

함정용 추진전동기 적용형태 및 개발동향에 대한 연구

최청석
국방기술진흥연구소

A Study on the Application Forms and Development Trends of Propulsion Motors for Ships

Chung Seok Choi
Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement

요약 군 함정의 추진 시스템은 군사 작전과 해양 안전에 핵심적인 역할을 하는 중요한 구성 요소다. 최근 수십 년간 이러한 추진 시스템은 기계식에서 전기식으로의 전환 중에 있다. 이로써 군 함정의 성능과 효율성을 향상시키는 데 큰 기회가 열렸으며, 그 결과로 더 나은 군사 작전 능력을 제공한다. 전기식 추진 시스템은 디젤 엔진과 기계식 감속장치를 대체하고, 전동기와 발전기, 전력 전자 장치를 중심으로 하는 시스템이다. 이러한 시스템은 높은 효율성, 운용 유연성, 유지보수 용이성, 환경 친화성 등 다양한 이점을 제공하며, 군 함정의 성능을 향상시키는 주요 요소로 인식되고 있다. 국내외에서는 전기식 추진 시스템을 통한 함정의 현대화가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 추진 시스템의 발전은 군 함정의 작전운용성능을 획기적으로 높이고 있다. 이 논문은 이러한 추진 시스템 종류 및 개발 현황을 다루며, 향후 군 함정 적용을 위한 방안제시를 목표로 한다.

Abstract The propulsion system of a military ship is a critical component that plays a crucial role in military operations and maritime safety. In recent decades, these propulsion systems have been transitioning from mechanical to electric, presenting significant opportunities to enhance the performance and efficiency of military vessels, resulting in better military operational capabilities. Electric propulsion systems replace diesel engines and mechanical reduction gears and are systems centered on electric motors, generators, and power electronics. These systems offer numerous advantages, including high efficiency, operational flexibility, ease of maintenance, and environmental friendliness, and are recognized as a critical factor in improving the performance of military ships. The modernization of ships using electric propulsion systems is progressing domestically and internationally, significantly enhancing the operational performance of military vessels. This paper covers the types and development status of these propulsion systems and aims to present a plan for future application to military ships.

Keywords : Weapon System, Naval Ship, Electronic Propulsion Motor, Localization, Trend Analysis

1. 서론

함정의 전기추진용 전동기는 1839년에 러시아의 소형 교통선에 축전지와 직류전동기를 이용한 직류식 전기 추진이 적용됨으로서 시작되었다. 초기 교류전동기 시대

(1915~1945년경)에는 전함, 항공모함, 수만 톤급의 화객선, 유조선에 적용되었고, 유도전동기(2차 저항 제어) 방식과 권선형 동기전동기(동기발전기 가변속) 방식이 주로 사용되었다. 그 후, 기계식 감속장치 개발로 초기 교류전동기 시대를 마감하고 직류전동기 시대(1950년

*Corresponding Author : Chung Seok Choi(Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement)
email: chung365@naver.com

Received September 1, 2023

Revised October 5, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

대~1980년경)를 맞이했으며, 오늘날에는 전동기 기술 및 전력전자 기술의 발전에 의해 함정은 물론이고 일반 상선을 비롯하여 쇄빙선, 조사선, 준설선 같은 특수선에 까지 적용되기에 이르렀다[1].

전동기는 전기에너지를 이용하여 회전력을 얻는 기기로서, 함정에 적용될 수 있는 저속 고토크 전동기는 구조와 동작원리에 따라 크게 직류전동기, 유도전동기, 동기전동기, 영구자석 동기전동기, 초전도 영구자석 전동기로 구분한다. 본고는 국내의 전동기 기술자료 분석을 통하여 도출된 각 전동기의 특성, 함정 적용 형태, 개발 동향에 대하여 다룬다. 이를 통하여 향후 군 함정 적용을 위한 추진전동기 개발 방안제시를 목표로 한다.

