could adapt to meet the requirement of the various operation conditions of a warship. This paper presents a configuration and operating modes of H-EPSs considering the operation conditions of a destroyer class warship. The system has three propulsion modes, namely, motoring mode, generating mode [power take off (PTO) mode], and mechanical mode. The PTO mode requires a careful fuel efficiency analysis because the fuel consumption rate of propulsion engines may be low compared with the generator's engines depending on the loading power. Therefore, the calculation of fuel consumption according to the operating modes is performed in this study. Although the economics of the PTO mode depends on system cases, it has an advantage in that it ensures the reliability of electric power in case of blackout or minimum generator operation.

Key words: Hybrid electric propulsion system, Destroyer class warship, Power take off mode, Fuel efficiency, Fuel consumption rate

1. 서 론

20세기 후반부터 미국과 영국 해군은 차세대 전투함 건조 개념으로써 전기추진 기술을 반영해 왔다. 기존 전투함에 적용된 기계식 추진체계 기술은 고속의 내연기관과 저속의 프로펠러 추진기를 기계적으로 결합시켜야 하므로 감속기어와 동기 장치인 클러치가 필수적으로 요구되었다. 또한 가변피치 프로펠러(controllable pitch propeller)를 적용하여 일정 함 속력 이하에서는 내연기관의 최저 속도인 아이들링(idling) 상태로 유지하면서 프로펠러의 피치 제어를 통해 함 속력을 조정하였다. 이러한 기계식 추진체계는 기술적인 성숙도가 높고 오랫동안



Fig. 1. Korea's newest frigate with Hybrid-EPS [2].

동안 운영해 왔으므로 운영자(승조원) 입장에서는 여전히 가장 선호되는 추진 방식으로 보인다.

그러나 전력전자 기술의 발전으로 전기추진 선박 시대가 부상하면서 함정 설계에도 다양한 전기추진 기술의 적용이 요구되고 있다. 함정은 국제적으로 강화되고 있는 해양환경 규제에 적용받는 대상은 아니지만, 고유가 시대에 운영유지 비용을 줄이고 환경오염 방지에도 기여하기 위한 목적으로 전기추진 시스템 도입이 필요하다. 특히, 전투 수상함의 경우에는 대잠 작전(Anti Submarine Warfare) 수행을 위해 하이브리드 전기추진 기술을 적용해왔으며, 차세대 전투 수상함의 경우에는

Paper number: TKPE-2019-24-1-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: ksy4rang@navy.mil.kr, Dept. of Electrical & Electronic Eng., Rep. of Korea Naval Academy
Tel: +82-55-907-5315 Fax: +82-0504-371-6437
Manuscript received Nov. 6, 2018; revised Nov. 20, 2018; accepted Dec. 10, 2018

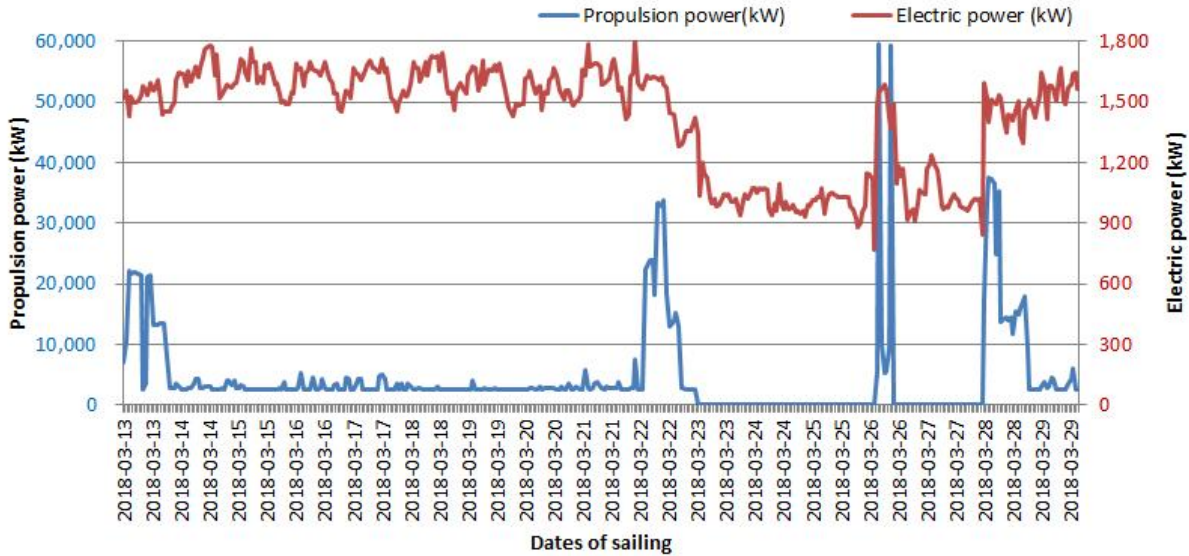


Fig. 2. Example of destroyer class warship's load profile for 17-days sailing.

고출력 전투장비와 무기체계를 탑재·운영하기 위해서 IFEP(Integrated Full Electric Propulsion) 시스템 도입이 필요할 것으로 전망되고 있다^[1].

한편, 전투 수상함은 임무목적 상 최대 요구속력이 약 30knots(약 55.6km/h) 이상 되므로 소요되는 추진동력도 수십 메가와트(MW) 급에 이른다. 이는 1만 톤급 이하의 중·소형 전투 수상함에 IFEP 시스템을 도입하기에는 부피나 중량 등 설계와 비용 측면에서 아직은 도전적인 과제이다. 반면 하이브리드 전기추진 시스템은 90년대부터 소형 전투함에 적용되어 기술적인 신뢰성이 높고 최근에도 국내외 최신 호위함(frigate)에 활발하게 적용되고 있는 추세이다. 우리나라 해군도 최신 호위함(그림 1)과 군수 지원함(fast combat support ship)에 적용되어 운용을 시작하였다.

