

70 kW 전기선외기 추진시스템 성능 및 안전성 평가 연구

김지윤¹ · 차명훈² · 김 민^{2,†}

¹한국조선해양기자재연구원 선임연구원

²한국조선해양기자재연구원 선임연구원 및 팀장

A Study on the Performance and Safety of a 70 kW Electric Outboard Propulsion System

Ji Yun Kim¹, Myung Hun Cha², and Min Kim^{2,†}

¹Senior Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 46754, Korea

²Senior Researcher and Team Leader, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 46754, Korea

요 약

탄소중립 정책과 환경규제 강화에 따라 친환경 선박 기술 및 기자재 개발이 확대되고 있다. 특히 전기추진 선박은 저진동·저소음 특성과 우수한 조종성능, 높은 설계 유연성으로 에너지 효율 향상에 유리하며 다양한 선종에 적용되고 있다. 그러나 전기선외기 추진시스템은 국내 기술 기반이 아직 제한적인 수준으로 국산 시스템의 성능 검증과 신뢰성 확보가 요구된다. 본 연구에서는 국내 기술로 개발된 70 kW급 전기선외기 추진시스템을 대상으로 성능 및 전기적 안전성을 평가하였다. 모터 성능시험, 온도 상승 시험, 절연 시험, 외관 검사, 침투탐상시험(PT), IP 시험을 수행하였다. 시험 결과, 모터는 안정적인 출력 특성과 열적 안정성을 보였으며, 절연 성능과 구조적 건전성 및 방수 성능이 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 따라서 전기선외기 추진시스템은 실제 운용 환경에서 요구되는 안정성과 신뢰성을 확보한 것으로 판단되며, 전기추진 시스템의 국산화 및 상용화 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대된다

Abstract – With the strengthening of carbon neutrality policies and environmental regulations, the development of eco-friendly ship technologies and related equipment is expanding. Electric propulsion systems offer advantages such as low vibration and noise, excellent maneuverability, and high design flexibility, and are increasingly being applied to various vessel types. However, the domestic technological foundation for electric outboard propulsion systems remains limited, highlighting the need for performance verification and reliability assessment of localized systems. In this study, a 70 kW-class electric outboard propulsion system developed with domestic technology was evaluated in terms of performance and electrical safety. Motor performance tests, temperature rise tests, insulation tests, visual inspections, penetrant testing (PT), and IP tests were conducted. The results showed that the motor exhibited stable output characteristics and thermal stability, and that insulation performance, structural integrity, and waterproof capability satisfied the required criteria. Therefore, the system is considered to have secured operational stability and reliability under actual operating conditions, and is expected to contribute to the localization and commercialization of electric propulsion systems for small vessels.

Keywords: Electric outboard propulsion system(전기선외기 추진시스템), Motor performance(모터 성능), Electrical safety(전기적 안전성), IP test(IP 시험), Reliability verification(신뢰성 검증), Carbon neutrality(탄소중립)

1. 서 론

최근 국제해사기구(IMO)와 유럽연합(EU)은 Fig. 1과 같이 2050년 Net-Zero 달성을 위한 국제해운 탈탄소 정책을 강화하고 있으며,

IMO의 「2023 GHG Strategy」와 EU ETS, FuelEU Maritime 등의 규제를 단계적으로 시행하고 있다(Fig. 1). 이에 따라 해운업계에서는 친환경 선박 분야의 기술 개발과 경제성 확보 노력이 시급한 상황이다(Ministry of Oceans and Fisheries[2023]).

특히 IMO는 제80차 해양환경보호위원회(MEPC 80)에서「2023 IMO GHG Strategy」를 채택하여 2050년경(Net-Zero by or around