2. 본론

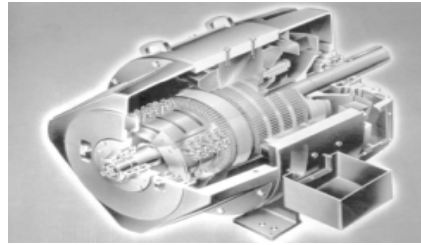
2.1 전동기 특성

2.1.1 직류전동기

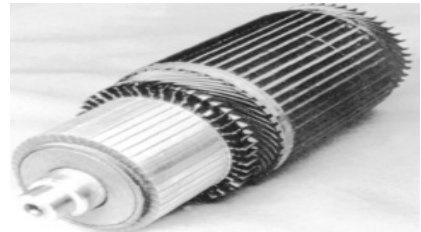
1950년대 이후 Geared Turbine 및 디젤 엔진의 대형화, 대량 생산 등으로 범용 함정에 대용량 발전 시스템이 널리 적용됨에 따라 직류전동기(DC Motor)의 우수한 제어 특성을 활용한 Ward Leonard 방식의 전기추진 방식이 쇄빙선, 준설선 같은 특수선에 주로 적용되었다. 1970년대에는 전력용 반도체인 Thyristor를 이용한 Static Leonard 방식을 적용한 전력 변환기에 의한 직류전동기 구동 시스템이 선박 추진 전동기로 적용되었으나 교류전력 변환장치의 발전으로, 유지보수 및 전력 밀도에서 뛰어난 장점을 가진 교류전동기, 특히 유도전동기로 급속히 대체되었다.

Fig. 1은 직류전동기의 구조이다. 직류전동기는 전기자 전류를 제어함으로써 손쉽게 토크 제어가 가능하다는 장점으로 순시토크 제어가 필요한 많은 산업 분야에서 사용되어 왔으나, 동작 원리상 브러시와 정류기의 마찰로 인한 아크발생으로 소음이 심하고 마찰에 의한 브러시의 마모로 인하여 정기적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있다. 또 브러시의 마모에 의해 생기는 분진으로 주변 시스템의 절연에 악영향을 일으킬 수 있으며 정류자 브러시가 필요로 하는 추가의 축방향 길이로 인해 교류전동기에 비해 토크/전력 밀도가 현저히 떨어지는 단점도 있다. 특히 영구자석 동기전동기와 비교하면 출력대비 부피와 중량이 모두 30~50% 더 크다. 따라서 직류전동기는 최근 10여 년간 건조된 함정에서는 거의 사용되지 않고 있으나 쇄빙선, 군함 등 일부 선박에는 적용되고

있는 경우도 있다[1].



(a)



(b)

Fig. 1. Structure of DC Motor
(a) DC Motor (b) Rotor

2.1.2 유도전동기

1913년경부터 1920년대에 걸쳐 유도전동기 방식의 전기추진이 주로 미 해군의 전함 및 항공모함 등에 적용되었으나 1920년대 후반 이후 효율이 좋은 동기전동기 방식에 의해 대체되었고, 그 후 기계적 감속장치 등의 개발로 사용되지 않다가 1980년대 이후 전력전자 기술의 발달로 직류기를 대체하여 사용되고 있다.



Fig. 2. Induction Motor

Fig. 2는 유도전동기(Induction Motor, 이하 IM)의 구조를 나타낸다[2]. 유도전동기는 기계적으로 견고하고 가격이 저렴하나 저속에서의 효율이 낮으며, 회전자의 열손실로 인하여 효율이 저하되고 여자를 위한 무효전력

의 필요로 입력단 역률이 떨어지는 단점이 있다. 더불어 대출력을 위하여 기기의 크기를 키울 경우 이에 비례하여 늘어나는 공극으로 인하여 더 많은 무효전력이 필요하게 되므로 역률이 더 나빠지는 문제점이 발생하여 대형기로 갈수록 동기전동기에 비해 불리하다. 선박 추진이 경우 유도전동기는 가변전압 가변주파수원, 즉 인버터로 구동한다. 이 경우에는 전원의 역률은 인버터에 의해 결정되므로 역률은 인버터의 크기에만 영향을 미친다. 특히 유도전동기를 인버터로 구동할 경우, 기동 특성을 포함한 순시토크 제어특성을 대폭 개선할 수 있어, 인버터에 의해 구동되는 유도전동기는 선박용 추진 전동기로 적합하다. 1990년대부터는 영국 GE-Converteam사에서 선박추진에 특화된 전용 유도전동기(Advanced Induction Motor, 이하 AIM)가 개발되어 함정에 적용되고 있다.

2.1.3 권선형 동기전동기

권선형 동기전동기(Wound Rotor Synchronous Motor, 이하 WRSM)는 1920년대 후반부터 1940년대의 제2차 세계대전에 걸쳐 권선형 동기전동기가 대형의 화력선, 탱커, 호위함 등의 추진 전동기로 다수 적용되었다. 이후 증기 터빈의 대형 감속치차 장치의 개발과 대출력 디젤 엔진의 발달과 함께 이 방식은 적용되지 않았으나, 1974년 가스터빈과 가변 피치 프로펠러(CPP)에 동기전동기 방식을 조합한 전기추진 프로젝트 선박 및 Roll-on/Roll-off 선박에 적용되었다.