하이브리드 전기추진 시스템은 설계 방법에 따라 기계식 추진 계통과 전기추진 계통의 장점을 모두 취할 수 있다는 것이 장점이다. 본 논문에서는 약 6,000톤 급 가상의 구축함을 대상으로 하이브리드 전기추진 시스템 구성 및 운용 모드에 대해 제안하였다. 2절에서는 시스템 설계를 위한 부하용량 분석과 시스템 구성 방식에 대해 논의하고, 3절에서는 전투함 고유의 운용 특성을 고려하여 하이브리드 전기추진 시스템의 운용모드를 정립하고 추진전동기의 축발전기 모드(이하, Power Take Off, PTO mode) 적용에 대해 제안하였다.

PTO 운전은 추진기관에서 발생된 에너지 중 일부를 축발전기로 공급하여 발전기 대신 함 내 필요한 전력을 공급하는 모드이다. 예전부터 장거리 정속 운항을 하는 상용선박에서는 감속기어에 별도의 축 발전기(shaft generator)를 설치하여 항해 중에는 선박 발전기를 끄고 추진엔진으로부터 전력을 생산함으로써 선박 연료 사용량 절감에 크게 기여하였다. 그러나 선박 속력이 변하거나 외부 환경의 변화로 엔진속력이 변동할 때는 안정적

인 전력 생산이 불가하다는 단점이 있었다. 한편, 전력 전자 기술의 발전으로 전압과 주파수를 제어할 수 있는 전력변환장치 도입이 활성화되면서 PTO 적용이 훨씬 안정화되었다. 특히, 양방향 전력전달이 가능한 Active Front End 방식의 컨버터 적용은 축 발전모드 뿐만 아니라 전기추진 모드(Power Take In, PTI mode)로도 동작시킬 수 있어 추진기관이 고장 난 경우 저속으로 선박을 항구까지 운전할 수 있게 한다. 전투함 하이브리드 전기추진 시스템은 저속에서 전기추진 운용을 하는 것이 주된 목적이지만, 양방향 전력전달이 가능한 전력변환 시스템 도입으로 PTO 모드도 운용 가능하다^{[3]-[5]}. 그러나 아직 전투함에 적용된 실례가 없으므로, 본 논문에서는 전투함에 적용 방법과 필요성 그리고 연비 절감 효과에 대해 분석해 보았다.

2. 시스템 용량 및 구성 설계

2.1 추진동력과 함 내 소요전력

하이브리드 전기추진 시스템의 설계 시에는 함 운용 중 발생 가능한 다양한 부하 조건/loading conditions)에서 가능한 최적의 효율을 가지도록 동력과 전력 전달 계통을 구축하는 것이 필요하다. 시스템 부하는 추진동력 부하(propulsion power loads)와 이를 제외한 나머지 전력 부하(electric power loads)로 구분된다. 추진계통은 전투함의 최대속력과 순항속력(또는 경제속력), 항속거리, 경하중량 등 설계 요건을 만족시키면서 함정 고유의 운용 프로파일(operating profile)을 바탕으로 경제적이고 신뢰성 있는 시스템이 되도록 설계해야 한다. 전력공급 계통도 최대 전력부하 조건에서 안정적으로 전력공급이 가능하면서 동시에 경제적인 운용이 가능하도록 발전기들의 용량과 수량을 선정해야 한다.

그림 2는 우리나라 구축함 급 전투함의 추진동력 부하

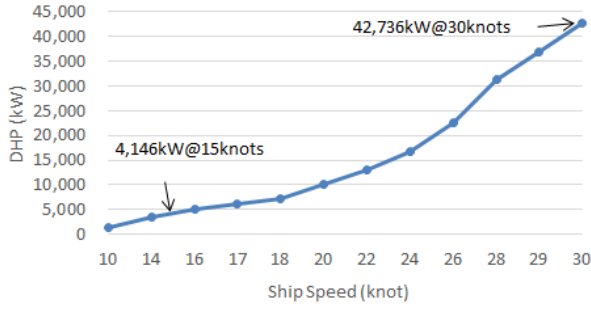


Fig. 3. Assumed propulsion power(DHP) for a warship.

와 일반 전력부하의 운용 예를 보여주고 있다. 현대의 전투함은 다목적 성 임무를 가지기 때문에 연안 경비 임무를 하다가도 필요시 과병 임무를 수행하는 등 다양한 함 운용 특성을 가지기 때문에 부하 프로파일도 일정하지 않다. 즉 시스템 설계를 위한 특정 요건을 규정하기가 어려우므로 가능한 다양한 부하조건을 상정하여 효율적인 시스템 운용이 되도록 설계하기 위한 노력이 필요하다. 본 논문에서는 유사함정 자료를 바탕으로 약 6,000톤 급 가상 구축함의 추진동력과 함 내 소요전력을 가정하였고, 이를 바탕으로 시스템 설계를 수행하였다.

먼저 함정의 속도 별 추진동력을 예측해야 하는데, 모형시험 결과를 실선으로 확장하는 방법을 이용하여 산출하였다. 즉 모형시험 결과로부터 선체를 정수(calm water) 중에서 예인하는데 필요한 유효동력(Effective Horse Power, P_{EHP})을 측정한다. 즉 유효동력의 정의는 식 (1)과 같다. 여기서 R_T 는 선체의 총 저항이고, V_S 는 선체의 속도이다.

$$P_{EHP} = R_T \times V_S \quad (1)$$

프로펠러의 추진효율(propulsive efficiency, η_D)을 고려하여 추진기의 추진축 끝단에 전달되어야 하는 전달동력(Delivered Horse Power, P_{DHP})을 얻을 수 있다. 즉 전달동력의 정의는 식 (2)와 같다.

$$P_{DHP} = P_{EHP} / \eta_D \quad (2)$$

여기에 축계(shafting system)의 효율(η_S)을 적용하여 축동력(Shaft Horse Power, SHP)을 구한다. 즉 축마력의 정의는 식 (3)과 같다.

$$P_{SHP} = P_{DHP} / \eta_S \quad (3)$$

추진전동기가 축계에 직결되는 전동기(shaft mounted motor)인 경우 SHP가 추진전동기의 정격출력이 되고, 감속기어를 거치는 전동기(Reduction Gear mounted motor)인 경우에는 기어 손실을 고려한 동력이 추진전동기 설치동력, 즉 제동동력(Brake Horse Power, BHP)이 된다. 그림 3은 본 논문에서 대상으로 하는 가상의

TABLE I
ELECTRIC POWER LOADS ANALYSIS AND CONFIGURATIONS OF GENERATOR-SETS

Classification	Maximum electric power(kW)
Ship Service Electric Loads	2500kW/0.99/0.96 = 2631kW
Propulsion Electric Loads	4146kW/0.90/0.96 = 4799kW
Sum (including Margin)	8256W(10%)
Pulsed Loads	3000kW
Options	Configuration of Gensets
I	4500kW × 3sets Gas-turbine Generator
II	3000kW × 3sets Gas-turbine Generator

구축함에 대한 DHP 소요 곡선이며, 이를 기준으로 전달 효율을 고려하여 최종 소요동력을 산정한다.

