

1. 서론

선박에서 배출되는 오염물질을 관리하기 위해 국제해사기구(IMO)는 해양오염방지협약을 통해 대기오염을 규제하고 있고, 조선·해운업계는 이에 대응하기 위하여 디젤연료 대신 LNG, LPG 등의 친환경 연료를 사용하거나 배출가스 저감장치 적용을 고려하고 있다.

환경문제를 해결하는 보다 근본적인 방안은 추진시스템의 효율을 획기적으로 개선시켜 연료소모량을 줄이거나 친환경 고효율 솔루션을 적극 채택함으로써 오염물질 배출을 최소화하는 것이 효과적이다. 이와 같은 관점에서 최근에 기계식 추진이 아닌 전동기로 추진하는 전기추진방식을 채택한 선박이 노르웨이와 핀란드 등 북유럽 국가를 중심으로 활발히 시도되고 있고, 최근 3~4년 전부터는 연안선 중심으로 친환경 전기추진선박의 운항을 개시하였다.

국내에서도 차세대 친환경선박에 대한 관심이 증대되고 있고, 전기추진선박 또는 수소연료전지 추진선박 등 다양한 시도와 연구들이 진행되고 있다.

합정분야에서는 상업용 선박보다 앞서서 전기추진방식이 도입되었으며, 이는 배출가스 저감의 목적보다는 소음저감을 통한 피탐능력 향상과 우수한 제어성능에 의한 속응성 향상을 통해 합정으로서의 능력을 극대화시키기 위한 목적으로 추진되고 있다. 대한민국 해군에서도 일부 합정에 하이브리드 추진방식이 도입되어 있고, 점점 확대 적용될 것으로 보인다.

본 논문에서는 국내외 선박의 전기추진기술과 합정분야의 적용현황을 살펴보고, 수소연료전지선박의 적용을 위해 검토해야 할 기술 및 장비에 대해 간략하게 정리한다.

2. 선박 전기추진기술의 현황

2.1 해외 선박의 전기추진기술 현황

전 세계적으로 배터리가 선박의 주/보조전원으로 사용되는 전기추진선박은 약 60척 이상, 연료전지가 선박의 주/보조전원으로 사용되는 전기추진선박은 약 23척 이상으로 파악되고 있다.

하이브리드 선박의 경우 디젤발전기 또는 이중연료 발전기와 배터리 또는 연료전지를 결합하여 보조전원으로 사용하는 구성이 대부분이다. 순수하게 배터리에 저장된 전력만으로 추진하는 전기추진선박은 대부분 수 심분 정도의 짧은 시간동안만 운항하는 연근해 지역에 적용되고 있고, 육상전력설비(AMP)를 이용하여 수시로 충전하면서 운항하고 있다. 탑재되는 배터리의 용량은 초기에는 kWh 단위였으나 최근에는 배터리 기술의 발전에 따라 MWh 단위의 용량으로 비중이 점점 확대되고 있다.

연료전지를 주/보조 전원으로 사용하는 전기추진선박에서 연료전지의 역할은 아직 크지 않은 편이며, 용량은 kW급 정도로서 보조전원 또는 비상전원으로 적용되는 것이 일반적이다. 미국은 2019년 안에 세계 최초로 수소연료전지선박을 상용화할 예정이다. 승객 84명을 태우고 22노트로 운항할 수 있는데, 물에서 직접 수소를 만드는 수전해기술을 탑재하는 방식도 추진 중이다.

표 1 해외 전기추진선박 종류 및 제원

국가	선종	선박명	제원	운항 개시	특징
노르웨이	차도선	MF Ampere Ferry	2×450kW 1.04MWh	2015년	All Electric
노르웨이	관광 여객선	Future of the Fjords	2×450kW 2.4MWh	2018년	ALL Electric
노르웨이	관광 여객선	Vision of the Fjords	2×D/E+ 2×150kW	2016년	Hybrid Electric
노르웨이	물자 수송선	Viking Lady	LNG/DE+ 320kW(FC)	2009년	Hybrid Electric
핀란드	차도선	Elektra	3 D/E + 1.0MWh	2017년	Hybrid Electric
독일	여객선	Alsterwasser	PEM 48kW + Pb Batt, PM 100kW	2008년	Fuel cell Electric
캐나다	차도선	Peter Fraser	4 DE + Battery	2013년	Hybrid Electric
미국	여객선	Spirit of the Sound	2×104kW	2015년	Hybrid Electric
미국	여객선	Water-Go-Round	2×300kW 100kWh	2019년	Fuel cell Electric