Fig. 3. Wound rotor synchronous motor

Fig. 3의 구조를 가지는 권선형 동기전동기는 공극이 커져도 별도의 계자권선에 의해 역률 제어가 가능하기 때문에 대형으로 제작하여도 유도전동기와 달리 역률 특성이 나빠지지 않으므로 초대형 선박의 전기추진에 널리 적용되고 있으며 LCI(Load Commutated Inverter)방

식으로 가변 주파수 운전도 가능하여 대형 Cruise 선박에 적용되고 있다. 하지만, 회전자의 권선으로 인하여 회전자 손실이 크고 높은 열 발생으로 인하여 고출력으로 갈수록 냉각시스템의 중요성이 커지며, 이로 인하여 제작단가가 높아지는 단점이 있다. 또 별도의 계자권선과 관련 시스템이 차지하는 추가의 부피로 유도전동기에 비해 전력 밀도가 떨어지는 단점이 있다. 특히 LCI로 동기전동기를 구동할 경우 전동기 입력단 역율을 진상(Leading) 역율로 유지해야 하기 때문에 계자권선의 전류가 커져 손실이 커지는 단점과 함께 역율 1 운전이 불가능하다는 단점도 있다.

2.1.4 영구자석 동기전동기

Fig. 4와 같은 구조를 갖는 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 PMSM)는 로봇 및 자동화기기, 엘리베이터 및 전기/하이브리드 자동차 등의 운송 분야 전반에서 지난 30여 년간 널리 활용되고 있으며, 최근 엔진, 가스터빈을 대체하여 선박 추진시스템에 수 MW급 영구자석 동기전동기를 적용하려는 연구가 전세계적으로 진행되고 있으며 일부 함정에 영구자석 전동기가 추진 전동기로 적용된 예가 있다[3].

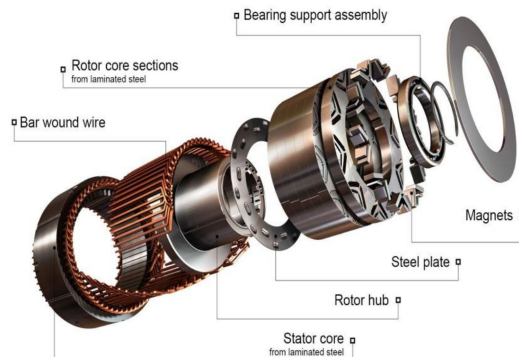


Fig. 4. Permanent magnet synchronous motor

영구자석 동기전동기는 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능하며, 다양한 구조 설계가 가능하여 여러 분야에 걸쳐 오래전부터 연구되어 사용되어 왔다. 특히 최근에는 고에너지 밀도의 영구자석 재질이 개발되고 발달함에 따라 고출력의 영구자석 동기전동기의 설계도 가능해져 수만 r/min이상의 고속 전동기뿐만 아니라 수십 ~수백 r/min에서 수 MW를 출력하는 저속/고토크 전동기의 설계도 가능해졌으며, 전동기의 출력 및 출력밀도를 획기적으로 증가시키는 방향으로 현재 연구가 진행되고 있다.

2.1.5 초전도 동기전동기

초전도 동기전동기(Super-Conductor Synchronous Motor, 이하 SCSM)는 기존의 동기전동기의 계자권선을 초전도체를 이용하여 제작함으로써 계자가 생성할 수 있는 자장을 획기적으로 크게 하여, 전동기 전체적인 효율 상승과 소형 경량화 효과를 얻을 수 있는 전동기이다. 초기에 초전도 전동기는 단극형(Homopolar) 직류전동기 위주로 개발되어왔으며, 1980년대까지는 영하 270도 부근 극저온냉각이 필요한 저온초전도 전동기가 주류를 이루어 왔다. 1990년대 액체질소 냉각이 가능한 고온 초전도체의 출현으로, 극저온 냉각이 필요 없는 실용적인 고온 초전도 코일(High Temperature Super-conductor, 이하 HTS)이 개발되어, 초전도 선재의 냉매인 고가의 헬륨이 질소나 다른 저가의 냉매로 대체되면서 HTS 전동기의 실용화가 가속화되고 있다. 초전도 전동기의 크기, 그리고 구성 및 내부 상세구조는 각각 Fig. 5 및 Fig. 6 과 같다[4].