다음으로 발전기 총 소요용량($P_{G.load}$)을 산정하려면 최대 전력 부하량 예측이 필요하다. 전력부하분석을 통해 추진을 제외한 일반 함 서비스 부하의 최대 소요전력($P_{SS.load.max}$)을 추정하고 여기에 함 공급 변압기(P_{Xmr})와 발전기(P_{Act})의 효율을 고려하여 최종 소요전력을 산정하며 식 (4)와 같다.

$$P_{G.E.load} = P_{SS.load.max} / \eta_{Xmr} / \eta_{Act} \quad (4)$$

한편, 전기추진 부하는 전기추진 최대속력에서의 소요동력(DHP)에 전기추진 계통의 전달 효율을 고려하여 발전기 소요전력량을 최종 산정하며 식 (5)와 같다. 두 부하의 합에 여유 용량을 더하면 발전기 최종 소요용량이 된다.

$$P_{G.P.load} = DHP_{max} / \eta_{EPS} / \eta_{Act} \quad (5)$$

본 논문에서는 함 서비스 평균전력을 2,500kW로 가정하였고, 레이저 무기체계와 같이 미래 탑재 예상되는 펄스 부하(Pulsed Loads)를 3,000kW 가정하였다. 전기추진 설계 최대속력인 15knots에서 소요동력(DHP)은 4,146kW이므로 이를 바탕으로 발전기 개별 용량과 수량을 결정하면 표 1과 같이 선택 안을 만들 수 있다.

Option-I은 일반부하와 추진부하, 그리고 펄스부하를 모두 합한 총 소요용량을 만족시키기 위해 4,500kW 가스터빈 발전기 3대를 설치하는 것으로 구성하였다. Option-II는 펄스 부하 운용 시 기본적으로 전기추진 운전이 제한될 것이므로 함 내 최대전력부하만 고려한다면 3,000kW 가스터빈 발전기 3대를 설치하는 옵션도 선택 가능하다. 또한 펄스 부하는 간헐적으로 운용되므로 필요 시에는 추진전동기 두 대에 의한 PTO 발전 모드에 의해

TABLE II
TYPES OF EXISTING HYBRID CONFIGURATIONS

Type		Example
CODLOD	COmBined Diesel-eLectric Or Diesel-engine	MARS Tanker(UK)
CODLAD	COmBined Diesel-eLectric And Diesel-engine	AOE-51(Korea)
CODLOG	COmBined Diesel-eLectric Or Gas-turbine	FFG-818(Korea) Type-26(UK)
CODLAG	COmBined Diesel-eLectric And Gas-turbine	F-125(German) FREMM(Italy)

임시 전력 공급도 가능하므로 발전기 용량을 운용개념에 따라 최적화하는 것이 가능하다. 디젤엔진 발전기는 중량 측면에서 함 내 설치성이 가스터빈 발전기에 비해 현저히 떨어지므로 논외로 하였다. 또한 가스터빈 발전기로 구성하는 것이 가스터빈 추진기관과 동일한 연료계통을 사용할 수 있어 장점이 될 수 있다.

2.2 하이브리드 전기추진 시스템 구성

전투함은 30knots 최대속력을 얻기 위해서 가스터빈 추진기관을 사용한다. 가스터빈의 용량은 고속용과 저속용 두 추진체계를 병렬로 운용하는 'AND' 조합과 단독으로 운용하는 'OR' 조합의 선택에 따라 달라질 수 있다. 표 2는 여러 나라 해군에서 운용 중인 하이브리드 전기추진 시스템 방식을 나타낸다. 'AND' 조합은 저속에서는 전기추진을 하고, 고속에서는 (Boost) Power Take In 모드에 의해 전기추진에 의한 추력을 더하여 추진력을 증대시키는 개념이다. 이 경우 두 추진기관의 정격속도가 다를 수 있어 이중의 기어 비를 사용해야 하므로 감속기어가 좀 더 복잡하게 구성되는 단점은 있으나 고속용 추진기관의 용량을 감축하여 설치할 수 있다는 장점이 있다.

반면 'OR' 조합은 기계식 추진과 전기추진이 독립적으로 구성되므로 복잡한 기어 비가 필요 없다는 장점이 있다. 그러나 이 경우 전기추진 모드에서 가스터빈 모드로 전환되었을 때 대형 가스터빈 운용으로 연비 효율이 크게 떨어지는 단점이 있다. 최근에는 가스터빈의 용량은 최적화하고 단일입력 이중출력(Single Input Double Output)의 크로스 커넥션 타입 감속기어를 사용하여 3기 2축 시스템으로 구현하여 보다 효율적인 시스템이 되도록 하고 있다. 본 논문에서는 해군에서 널리 사용되고 있는 25,000kW 가스터빈 두 대를 적용하였을 때 30knot 최대속력을 얻을 수 있으므로 별도의 Boost Power Take In 모드 적용은 불필요하다.

다음은 전기추진 시스템의 전력변환 방식 선정인데, 일반적인 수상함 배전방식은 60Hz AC 배전을 채택하고 있으므로 추진부하 단 AC-DC 전력변환장치의 종류에 따라 단방향 전력변환만 가능한 DFE(Diode Front-End)

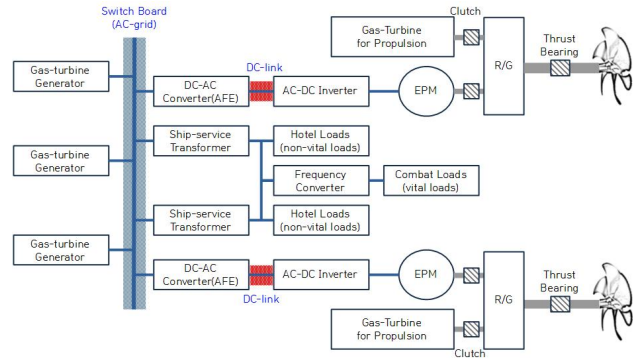


Fig. 4. Layout of hybrid electric propulsion system.