그림 1(a) 노르웨이 MF Ampere
(2015년 운항, All Electric, 1MWh LiB)



그림 1(b) 노르웨이 Future of the Fjords
(2018년 운항, All Electric, 2.4MWh ESS)



그림 1(c) 핀란드 Elektra
(2017년 운항, Hybrid Electric, 1MWh LiB)



그림 1(d) 독일 FCS ALSTERWASSER
(2008년, Fuel cell Electric, 2 PEM 48kW + Pb)

2.2 국내 선박의 전기추진기술

연안선박인 차도선, 여객선, 관광선 등에 전기추진선박을 적용하여 운항하고 있는 유럽국가 들과는 달리 국내의 경우 특수목적선을 중심으로 하이브리드 전기추진방식을 적용하고 있고, 일반상선용으로는 R&D사업으로만 진행되어 실증사례가 없는 등 외국에 비해 많이 열악한 실정이다. 그러나 최근에 연안선박은 물론 내수면 관광용 친환경선박 건조에 대한 관심과 지원이 점차 증가하고 있어서 국내에서도 순수 전기추진선박을 포함한 다양한 친환경선박이 조만간 운행될 수 있을 것으로 기대된다.

수소연료전지차에서는 국내 기술이 앞서고 있지만, 수소선박은 선진국 보다 약 10년 정도 기술 수준이 뒤쳐져 있다고 보고되고 있으며 정부는 2030년까지 수소 선박을 상용화한다는 로드맵을 최근 발표했다.

국내 최초의 중형급 쇄빙연구선인 아라온호는 3.4MW 발전기 4대와 ABB사의 Azimuth 추진기(2×5MW)를 기본 구성으로 채택하고 있고, 에코누리호는 아시아 최초 친환경 LNG연료추진선이며, 터빈추진과 전기추진이 가능한 하이브리드 선박으로서 STADT사의 추진기(2×700kW)를 채택하고 있다.

금하네이벌텍이 연구용으로 건조한 50인승 유람선인 Gold Green Hygen은 연료전지(PEMFC, 50kW)와 배터리 조합의 Hybrid방식으로 설계하여 산업자원부 과제로 개발한 전기추진선이지만, 현재 운항되고 있지 않다.

표 2 국내 전기추진선박 종류 및 제원

선사	선종	선박명	제원	운항 개시	특징
한국해양연구원	해양 연구선	아라온호 (한진중공업)	7507톤 2x5MW	2009년	Hybrid Electric
인천항만	항만 안내선	에코누리 (삼성중공업)	260톤 2x700kW	2013년	Hybrid Electric
부경대	해양 탐사선	나라호 (한진중공업)	1500톤	2015년	Hybrid Electric
금하네이벌텍	유람선	Gold Green HYGEN (연구용)	FC 50kW Water Jet	2015년	Fuelcell + Pb
한국해양과학기술원	해양과학 조사선	이사부호 (STX조선)	5900톤 PM 2x2.5MW	2016년	Hybrid Electric



그림 2(a) 에코누리호(인천항만)
(2013년 운항, Hybrid Electric, 디젤/LNG 전기추진)



그림 2(b) 이사부호(한국해양과학기술원)
(2016년 운항, Hybrid Electric, PM 2X2.5MW)

2.3 해외 함정의 전기추진기술

1990년대 후반부터 영국, 미국 해군은 신형 함정에 전기추진(Combine Diesel-electric or Integrated Full Electric Propulsion) 방식을 도입하고 있고, 호위함, 지원함에 이어 구축함 전투함에도 순 전기추진 방식을 채택하는 등 함정분야에서의 전기추진방식 도입은 점점 증가되고 있다. 이는 최근에 개발되는 무기체계들이 전자화되고 있고, 대용량 전력을 요구하는 등 함정 전체의 소요전력이 증대되는 경향과도 무관하지 않으며, 이러한 추세는 향후 더욱 가속화 될 것으로 추정된다.