Fig. 5. Size of traditional motor and HTS motor

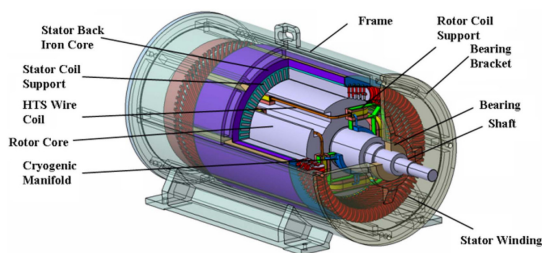


Fig. 6. HTS motor structure

HTS 전동기는 Rockwell Automation과 EPRI에 의해 1994년에 94kW, 1996년에 150kW급이 개발되었으며, 이후 온도 27K급 750kW 개발에 이어, 1999년에 30K급 3.75MW급 개발이 완료되었는데(적용선재 : AMSC사의 BSCCO-2223 Tape), 당시 일반적인 유도 전동기에 비해 효율이 2% 정도 개선되었다(98%). 2001년에는 AMSC에 의해 3.75MW급의 HTS 전동기가 개발되면서 동급의 유도전동기에 비해 무게와 부피가 50% 정도 절감되는 효과를 얻었다. 2003년에는 AMSC사가 개발한 5MW급 HTS 모터가 미국해군 함정에 실험적으로 적용되었다. 아울러, 미 해군연구소(ONR)에서도 2006년 36.5 MW급 HTS 전동기를 개발하여 모터의 무게를 기존 유도 전동기(200톤)에 비해 1/3, 사이즈는 1/2로 저감하였다. 미 해군에서는 2010년 개발목표로 차세대 전함 DDG-1000에 36.5MW급을 적용할 계획을 수립하여 진행하였으나 최종적으로 채택되지는 않았다.

국내에서의 초전도 전동기의 연구는 1988년 기초전력연구원의 “20kVA 초전도 교류발전기의 개발에 관한 연구”를 시작으로 국책 연구과제로 원천 기술개발 연구 수준으로 진행되었다. 2001년에는 21C 프린터 사업으로 100kW급 전동기 개발을 시작하였으며, 2010년 두산중공업에서 Fig. 7과 같이 5MW HTS 전동기를 개발하였다.



Fig. 7. 5MW HTS motor

일반적으로 초전도 전동기의 적용 시 가장 큰 장점은 에너지의 효율적 변환(고효율화) 및 공간의 효율적 배치(크기 및 중량 저감)에 있다. 이는 고온 초전도선재 기술 개발, 냉각효율 개선 등으로 가능해졌으며, 가변부하에 대한 고효율운전이 가능하고, 선박 내부에 설치가 손쉬워져 모듈화된 선박 건조 및 외부 Pod형에도 설치가 용이한 장점이 있다. 특히, 입력전류밀도의 획기적 증대(100A/mm²)가 가능하여 더 큰 계자 자속을 인가할 수

있어 큰 토크 밀도를 얻을 수 있다. 따라서 동일한 토크에서는 전동기 크기를 저감할 수 있다는 장점을 지니게 된다. 그러나 일반적으로 초전도 전동기는 초전도 코일이 매우 고가이면서, 냉각을 위해 별도의 큰 냉각장치가 필요하여 전체 시스템적으로 가격 증대가 발생하며, 무엇보다 타종의 전동기에 비해서 기술적인 성숙도가 가장 떨어진다는 단점을 지닌다. 즉, 초전도 전동기를 합정에 적용하려면, 유지보수에 대한 전문성 보장, 고장 발생(냉매 누출, 공압 하락) 대처, 내진성 및 견고성, 고신뢰성 등의 방안도 함께 고려되어야 하는데 현재로서는 적용실적이 미미하고 이러한 방안들이 쉽게 마련되기 어려운 실정이다.

이러한 추진전동기 중 직류전동기의 경우, 제어가 간편하고 제어장치가 간단하다는 장점을 갖지만, 효율과 신뢰성이 낮고, 유지보수와 대형화가 어렵다는 단점을 갖는다. 유도전동기는 견고하고, 신뢰성이 높고, 유지보수가 용이하다는 장점이 있지만, 제어가 어렵고, 역률이 낮기 때문에 효율이 상대적으로 낮다는 단점을 갖는다. 권선형 동기전동기는 대형화에 유리하지만, 별도의 계자 권선에 의한 여자기(Exciter)를 가져야 하기 때문에 상대적으로 복잡하다는 단점을 갖는다. 또한 영구자석 전동기는 효율이 타 전동기에 비해 좋다는 장점이 있지만, 영구자석의 감자(Demagnetization) 대책과 합정에 적용된 예가 그렇게 많지 않아 신뢰성을 검증할 만큼 충분한 운전 실적이 부족하다는 문제점이 있다. 초전도 전동기는 효율, 대형화에 유리한 장점을 가지지만 별도의 냉각기가 필요하고 내부 및 외부의 고장으로 인하여 초전도 현상이 유지되지 못하는 경우에 대한 고려 등 기술적으로 해결해야 할 문제들이 있어 현재 바로 추진전동기로 적용하기에는 무리가 있다.