TABLE III
GENERAL OPERATION MODES OF HYBRID EPS

Operating Conditions		Operation Mode
①	In Port	EPS mode(◎) GT mode(△)
②	Transit	EPS mode(◎) GT mode(△)
③	Anti-Submarine Warfare (Silent mission)	EPS mode(◎) GT mode(△)
④	Combat Readiness	EPS mode(×) GT mode(◎)
⑤	EPS Failure	EPS mode(×) GT mode(◎)
⑥	Generator Failure	EPS mode(×) GT mode(◎)
⑦	Propulsion Engine Failure	EPS mode(◎) GT mode(×)

TABLE IV
OPERATION MODES OF HYBRID EPS WITH PTO

Operating Conditions		Operation Mode
①	In Port	EPS mode(◎) GT mode(△)
②	Transit	EPS mode(◎) GT(PTO) mode(△)
③	Anti-Submarine Warfare (Silent mission)	EPS mode(◎) GT mode(△)
④	Combat Readiness	EPS mode(×) GT(PTO) mode(◎)
⑤	EPS Failure	EPS mode(×) GT mode(◎)
⑥	Generator Failure	EPS mode(×) GT(PTO) mode(◎)
⑦	Propulsion Engine Failure	EPS mode(◎) GT mode(×)
⑧	Large Pulse loads	EPS mode(×) GT(PTO) mode(◎)

방식과 양방향 전력변환이 가능한 AFE(Active Front-End) 방식 중에 선택 가능하다. DFE 방식은 12펄스 또는 24펄스의 다이오드와 저차 고조파 저감용 위상치환 변압기가 필요하다. 다이오드 정류회로는 구조가 간단하나 고조파 저감용 변압기의 구조가 복잡하고 비싸며 전체

전력변환 장치의 부피를 크게 증대시키는 단점이 있다. 반면 AFE 방식은 PWM 제어를 수행하는 AC-DC 컨버터와 필터가 설치된다. DFE 방식에 비해 전고조파왜율(THD)이 개선되는 장점이 있고, 저전압 시스템의 경우 변압기를 필요로 하지 않아 시스템의 부피를 줄일 수 있다. 하지만 스위칭 손실이 증대되고 EMI/EMC 필터가 추가적으로 필요하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 AFE 방식을 적용하여, 추진전동기를 전동 모드와 발전 모드로 동작시킬 수 있도록 구성하였다. 전체적인 시스템 구성은 그림 4에서 보는 바와 같다.

3. 시스템 운용 모드 및 연비

3.1 시스템 운용 모드 정립

하이브리드 전기추진 시스템은 동일한 함 속력에서도 함 운용 개념 및 상황에 따라 다양한 운용 모드를 선택할 수 있다는 것이 장점이다. 따라서 함정의 운용 조건과 임무목적 등을 분석하여 시스템 운용 개념을 정립하는 것이 중요하다. 표 3은 전투함의 7가지 운용 조건에서 하이브리드 전기추진 시스템의 운용 모드를 분류한 것이다. 동일한 함 속력에서도 전기추진 모드(EPS mode)와 가스터빈 추진모드(GT mode) 중 전환 선택이 가능하므로 각 운용 조건에서 선호되는 운용 모드를 ‘◎’ 표시 하고, 선호는 아니지만 운용 가능한 모드는 ‘△’ 표시, 운용 불가능한 모드는 ‘x’ 표시하였다.

출·입항 및 임무지로 이동 시에는 전기추진이 선호될 것이나, 함 임무목적 상 신속한 기동이 필요한 경우에는 가스터빈 모드로 전환해야 한다. 특이할만한 것은 전투태세(combat readiness) 시에도 긴급 전속(full speed)운전을 대비해야 하므로 추진모드 전환 시간을 고려하였을 때 전기추진 사용이 제한된다는 것이다. 이 외에도 발전기나 전기추진 시스템 자체에 사고 또는 고장이 발생하였을 때에도 가스터빈 모드로 전환하여 중·저속 운용을 해야 한다. 이러한 불가피한 전기추진 제한 조건이 전투함의 여건 상 전체 운용시간의 상당 비중을 차지할 수 있으며, 따라서 가스터빈 모드로 전환하였을 때에도 효율적인 시스템이 되도록 대책을 강구할 필요가 있다.

본 논문에서는 가스터빈 모드 전환하였을 때 Power Take Off 운전 모드를 병행하는 것을 제안하였으며, 표 4에 나타난 바와 같이 시스템 운용 모드를 정립하였다. 즉, 임무지로 이동(②)할 때와 전투태세(④) 조건에서는 상황 요건에 따라 전기추진 모드 사용이 제한되고 가스터빈 모드를 사용해야 하는데 이 경우 PTO 운전을 병행한다. 또한 비상(emergency) 상황인 발전기 고장(⑥)과 일시적으로 요구되는 펄스 부하 운용(⑧) 시에도 전기추진 운용이 제한되고 가스터빈 모드로 전환 필요하므로 이 경우에도 PTO 적용이 가능하다. 전기추진 모드와 PTO 모드에서의 전력 흐름은 그림 5, 6과 같이 나타낼 수 있다.

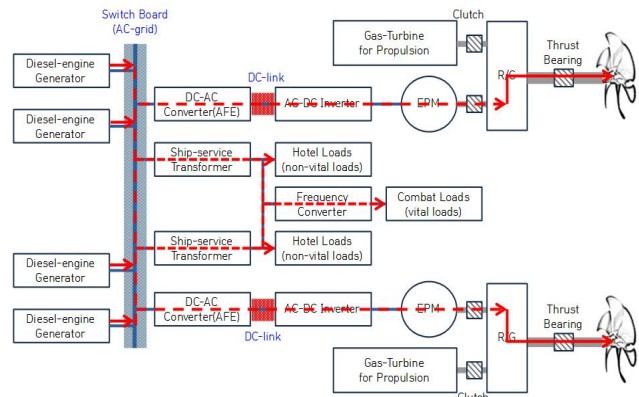


Fig. 5. Power flow in propulsion mode.