하이브리드방식 또는 순 전기추진방식에서 엔진은 여러 개로 용량을 분리 구성함으로써 고효율 운전이 가능하도록 구성하고 있으며, 그림 3은 추진방식별 추진체계 구성 예를 보여주고 있다.

2.4 국내 함정의 전기추진기술

함정의 정속성 측면에서 우리나라에도 전기추진기술을 적용한 함정이 최근에 운항을 시작한 사례가 있고, 건조 중인

표 3 해외 전기추진함정의 종류 및 제원

구분	선박명 (운항 개시연도)	톤수 속도	추진방식	엔진구성	추진기
호위함	RN(영국) Type-23 (2002)	4,900톤 28노트	CODLOG	2GT 23.3MW 4DE 1.5MW	2PM 2.98MW
호위함	Fr./Italy FREMM (2002)	6,000톤 27노트	CODLAG	2GT 32MW 4DE 2.1MW	2 Azimuth motors 2.5MW
호위함	German Type-125 (2016)	7,200톤 27노트	CODLAG	2GT 20MW 4DE 2.9MW	2 Azimuth motors 4.7MW
지원함	네덜란드 LHD (2007)	16,800톤 19노트	CODLAG	4DE 14.6MW	2PM 12MW
지원함	USS(미국) Wash (2009)	41,649톤 25노트	CODLAG	6DE 4MW	2PM 3.68MW
지원함	호주 Canberra (2014)	27,851톤 20노트	CODLAG	1GT 17.4MW 2DE 7.2MW	2 Azimuth motors 11MW
전투함	RN(영국) Type-45 (2009)	8,100톤 29노트	IFEP	2GT 21.5MW 2DE 2MW	2PM 20MW 4,160Vac
전투함	USS(미국) DDG-1000 (2015)	14,798톤 30노트	IFEP	2GT 36MW 2DE 3MW	2PM 34.6MW 4,160Vac
전투함	RN(영국) Queen Elizabeth (2020)	65,600톤 25노트	IFEP	2GT 36MW 2DE 9MW 2DE 11MW	4 Azimuth motors 20MW 11,000Vac

* CODLOG (COmbined Diesel-eLEctric Or Gas turbine)
* CODLAG (COmbined Diesel-eLEctric And Gas turbine)
* IFEP (IntEgrated Full Electric Propulsion)

함정도 있는 것으로 알려지고 있다. 특히 수중함의 경우에는 수중에서 운항하기 때문에 순 전기추진방식을 적용하고 있고, 군수분야에서 축적된 전기추진기술을 선박의 전기추진방식에 활용 가능할 것으로 추정된다.

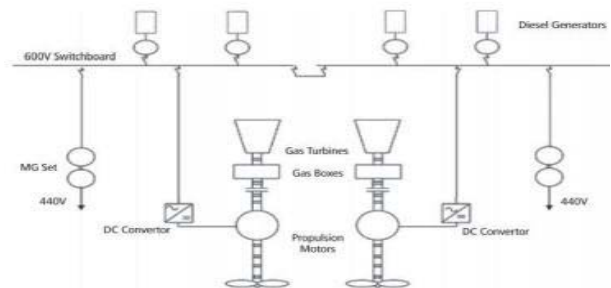


그림 3(a) Type-23의 추진체계 구성(CODLOG)