2.1.6 소결론

본 연구를 통해 다양한 전동기 유형의 특성을 비교하고 각각의 장단점을 확인했다. 합정 설계에 있어 적합한 전동기의 선택은 효율성, 신뢰성 및 성능에 큰 영향을 준다고 할 수 있다.

합정용 추진전동기의 성능과 기술은 시간이 흐름에 따라 상당한 발전을 이루었다. 이러한 발전은 다음과 같은 요소에 의해 가능할 수 있었다.

첫째, 설계 기술의 발전은 현대 추진전동기가 높은 효율을 가질 수 있게 했다. 이로써 합정은 연료 효율을 향상시키고 운영 비용을 절감할 수 있게 되었다.

둘째, 첨단소재의 발전으로 크기와 무게의 감소가 가

능해졌다. 더 가벼운 전동기는 합정의 무게를 줄이고 물리적 공간을 절약하는 데 도움이 되었다.

셋째, 신뢰성의 향상은 고급 재료와 센서 기술의 발전으로 이루어져 추진전동기의 고장률을 낮추고 유지보수를 원활하게 하였다.

넷째, 자동화 및 제어 기술의 적용은 효율적인 운영과 함께 조작 및 유지보수를 단순화하고 최적화하는 데 도움을 주었다.

마지막으로, 환경 친화성을 강조한 친환경 추진 시스템의 기술적 개선도 이루어지고 있다. 이러한 발전은 미세먼지 배출과 에너지 효율성을 개선한다.

2.2 합정에 적용가능한 추진전동기

현재 합정에 적용된 실적이 있거나 탑재가능한 수준의 기술력이 확보된 전동기로는 영구자석 동기전동기(PMSM)와 유도전동기(IM)를 들 수 있다.

일반적으로 전기추진선박의 추진시스템은 발전기와 배전장비를 제외한 가변속 구동장치와 추진전동기로 구분하여 정의하고, 이들은 시스템으로 통합되어 관리 및 제어되고 있다. 전기추진선박은 발전기에 의해서 전기를 공급하고 가변속 구동장치(Variable Frequency Drive, 이하 VFD)를 통하여 추진전동기를 구동하는 형태로 시스템이 구성되어 있다.

가변속 구동장치에 의해 구동되는 추진전동기는 주로 유도전동기가 채택되고 있다. 이는 유도전동기가 구조가 간단하고, 회전자의 절연이 필요 없고, 손실이 적으며 유지보수 비용이 작은 장점이 있기 때문이다.

영구자석형 추진전동기는 연료 절약 및 효율을 증가시키기 위해 추진전동기의 크기와 무게를 줄이는 것이 중요한 고려사항으로 되면서 채택되고 있다. 영구자석형 추진전동기의 경우 동기기와 유도기에 비해서 50%까지 전동기의 출력밀도를 높일 수 있는 장점이 있다.

영구자석 동기전동기와 유도전동기는 Fig. 8 (a)와 같이 고정자는 동일한 구조를 가지는 반면, 회전자는 각각 영구자석과 도체바(conducting bar)로 이루어져 있다는 점이 다르다. 따라서 실제 구조는 Fig. 8 (b)와 같다[5].

아래와 같이 회전자가 구리 BAR로 구성되었느냐 영구자석으로 구성되었느냐에 따라 Table 1과 같이 서로 다른 특성을 가진다. 즉, 고정자에서 형성되는 회전자계에 의해 회전자가 회전한다는 기본원리는 동일하나, PMSM의 회전자는 고정자의 회전자계속도(동기속도)와 동일하게 회전하는 반면, IM은 항상 동기속도보다 낮은 속도로 회전한다는 점과, IM은 자체 기동이 가능한 반면,

PMSM은 반드시 어떤 방법에 의해 따로 기동을 시켜주어야 한다는 큰 차이점이 있다[6].