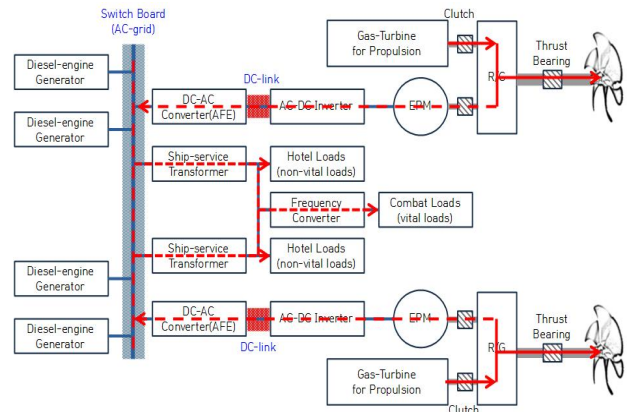


Fig. 6. Power flow in PTO mode.

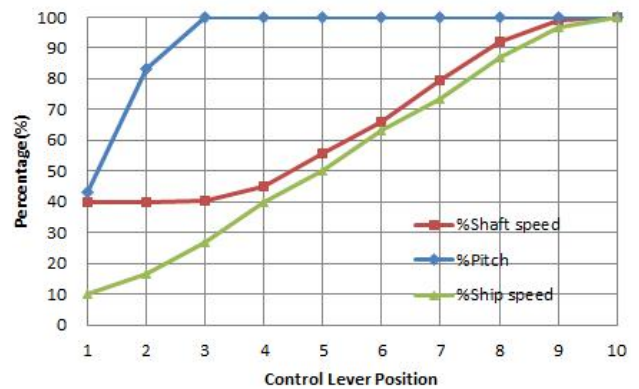


Fig. 7. Combinator curve of CPPs.

3.2 시스템 부하율과 연비 계산

전투함 하이브리드 전기추진 시스템은 저속에서도 가스터빈 추진에 의한 함 속력 조정이 가능해야 하므로 가변피치 프로펠러를 적용하고 있다. 그림 7은 전투함에 적용되고 있는 CPP 피치제어 도표로써 함 속력과 축속력, 그리고 프로펠러의 피치 비 관계를 나타낸다. 최대속력 대비 30%인 Control Lever Position 3(약 10knots) 이하에서는 추진축의 회전속력은 아이들링 상태로 유지하면서 프로펠러 피치만 조정한다. 따라서 10knots 이하의

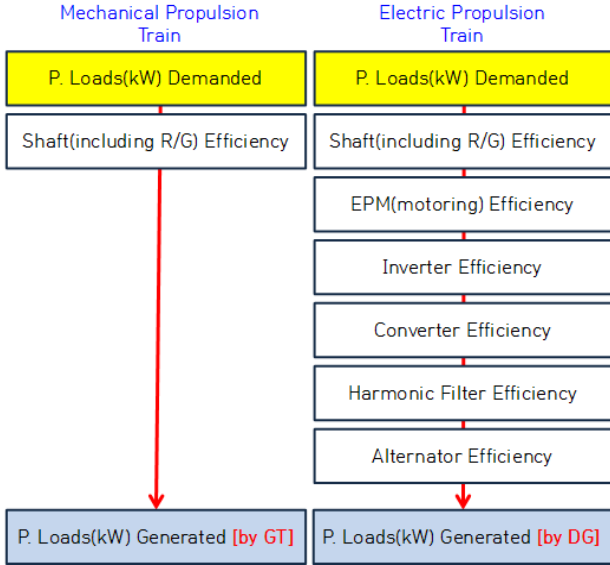


Fig. 8. Transmission process for propulsion power loadings.

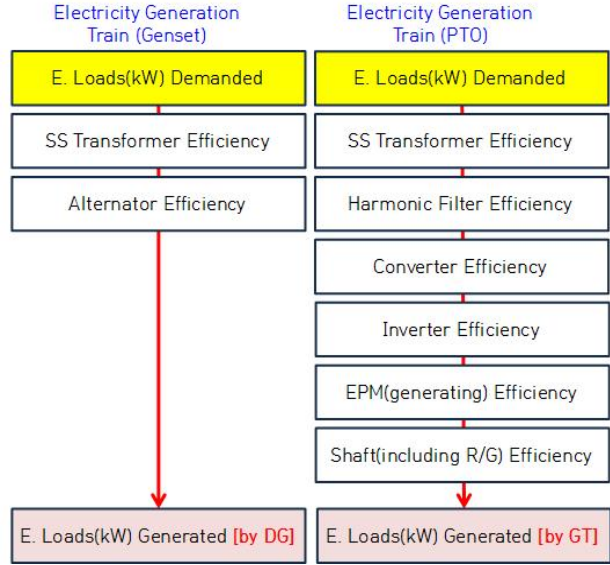


Fig. 9. Transmission process for electrical power loadings.

축 속도에서도 추진전동기의 발전 모드에 의한 전력공급 확보가 가능하다. 그러나 추진전동기의 정격속도는 15knot(CLP 5)이므로 CLP 1~4 단계의 PTO 운전에 의한 전력공급은 이보다 작아지게 된다. 한편 최대속력(CLP 10)에서도 가스터빈 정격용량이 제한되므로 PTO 운전을 제한하였다. 따라서 본 논문에서는 15knots 이상부터 27knots 즉, CLP 5~9 단계를 PTO 운용 가능 범위로 설정하였다.

시스템의 연비 성능을 비교하기 위해서는 먼저 시간당 연료 소모율(Fuel Rate, kg/h)을 계산하고, 이를 바탕으로 연료 사용량(tons)은 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.

$$Fuel = \frac{FR(kg/h) \times D(NM) \times d}{SP(knots) \times 1000} \quad (6)$$

여기서, FR 은 연료 소모율이고, D 는 이동한 항해거리, d 는 시스템 노후화(deterioration)로 인해 발생할 수 있는 연료 증가량을 고려한 것으로 본 논문에서는 '1'로 가정하였으며, SP 는 함 속력을 의미한다.