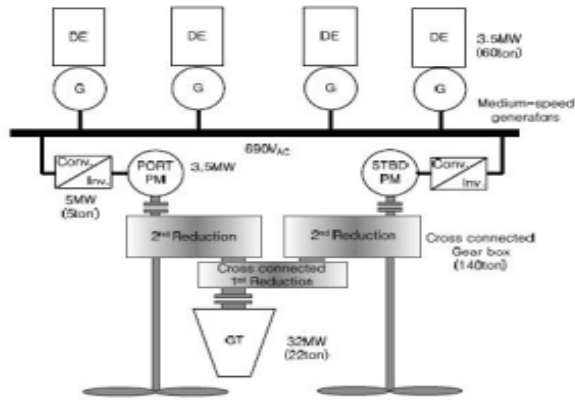


그림 3(b) CODLAG 시스템의 추진체계 구성 예

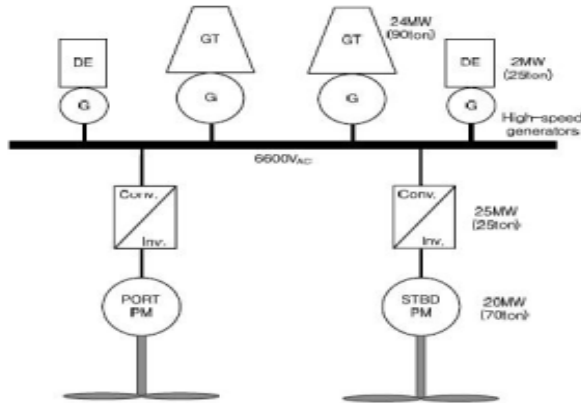


그림 3(c) Type-45의 추진체계 구성 (IFEP)

표 4 국내 전기추진함정의 종류 및 제원

구분	선박명 (운항 개시연도)	톤수 속도	추진방식	엔진구성	추진기
호위함	OO함 (2018)	2,800톤 30노트	CODLOG	1GT 30MW 4DE 1.4MW	2PM 0.0MW
지원함	OO함 AOE (2018)	10,000톤 24노트	CODLAD	4DE 0.0MW	2PM 0.0MW
수중함	OOO-Ⅰ (1993)	1,200톤	IFEP	4DE 1.7MW	1PM 0.0MW
수중함	OOO-Ⅱ (2007)	1,800톤	IFEP	2DE 3.1MW 2FC 0.0MW	1PM 0.0MW
수중함	OOO-Ⅲ (2020)	3,000톤	IFEP	3DE 0.0MW 2FC 0.0MW	1PM 0.0MW

* 출처 : 나무위키, 위키백과 등 인터넷검색

3. 수소연료전지선박의 전기추진을 위한 핵심기술

수소연료전지선박의 전기추진을 위한 핵심기술로는 추진전 동기를 포함한 추진시스템, 원활한 전력 공급을 위한 선박 배 전시스템, 전력공급시스템의 응답성, 확장성 등을 보완해 주는 에너지저장시스템, 이들 추진시스템의 설계 및 검증하는 기술을 들 수 있다.

3.1 추진전동기 및 드라이브 기술

전기추진선박의 추진시스템은 발전기와 배전장비를 제외한 가변속 드라이브와 추진전동기로 구분하여 정의하고, 이들은 시스템으로 통합되어 관리 및 제어되고 있다.

전기추진선박은 발전기에 의해서 전기를 공급하고 가변속 드라이브(VFD: Variable Frequency Drive)를 통하여 추진전 동기를 구동하는 형태로 시스템이 구성되어 있다.

가변속 드라이브에 의해 구동되는 추진전동기는 주로 제한 된 사이즈와 소음 규제를 충족시키기 위해 유도전동기를 채택 하고 있다. 유도전동기는 효율이 정격 출력에서 95.7 %에 달 하고(그림4), 슬립은 정격 상태에서 최소 1.23 %로서 구조가 간단하고, 회전자 절연이 필요 없고, 손실이 적으며 유지보 수 비용이 작은 장점이 있다.

영구자석형 추진전동기는 연료 절약 및 효율을 증가시키기 위해 추진전동기의 크기와 무게를 줄이는 것이 중요한 고려사 항으로 되면서 채택되고 있다. 영구자석형 추진전동기의 경우 동기와 유도기에 비해서 50%까지 전동기의 출력밀도를 높 일 수 있는 장점이 있다.

그림 5에서 36.5MW의 영구자석형 전동기는 18MW 유도전 동기와 거의 크기가 유사함을 알 수 있다.