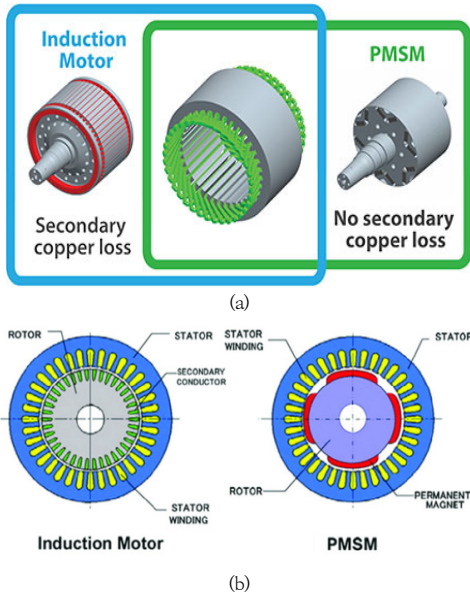
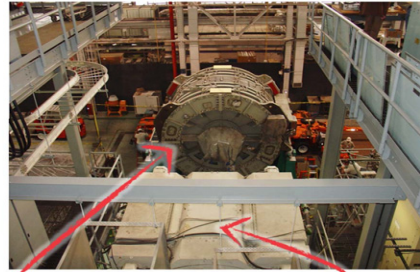


Fig. 8. Structure of IM&PMSM
(a) Same stator (b) Different rotors

Table 1. Comparison Between PMSM and IM

Factor	Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM)	Induction Motor(IM)
Method	A magnetic field is generated in the stator of the motor depending on the frequency of the power supplied to it, causing the rotor to rotate.	
Rotor Speed	- Always rotates at synchronous speed - Speed is independent of the load	- Speed decreases with an increase in load - Always less than synchronous speed
Starting	- Needs to be initially rotated at synchronous speed before synchronization with power supply	- Self-starting torque is generated, eliminating the need for a separate starting device
Drive	- Requires a separate variable speed drive device	- No need for a variable speed drive device
Efficiency	- Higher than an IM with the same output/voltage	- Lower than a PMSM with the same output/voltage
Reliability	- Mechanical retention of magnets is necessary - Low heat generation - Possibility of magnet demagnetization	- More heat generation and complex cooling in the rotor conductor
Cost	- Higher cost than an IM with the same output and rated voltage	- Lower cost than a PM with the same output and rated voltage

그러나 이러한 구조 상의 차이로 인해 가장 크게 나타나는 특징은, PMSM이 회전자에 영구자석이라는 에너지를 가지고 있기 때문에, IM에 비해 무게와 부피가 훨씬 작아지는 매우 큰 장점을 지닌다. 이것이 Fig. 9에 나타나 있다.



36.5 MW PERMANENT MAGNET (PM) MACHINE
18 MW INDUCTION MACHINE (IM)

Fig. 9. Size of IM&PMSM

Fig. 9는 2008년 미 해군의 육상시험소인 LBES(Land Based Engineering Site)에서 PMSM과 IM을 시험하는 사진으로, PMSM과 IM의 크기는 거의 비슷한 반면, 출력은 PMSM이 36.6MW, IM은 18MW로 거의 반에 지나지 않는다. 따라서 출력이 동일하다면 PMSM이 IM에 비해 훨씬 더 작음을 알 수 있다.

또한 효율 역시 PMSM이 IM보다 높는데, 이는 고정자 측 및 회전자측에서의 구리저항 때문에 발생하는 동손이 크게 줄어들기 때문이다. Fig. 10은 출력이 100kW 인 PMSM과 IM의 철손(iron loss), 동손(copper loss) 및 기타 손실의 크기를 비교하고 있다[5].

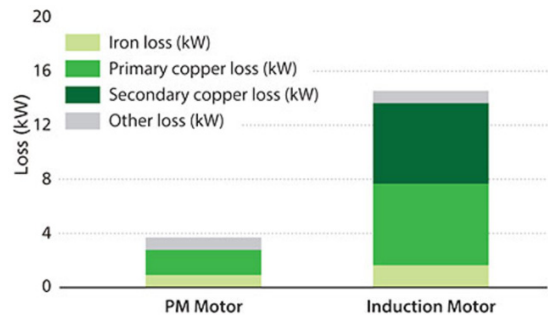


Fig. 10. loss of IM&PMSM

Fig. 11은 LBES에서 36.6MW PMSM과 18MW IM의 속력에 대한 효율특성 시험을 한 결과를 비교한 것

로서, PMSM이 전부하(Full Load)에서 2~4%, 부분부하(Partial Load)에서는 15~30% 정도 효율적임을 알 수 있다[7].