시스템의 시간 당 연료 소모율을 계산하려면 해당 속력에서의 시스템 구성과 운용 방식이 매우 중대한 영향을 미치게 된다. 따라서 부하 요구량을 기준으로 시스템의 전달 효율을 고려하여 내연기관이 공급해야 하는 최종 출력량을 예측해야 하는데, 전달 효율 과정을 정리해보면 그림 8, 9와 같다. 각각 추진부하와 전력부하에 대한 시스템 전달 효율 과정을 비교한 것으로 각각 기계식 추진 전달과 전기추진 전달 과정에서 발생하는 손실, 그리고 발전기에 의한 전력공급과 PTO 모드에 의한 전력공급 시 발생하는 손실을 고려한 것이다. 실제 장비가 선정되기 전에는 부하율에 따른 효율 정보를 얻는 것이 거의 불가능하므로 본 논문에서는 유사함정 경험에서 얻은 수치를 이용하였다^[6]. 즉, 감속기어를 포함하는 축

TABLE V
SYSTEM EFFICIENCIES(ASSUMPTION)

Classification	Efficiency Values
Shafting system(η_s) (including R/G)	96%
Electric Propulsion Motor	88.1% ~ 96.5%
Variable Speed Drive (Inverter & Converter)	96.8% ~ 98.8%
Harmonic Filter	99%
Ship Service Transformer	99%
Alternator(Generator)	90% ~ 96.9%

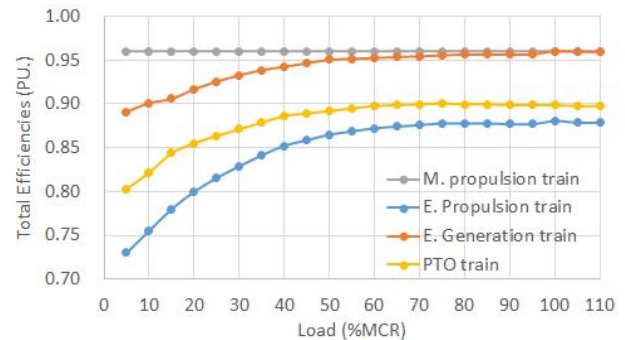


Fig. 10. Assumed total transmission efficiencies.

효율은 전 영역에서 96%의 일정 값을 적용하였고, 추진전동기 효율은 부하변동에 따라 88.1%에서 96.5%까지 분포한다. AC-DC 인버터와 DC-AC 컨버터는 합산하여 96.8%에서 98.8% 범위의 효율 분포를 보이는 것으로 적용하였다. 고조파 필터와 함 공급 변압기의 효율도 거의 변동이 없으므로 각각 99% 일정 값을 적용하였다. 발전기

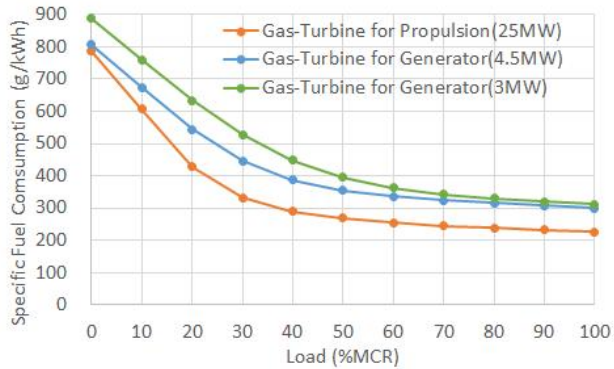


Fig. 11. SFC characteristics of gas-turbine for propulsion and generation.

효율은 부하변동에 따라 90%에서 96.9% 범위까지 분포하는 것으로 가정하였다. 이를 종합한 시스템 전달 효율은 표 5와 같이 정리될 수 있으며, 부하율 변동에 따른 시스템 효율 곡선은 그림 10과 같다.

전기추진 시스템을 통한 추진 모드나 발전 모드가 에너지 전달 손실 측면에서는 확실히 불리해 보이나, 그림 11의 연비 특성 곡선(SFC map, kg/kWh)에서 보는 바와 같이 저 부하 운전 시 발생하는 과도한 연료 소모율을 개선함으로써 연료 사용량 절감에 크게 기여할 수 있다. 그림 11은 본 논문에서 고려하고 있는 3MW, 4.5MW 발전기용 가스터빈과 25MW 추진용 가스터빈의 SFC 곡선을 나타내고 있다. 고정속 운전을 하는 발전기용 엔진은 약 50% 이하의 저 부하에서 SFC가 악화되는 현상을 보이는 반면, 가변속 운전을 하는 추진용 엔진은 약 20~30% 이하에서 SFC가 점차 급증하는 것을 볼 수 있다. 함정은 시스템 설계 개념에 따른 특성 상 여유용량이 커서 대부분의 함 운용 시간동안 저 부하 운전을 하고 있으므로 부하율 개선을 통한 연료 사용량 절감 효과가 크다. 결론적으로, 시간 당 연료소모율 FR 은 각각의 가스터빈의 운전 부하율에 따른 SFC 값에 출력요구량(kW)을 곱하여 산출하며, 식 (7)과 같이 추진용 가스터빈과 발전기용 가스터빈의 연료 사용량을 모두 합산한 결과가 시스템의 총 연료 사용량이 된다.

$$Fuel_{Total} = Fuel_{P.load} + Fuel_{E.load} \quad (7)$$

3.3 시스템 운용에 따른 연비 비교

그림 12는 각 속력에서 시스템 운용 모드에 따른 연료소모율, FR 을 계산한 결과를 보여준다. 저속에서는 전기추진 모드가 가스터빈 모드(GT without PTO mode) 대비 연비가 가장 좋은 것을 알 수 있다. 15knots에서 약 60% 연료사용량이 절감되었다. 전기추진 모드에서 9knots 이하에서는 발전기 2대를 켜도 되지만, 그 이후부터는 전력량 증가로 발전기 3대 모두를 투입해야 한다. 별도의 예비 발전기가 없으므로, 만약의 사태를 대비하여 부하분담 또는 부하차단 등의 전력관리

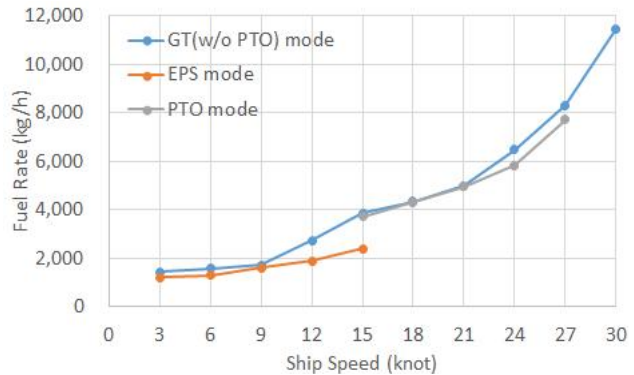


Fig. 12. Fuel rate at each ship speed.