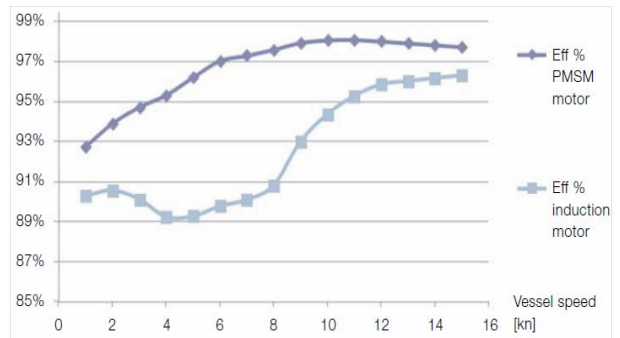


그림 4 영구자석 전동기와 유도전동기의 효율 비교



그림 5 미국 DRS사의 36.5MW급 영구자석형 전동기와 18MW급 유도전동기

국내 추진전동기 기술은 현대중공업에서 유도전동기를 기술제휴 혹은 변형설계 방식으로 15MW급 전동기까지 생산한 경험이 있다. 동기전동기는 독자 설계보다는 기술제휴에 의한 개발 실적과 주문사양의 변경에 따른 MVA급 제품은 변형설계, 생산 실적이 있다. 효성중공업은 수중함용 영구자석형 추진전동기를 독자 개발하여 납품한 실적이 있으며, 수상함용 추진전동기도 기술제휴에 의해 수 MW급까지 생산한 경험이 있다.

추진전동기 제어용 고전압 드라이브의 경우 현대중공업, LS산전이 Cascaded H-bridge 방식의 멀티레벨 인버터를 3.3kV, 6.6kV 전압 레벨로 판매하고 있으나, 전기추진선박에서 주로 적용되고 있는 NPC(Neutral Point Clamped) 멀티레벨 드라이브에 대해서는 개발경험이 없고, 서호전기에서 고전압용 NPC 멀티레벨 드라이브를 개발하였으나, 선진사에 비해 기술적 경쟁력이 미흡한 실정이다.

그러나 일반 상선용 추진시스템은 주로 ABB, Siemens, GE 등 해외업체에서 패키지로 납품하기 때문에 국내 업체의 적용 사례를 확보하기 어려운 실정이다.

표 6 대용량 고압드라이브 방식 및 국내외 기업

고압 Driver	Neutral Point Clamped 방식	Cascaded H-bridge 방식
국내 기업	서호전기 LS산전(개발 중)	현대일렉트릭, LS산전
해외 기업	GE(영국), ABB(스위스), SIEMENS(독일)	-

표 5 대용량 고압드라이브 방식 및 응용분야

Application Field	고압 드라이브 방식	
	Neutral Point Clamped 방식	Cascaded H-bridge 방식
Cement, Mining and Minerals : Grinding mill, conveyor, fan and pump	◎	◎
Chemical, Oil and Gas : Compressors, extruders and pump	◎	◎
Marine : Propulsion	◎	△
Pulp and Paper : Fan and pump	◎	◎
Power Generation : Gas turbine starter, ID&FD fan and pump	◎	◎
Water Applications : Pump	◎	◎
Other Applications : Test stands and wind tunnel	◎	△

◎ : 사용 가능, △ : 제한적으로 사용가능

3.2 선박 배전시스템

최근, 해외 선진사를 중심으로 선박의 고연비를 실현하는 혁신적인 기술인 DC 배전을 전기추진에 적용한 DC전기추진선 사례가 소개되고 있다.

DC 전기추진은 발전기와 함께 ESS와 연료전지 등의 분산 전원을 연계하기 매우 용이하므로 하이브리드 복합 발전에 가장 적합한 시스템으로 볼 수 있다. 선박 전력 네트워크를 DC 기반으로 운용할 경우, AC 발전기와 DC 계통은 AC/DC 컨버터로 연계되므로 발전기의 주파수를 변동시켜 운전할 수 있으며, 정격 속도로 고정하여 운전할 필요가 없이 엔진의 연비 특성 사양을 기준으로 최적 운전점에서 동작시키는 것이 가능하므로 낮은 부하율에서 엔진의 속도를 낮추는 엔진 가변속 운전으로 추진 효율을 향상하여 연료 소비 및 배기량을 감소시킬 수 있다. 또한 선박에 DC 배전을 적용할 경우, 발전기 동기화가 필요하지 않아 10초 이내에 발전기 투입이 가능하며 ESS 연계 시 엔진 Ramp 제약을 완화시켜 전체 시스템의 동적 응답특성을 향상시킬 수 있다.