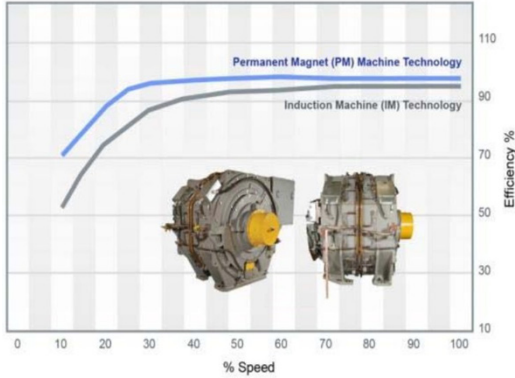


Fig. 11. Efficiency of IM&PMSM

결론적으로 미 해군 DDG-1000 사례를 기준으로 PMSM과 IM의 성능을 비교한 것이 Table 2에 주어져 있으며, IM을 기준으로 PMSM의 성능을 간략히 정리하면 다음과 같다[8].

- 토크는 25% 증가
- 폭과 높이는 유사하나, 길이는 3.5m 감소
- 무게는 IM의 73%(127/173)로 감소
- Airborne Noise는 약 60~70% 감소
- 총고조파왜곡(Total Harmonic Distortion, 이하 THD)의 경우, PMSM은 기준치 5%를 만족하나, IM의 경우 10~20%로 기준을 많이 초과함

Table 2. Performance Comparison Between PMSM and IM (Based on DDG-1000 Performance Testing Criteria)

Factor	Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM)	Induction Motor(IM)
Output (MW)	36.5	34.6
Torque Ratio	125 %	100 %
Dimensions (Length x Width x Height, m)	4.7 x 5.5 x 4.5	7.2 x 5.6 x 4.5
Weight (ton)	127	173
Air Borne Noise (dbA)	60-70	90-100
Full Load Efficiency	99.0 %	97.5 %
Cruise Mode Efficiency	96.0 %	85.0 %
Total Harmonic Distortion	lower than 5 %	10 - 20%

2.3 추진전동기 개발 사례 및 시사점

2.3.1 국내의 추진전동기 개발 사례

독일과 프랑스 등은 국가와 기업차원에서 영구자석 동기전동기 설계에 많은 연구를 하고 있다. 독일은 1.1~3.9 MW급 전동기를 개발하여 풍력발전기에 적용하였으며 2 MW급, 4 MW급 영구자석 전동기를 개발하여 잠수함과 선박 등의 추진전동기로 활용하였으며, 더 높은 출력의 전동기를 개발하기 위한 연구를 진행하여 현재 6 MW급 잠수함 추진용 영구자석 전동기를 개발하여 출시하였다(Fig. 12). 프랑스도 1~6 MW급의 영구자석 전동기를 개발하였으며, 최대 40 MW급까지 확대하여 상업적으로 활용할 계획을 가지고 있는 상태이다.

한편 전 세계의 대표적인 19~25 MW 용량의 각종 추진전동기들과, 주요스펙은 Table3과 같다[9].



(a)



(b)

Fig. 12. Siemens Motor
(a) 2MW~4MW Permasyn (b) 6MW FLEX PM

Table 3. Comparison of specifications of propulsion motors with a capacity of 19~25 MW

Factor	IM (AIM, 20MW)	PMSM (Jeumont, 20MW)	SCSM (25 MW)	DC unipolar (GA, 19MW)
efficiency%(rated speed)	97	97	97.5	-
Weight (ton)	70	65	60-70	61.2
Size (m ³)	18.5	17.2	11.3	15
technology	Maturity	Maturity	In progress	In progress

한편, 우리 해군은 그동안 함정을 운용하면서, 잠수함과 호위함에 적용된 외국산의 추진전동기와 구동장치 때문에 큰 어려움을 겪은 결과, 이들에 대한 국산화가 필수적인 것으로 인식되고 있으며, 이에 따라 국내 기업들에 대한 추진전동기 국산화 요구도 거세지고 있다. 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

Table 4. Domestic and international high-output propulsion motor research and development trends

Country (Major Institutes)	Development Spec	Development Year
U.K. (GEPC)	- 20MW, 150 r/min AIM - 36MW, 150 r/min AIM - 5~20MW, 150 r/min PMSM	2004 2010
USA (AMSC, Navy Research Lab)	- 5 MW-class HTS Motor - 10 MW-class HTS Motor - 36.5 MW, 120 r/min HTS Motor (for Ship Propulsion)	1990s 2007 2006
Germany (SIEMENS)	- 1.1 MW-class PMSM(Wind Power) - 3.9 MW-class PMSM(Wind Power) - 2 MW-class Permasyn(Submarines) - 4 MW-class Permasyn(Submarines) - 6 MW-class FLEX PM(Submarines)	2000 2019
France (JEUMONT)	- 2 MW-class PMSM - 6 MW-class PMSM - 20 MW-class PMSM - 40 MW-class PMSM - 3 MW-class MAGTRONIC (FRMM Hybrid Escort Ship)	2000
South Korea (KERI, Doosan Heavy Industries, Hyosung Heavy Industries)	- 1 MW-class HTS Motor - 5 MW-class HTS Motor - 6 MW-class PMSM(Submarines)	2000 2009 2010