시스템(Power Management System)이 정밀하지 않으면 정전(blackout)에 매우 취약할 수 있다. 전기추진 시스템의 경우 긴급 상황 발생 시 추진속력을 제한시킨다.

한편, 위에서 언급하였듯이 전투함의 운용목적 특성상 전기추진 운전에서 가스터빈 모드로 전환되는 지연 시간을 방지하고 긴급히 고속으로 추진하기 위해서 저속에서도 가스터빈 모드로 운용될 수 있다. 가스터빈 모드에서는 항시 발전기 2대와 가스터빈 2대를 운용한다. 평상 시 부하는 3MW 발전기 한 대로 60~70% 이상의 부하율로 운용 가능하지만, 항시 2대를 투입하므로 거의 30~40% 이하의 부하율로 운용된다.

가스터빈 모드 전환 시에는 PTO 모드를 적용할 수 있는데, 발전기를 투입하지 않고 가스터빈으로부터 함 내 전력을 생산하여 공급 가능하다. 15~21knots에서 개선효과가 거의 보이지 않는 이유는 가스터빈 모드에서의 발전기 SFC 특성 대비 PTO 운용모드에서의 가스터빈 부하율이 여전히 낮아 SFC 특성이 크게 개선되지 않았기 때문이다. PTO를 하여도 추진용 가스터빈의 부하율이 거의 20% 이하인데 24knots 이상부터는 SFC 특성이 개선되어 PTO에 의한 연료 절감 효과가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

이제 특정 운용상황(시나리오)을 가정하여 연료 사용량을 비교할 수 있는데, 임무지로 이동하는 모드(②)에 대해 비교해 보았다. 즉, 임무 해역까지 이동거리는 약 270해리(약 500km) 이고, 이 때 함 내 평균 전력부하는 2,500kW를 사용한다고 가정하였다. 그림 13은 15knots로 항해 시 시스템 각 운용 방식에 따라 발전기와 가스터빈에서 소비되는 연료 사용량을 비교한 것이다.

여기서, 발전기 단독운전(Single Generator Operation)도 함께 고려해 보았다. 즉, PTO 운전과 함 내 발전기 한 대를 병렬로 운용하는 경우를 의미한다. 궁극적인 목적은 SGO 운전을 하면서 전력공급의 신뢰성과 연속성이 보장되도록 하는 것인데, 이를 위해서는 함 내 계통에 대용량의 에너지 저장 장치를 도입하는 것이 방법일 수 있으나 아직 전투함에 적용된 실례가 없으므로 논외로 한다.

경제속력인 15knot로 270해리를 이동하므로 18시간이

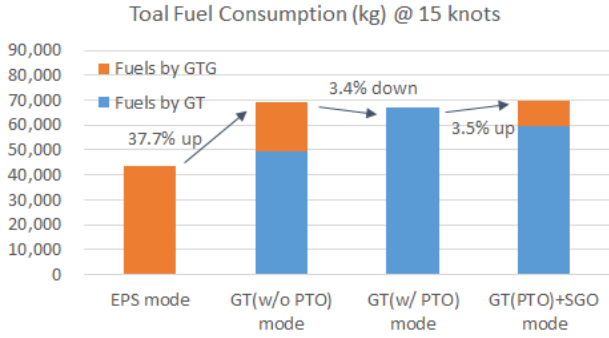


Fig. 13. Total fuel consumption at 15knots transit mode.

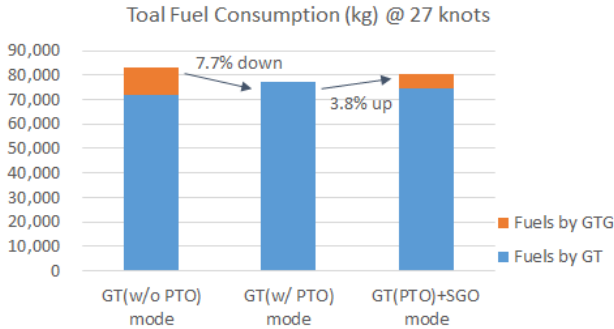


Fig. 14. Total fuel consumption at 27knots transit mode.

소요될 것이나, 전투함의 운용목적 상 신속한 이동을 해야 한다면 가스터빈 추진으로 전환해야 한다. 예를 들어, 약 27knots 속도로 10시간을 이동한다고 가정하면 그림 14와 같은 연료 사용량 분포를 보인다. 전기추진 모드는 적용 불가하며, 함 내 발전기는 모두 π 고 PTO 운전으로 전력을 공급하는 것이 연비 측면에서는 가장 유리함을 알 수 있다.

마지막으로 전투함이 항해 중인 임무시간 동안 속력별 운용비용(Ship-speed operating profile)이 그림 15와 같은 분포를 가진다고 가정하였다. 여기에는 전투배치(④)와 같은 전투함의 여러 상황이 포함되어 시스템 운용 개념이 수시로 변동 가능하기 때문에 연비를 하나의 시스템 운용모드로 규정하는 것은 부적절하다. 특히, 연간 운용시간에 대한 데이터를 적용하지 않는 이유는 수년에 걸쳐 누적된 대표적인 함 프로파일이 아직은 없고, 외국의 유사함정 자료를 이용하기도 하는데 우리 해군의 운용 실적과는 동떨어진 경우가 많기 때문이다. 대신 특정 기간을 기준으로 연료 사용량을 비교하는 것이 합리적인 시스템 성능 비교 수단이 될 수 있다.