ABB와 SIEMENS는 자사 DC Grid 솔루션 브랜드를 출시하여 기술개발과 사업화를 활발하게 진행하고 있다. ABB는 '12년 10MW급 5,000톤 규모의 PSV(Platform Supply Vessel, 해양작업지원선) Dina Star에 자사 Onboard DC Grid 솔루션 적용을 시작으로 총 13척의 DC 전기추진선을 건조했으며, SIEMENS도 BlueDrive PlusC 솔루션을 적용한 DC 전기추진선 실적을 20척 이상 보유하고 있다.

국내에서는 선박 DC배전을 위한 일부 연구가 진행된 단계이고, 수중함의 배전계통에 대한 설계 경험과 건물 배전에 대한 연구실적을 바탕으로 선박 DC배전에 대한 설계 및 전력변환장치 개발이 병행될 필요가 있다.

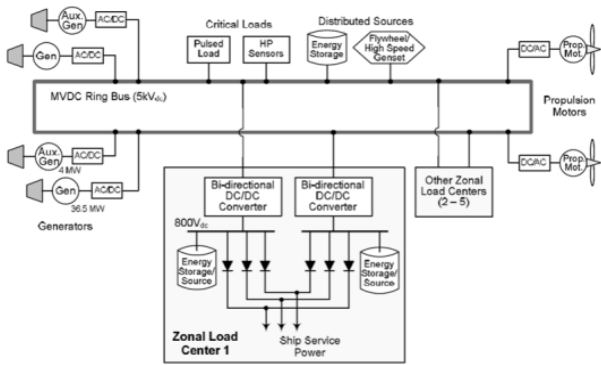


그림 6 미국 해군의 선박용 DC Grid System 개념

3.3 선박용 에너지저장시스템 (ESS)

연료전지는 연소반응이 아닌 화학반응에 의해 전기를 발생시키기 때문에 부하가 급변할 경우 연료전지의 발전량이 추종하는데 한계가 있기 때문에 일반적으로 ESS(Energy Storage System, 에너지저장시스템)와 함께 운전하는 것이 일반적이다. 그림 7은 추진전동기의 속도 변경시점에 연료전지가 공급하지 못하는 전력을 ESS에서 공급하고 있는 응답 특성을 보여주고 있다.

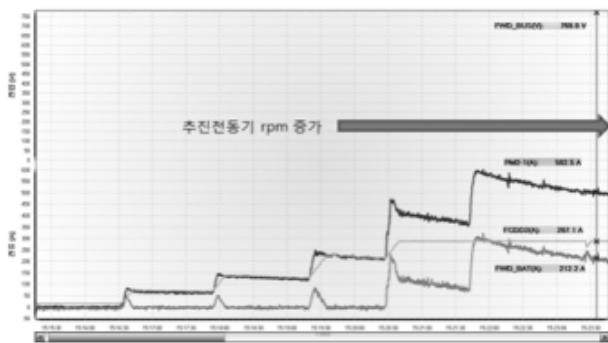


그림 7 연료전지와 ESS의 출력특성 예

이와 같이 전력의 순시변동에 따른 대응은 물론 긴급 정지시의 회생에너지 저장으로 인한 전압상승 억제 등과 같은 계통 안정도 측면에서도 연료전지와 ESS는 반드시 함께 운영되어야 한다. 다만 연료전지시스템의 규모에 따른 ESS의 적정

규모에 대해서는 설계, 해석 및 시뮬레이션을 통해 연구 및 실험이 필요하다.

선박용 에너지저장장치는 최근 들어 에너지밀도가 높은 리튬이온전지를 많이 채택하고 있다. 리튬전지 셀은 국산제품이 세계 최고수준으로 성능이 우수하나 최근의 ESS 화재사건 등으로 볼 때 패키징 기술은 아직 성숙되지 않은 것으로 보고되고 있다. 현재 개발이 진행 중인 수중함의 리튬전지 탑재 연구를 예의 주시하여 반영할 필요가 있다.