있으며, 수상함용 추진전동기도 기술제휴에 의해 수 MW 급까지 생산한 경험이 있다. 또한 방산체계업체인 한화에어로스페이스(Hanwha Aero-space, 이하 HAS)는 영국의 GEPC사와 기술협력을 통하여 수상함과 잠수함용 추진전동기의 국산화를 추진하고 있다. 두산중공업 역시 대형 추진전동기의 개발에 관심을 보이고 있는 것으로 알려져 있다. 지금까지 국내외에서 연구 개발된 고효율 추진전동기 사례는 Table 4와 같다[7].

2.3.2 시사점

미국, 영국 등의 군사 선진국은 함정 및 발전 등의 분야에 활용하기 위한 다양한 형태의 전동기 개발이력을 보유하고 있다. 이에 비해 한국은 기술성숙도가 낮아 해외 의존도가 높은 실정이며, 이는 장비 운용 간 애로사항 발생, 외화 유출 등으로 이어지고 있다. 향후 전동기의 활용도 증가가 예상되는 추세에 비추어 봤을 때 국산화 개발을 통하여 기술자립을 하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 다양한 종류의 추진전동기인 직류전동기, 유도전동기, 권선형 동기전동기, 영구자석 동기전동기, 초전동 동기전동기의 특성과 함정 적용형태 및 개발 동향을 조사·분석하였다. 각 전동기 유형의 동작 원리, 특성, 성능 등에 대하여 다루며 함정에 적용하기 위한 추진전동기의 조건과 전력화 사례에 대한 연구를 수행하였다. 함정 설계에 있어 적합한 전동기의 선택은 효율성, 신뢰성 및 성능에 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 이러한 장비 선택에 참고자료로 활용될 수 있다는 점이 본 연구의 의의라 할 수 있다.

본 연구는 함정의 성능 향상과 해군 작전 능력 향상을 위한 연구 및 개발에 필요한 기초자료 제공에 목적이 있다. 미래 군함의 성능과 효율을 향상시키기 위한 연구 방향을 탐구하고 새로운 가능성을 제시하기 위한 함정용 추진전동기 특성을 연구 주제로 선정하였다. 향후 연구 및 개발 과정에서 이 연구의 결과를 참고하여 함정의 성능과 효율을 더욱 향상시키는데 기여할 수 있을 바란다.

References

- [1] S. W. Kim, Design of efficient ship electric propulsion system. KOREA MARITIME SECURITY FORUM, Available From: http://komsf.or.kr/bbs/board.php?bo_table=m43&wr_id=34 (accessed June. 07, 2016)
- [2] J. Kirtley, A. Banerjee, S. Englebretson, "Motors for Ship Propulsion". IEEE, Vol.103, No.12, pp.2320-2332, Dec. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2487044>
- [3] Hazrat Ali, Muhammad Zeeshan Adil, Hasham Khan, "Digital proportional amplifier of linear DC electromagnet", International Journal of Scientific and Engineering Research, Oct. 2019.
- [4] Swarn S. Kalsi, "Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC", cec-icmc, Oct. 2019.
- [5] TOSHIBA, "Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Enhancing The Value of Cities", Available From: <https://asia.toshiba.com/railway-systems/permanent-magnet-synchronous-motor/>
- [6] Alireza Ramezani, Mohammad Ghiasi, Moslem Dehghani, Taher Niknam. "Reduction of Ripple Toothed Torque in the Internal Permanent Magnet Electric Motor by Creating Optimal Combination of Holes in the Rotor Surface Considering Harmonic Effects". IEEE, Vol.8, No.01, pp.215107-215124, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041739>
- [7] J. W. Park, S. Y. Kim, *Technical Trends in Ship Electric Propulsion Systems*, Journal of the Korean Society of Power Electronics, vol. 19, no. 3, p. 31-37, 2014.
- [8] C.G. Hodge, "The electric warship", Jan. 2001 Available From: https://www.researchgate.net/publication/242663883_The_electric_warship_VI
- [9] Naval Sea Systems Command, *Naval Power Systems Technology Development Roadmap PMS 320*, 2013.

최 청 석(Chung Seok Choi)

[정회원]



- 2017년 12월 : 인하대학교 컴퓨터 공학과 (공학학사)
- 2017년 12월 ~ 2021년 1월 : 국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

• 2022년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술원(UNIST) 인공지능 대학원 석사과정

<관심분야>

함정 무기체계, 임베디드, 인공지능