그림 16은 시스템 운용 모드에 따른 총 연료 사용량을 비교한 것이다. 연료유의 가격(981원/L)과 경유 밀도 0.832kg/L를 고려하면, 3주간의 임무동안 CLP 1~5 단계 전기추진 모드를 적용함에 따른 연료 절감량은 266.5톤이며, 31,426만원에 해당한다. 그러나 전기추진을 작전목적 상 제한하고, 가스터빈 추진을 해야 하는 경우 CLP 5~9 단계 PTO 모드를 적용하였을 때 67.9톤을

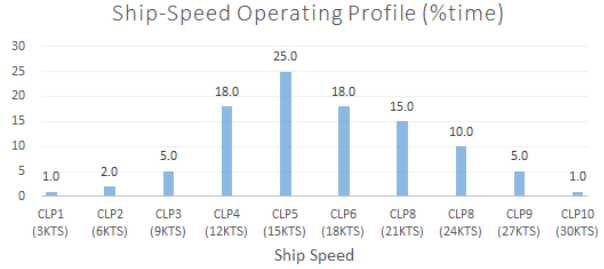


Fig. 15. Assumed ship-speed operating profile of a warship.

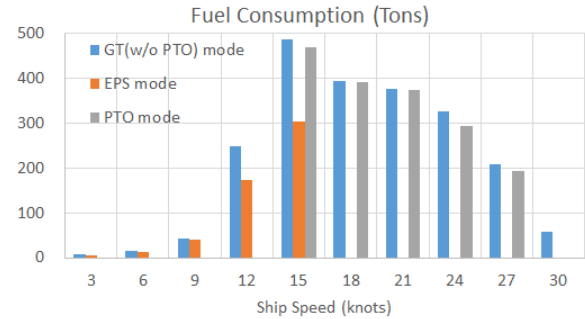


Fig. 16. Total fuel consumption at each ship speed.

절감할 수 있으며, 약 8,000만원에 해당하는 연료비용을 절감할 수 있다.

이 외에도 레이저 무기체계와 같은 펄스 부하(⑧) 운용모드도 현재는 운용되고 있지 않지만 무기체계의 발전으로 구축함 급 전투함에 탑재 예상되는 부하이다^[7]. 이러한 무기체계를 운용할 때도 역시 전기추진 모드는 제한될 수 있으며, 가스터빈 모드 전환 상태에서 함 내 전력을 최대화시키는 것이 필요하다. 따라서 전투함에 PTO 모드를 적용하면 발전기 용량을 증대(표1의 발전기 Option-I)시킬 필요 없이 시스템 효율을 보다 최적화하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 6000톤급 구축함을 대상으로 추진동력과 소요전력을 분석하고, 이를 바탕으로 하이브리드 전기추진 시스템 구성을 설계하였다. 전투함의 특성 상 전기추진 모드가 제한되는 함 운용 조건을 제시하고, 가스터빈 모드로 전환하였을 때 Power Take Off 모드를 운용하는 것이 연비 측면에서 효율을 개선할 수 있음을 보여주었다. PTO 모드에 의한 연비 절감 효과는 함 내 발전기와 추진기관의 부하율 개선 정도에 따라 달라질겠지만, 구축함 급 전투함에 적용될만한 엔진들의 실제 데이터를 이용하여 PTO 적용 효과를 분석한 결과 연비 개선에 도움이 되는 것을 확인하였다. 특히, 차기 구축함에 탑재 예상되는 펄스 부하를 운용하려면 발전기 용량을 증대시켜야 하는데, 이는 평상 시 발전기 연비 저하의 근원이 될 수 있다. PTO 모드를 적용하면 발전기 용량을 평상 시 부하전력량에 맞게 최적화 설치하는 것이

가능하여 전투함에 과도한 용량의 발전기를 설치하지 않아도 된다. 또한 발전기 단독운전을 가능하게 하거나 발전기 없이도 함 내 소요전력을 공급할 수 있다. 이 외에도 전기추진 함정은 별도의 비상 발전기를 설치하지 않으므로 함 정전(blackout)에 매우 취약한데, PTO 모드에 의해 비상전력을 공급(비상 발전기 대체)하는 등 함 내 전력계통을 안정화시키는데 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문에서 가정된 전투함은 설계 요건 상 PTO에 의한 연비 절감 효과는 고속 항해 시에는 가능하지만, 저속 항해 시에는 가스터빈의 운전 부하율이 매우 나쁘기 때문에 PTO 운전으로 연비를 절감하는 것은 거의 불가능하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 향후 대상 함정을 다양화하여 분석해 본다면, 시스템의 구성방식이 달라지므로 연비 절감 효과가 증대되거나 특정 운용모드에서 PTO를 적용하여 함 내 전력계통의 제어 및 운용에도 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20158530050160)

References

[1] R. O'Rourke, *Electric-Drive Propulsion for US Navy Ships: Background and Issues for Congress*, Congressional Research Service, 2000.

- [2] "The latest photograph of Daegu-class frigate(FFG-818)," <https://milidom.net/photo/949362>, accessed Jan. 23, 2019.
- [3] G. Sulligoi, S. Castellan, M. Aizza, D. Bosisch, L. Piva, and G. Lipardi, "Active front-end for shaft power generation and voltage control in fremm frigates integrated power system: Modelling and validation," In *Proceedings of the 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 452-457, 2012.
- [4] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hop-man, "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: a review of developments," *Applied Energy*, Vol. 194, pp. 30-54, 2017.
- [5] O. J. Simmonds, "Advanced hybrid systems and new integration challenges," in *Proc. international naval engineering conference*, 2016.
- [6] Technical report, *AGX-II power & propulsion feasibility study*, Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, 2009.
- [7] A. L. Gattozzi, J. D. Herbst, R. E. Henber, J. A. Blau, K. R. Cohn, W. B. Colson, J. E. Sylvester, and M. A. Woehrman, "Power system and energy storage models for laser integration on naval platforms," in *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2015.



김소연(金素蓮)

1980년 3월 7일생. 2003년 해군사관학교 전기공학과 졸업. 2007년 서울대 전기공학부 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2014년~현재 해군사관학교 전기전자공학과 교수(해군소령).