DNV GL은 선박용 리튬이온전지에 대한 시험평가를 위하여 현재 Joint Development Project(JDP)를 수행하고 있다. 2017년 12월에 시작하여 2년간 수행될 예정이며 배터리 안전성 테스트 프로그램을 만들 예정이다.

3.4 전기추진시스템 설계 및 검증기술

수소연료전지를 기반으로 하는 전기추진선박의 추진시스템에 대한 설계 및 제작 경험이 없는 상태에서 설계기술을 확보하는 것은 어려운 일이다. 이를 위해서는 다양한 기술적인 검토와 시뮬레이션을 통해 설계기술을 축적하고, HILS 또는 실규모설비를 이용한 검증이 필요하다.

다행히 국내 해군 함정분야에서 하이브리드 선박 또는 순전기추진선박에 대한 설계기술이 일부 축적되어 있고, 전기선박 육상시험설비(LBTS)를 통해 확보된 검증기술이 있으므로 함정분야의 축적된 기술을 충분히 활용하여 전기추진시스템을 설계 및 검증하는 것이 필요하다.

5. 결론

최근 정부에서 수소경제 활성화 로드맵을 발표하였으며 운송 분야에서 수소연료전지자동차와 수소연료전지선박에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 관심이 실질적인 지원으로 이어지고, 기술적인 결실을 통해 조선산업의 재도약과 친환경 미래선박으로 수소연료전지선박이 자리매김하는 계기가 되었으면 한다.

본 논문에서는 민간부문보다 함정분야에서 앞서 적용되고 있는 전기추진기술에 대해 개략적으로 검토하고, 수소연료전지선박에의 적용을 위한 핵심기술들을 열거하였다. 연료전지의 개발과 함께 추진시스템에 대한 설계, 해석 및 핵심장치개발 등의 국산화 과제도 병행해서 추진하는 것이 바람직하다.

추진전동기 및 드라이브는 국산화가 반드시 필요한 전기추진선박의 핵심장치로서 수입제품을 적용할 경우 우리나라가 기술적으로 종속되어 미래 친환경 조선산업의 발전에 제약이

될 수 있다. 선박 배전시스템으로는 DC 배전방식을 도입하여 선박의 에너지 절감 및 연비를 향상시키고, 전력변환장치 관련 산업이 활성화되도록 지원할 필요가 있다. 전력공급시스템의 안정성, 확장성, 속응성 및 다양성 등을 위해 에너지저장시스템을 적극적으로 적용할 필요가 있다.

또한 HILS 또는 추진체계 LBTS 등을 이용하여 수소연료전지선박의 통합연동성능을 검증하는 과정을 통해 국내 설계기술을 향상시키고, 개별 장비개발 업체들이 기술력을 향상 및 축적할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

참고 문헌

- 산업통상자원부 [수소경제 활성화 로드맵] (2019.01)
 N. Frank [Improved safety of lithium-ion batteries through smarter sensing] Electric & Hybrid Marine World Expo (2018.06)
 천강우 [전기추진선박의 개념 및 기술현황 소개, 한국선급] (2018.02)
 김수남, 박영호 [DC 전기추진선 기술동향, 전기의 세계] (2018.06)
 이대한 [함정 전기추진체계 기술, 방사청] (2017)



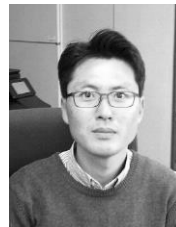
손 흥 관

- 1962년생
- 2004년 충남대학교 전기공학과 박사졸업
- 현 재 : 한국전기연구원 시스템제어연구센터장
- 관심분야 : 전기추진선박 전력시스템 설계
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : hksohn@keri.re.kr



최 재 학

- 1973년생
- 2005년 한양대학교 전기공학과 박사졸업
- 현 재 : 한국전기연구원 책임연구원
- 관심분야 : 전기선박용 추진전동기 및 드라이브
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : choijaehak@keri.re.kr



이 현 구

- 1971년생
- 2008년 부산대학교 전기공학과 박사수료
- 현 재 : 한국전기연구원 책임연구원
- 관심분야 : 전기선박 추진시스템 해석
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : leehg@keri.re.kr