[†]Corresponding author: jiyun06@komeri.re.kr

Addressing climate change

Over a decade of regulatory action to cut GHG emissions from shipping

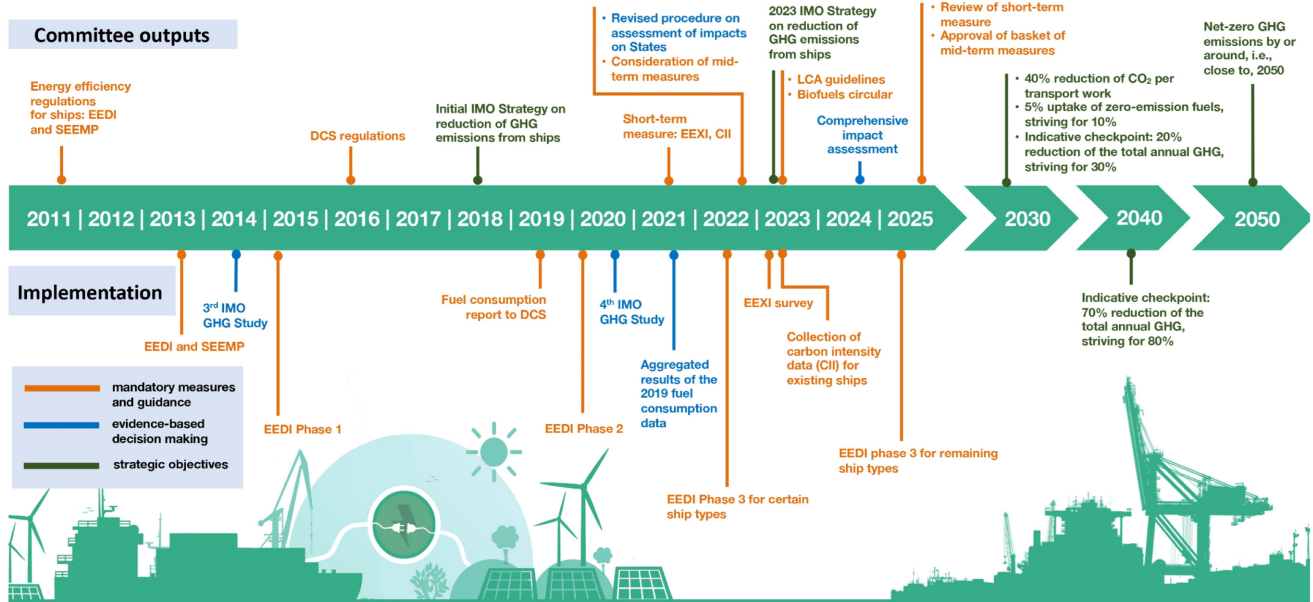


Fig. 1. IMO and EU GHG regulation roadmap for shipping.

2050) 국제해운 분야의 온실가스 순배출 제로 달성을 장기 목표로 제시하였으며, 2030년 및 2040년 중간 감축목표를 설정하는 등 국제해운 탈탄소 정책을 강화하였다. 이와 함께 IMO의 시장기반조치(Market-Based Measure, MBM) 도입 논의가 진행됨에 따라 탄소부담금 부과시 연간부담 규모가 최대 800억 달러에 이를 수 있다는 전망이 제기되면서 국내 해운업계의 대응 필요성이 더욱 커지고 있다(International Maritime Organization)(IMO)[2023]. 또한 IMO는 ‘2023 IMO GHG Strategy’를 통해 국제해운 분야의 탄소중립(Net-zero) 목표를 강화하고 있으며, 2030년까지 무탄소 또는 저탄소 연료사용 비중 확대를 요구하고 있다(IMO[2023]). 이러한 국제 환경규제와 기술 전환에 대응하여 국내에서도 친환경선박 전주기 기술개발 및 전기추진 기반 기자재의 국산화를 위한 연구개발이 확대 되고있다(KORIES[2024]).

정부는 2030년까지 총 528척의 선박을 친환경 선박으로 전환하는 정책이 추진되고 있으며, 전기추진 및 하이브리드 추진 방식의 적용 비중이 점차 확대되는 추세이다(Ministry of SMEs and Startups[2024]; Ministry of Land, Infrastructure and Transport[2025]). 연도별 친환경 선박 보급 계획 및 예산은 Table 1에 나타내었다.

전기추진선박은 디젤엔진 기반의 기계식 추진 방식에 비해 승선감이 우수하고 조종 성능이 뛰어나며, 선박 내부 배치 및 선형 설

계의 유연성이 높아 고효율 운용이 가능한 장점을 가진다. 이러한 특성으로 인해 해외에서는 유압선, 극지 운항 선박 및 해양플랜트 지원선 등 다양한 선종에 전방위 Pod 추진기가 적용되고 있으며, 관련 시장 수요 또한 지속적으로 증가하고 있다.

한편, 레저 선박용 내연기관 선외기의 경우 현재 대부분 미국과 일본 등 해외 기업 제품에 의존하고 있으며, 국내 관련 기술 기반은 아직 제한적인 수준에 머물러 있다. 특히 전기를 이용한 전기선외기 추진시스템은 국내뿐만 아니라 해외에서도 소수 기업만이 자체 기술을 확보하여 상용 제품을 공급하고 있는 상황이다.

마린 추진시스템은 장기간 축적된 설계 경험과 운용 데이터를 기반으로 기술이 발전하는 분야로, 핵심 기술 확보를 위해서는 지속적인 연구개발과 실증 기반의 기술 축적이 필수적이다. 또한 전기 추진시스템은 전기선박뿐만 아니라 수소연료전지 선박 및 하이브리드 선박 등 다양한 친환경 선박 기술에 적용되는 핵심 요소로서 그 중요성이 점차 증가하고 있다.

특히 글로벌 시장에서도 고효율 전기선외기 추진시스템은 일부 기업에 의해 제한적으로 생산되고 있으며, 대부분 저출력 중심으로 형성되어 있다. 이러한 상황에서 국산 전기선외기 추진시스템의 기술 확보와 성능 검증은 국내 소형 선박 산업의 경쟁력 확보 및 향후 수출 확대 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

Table 1. Annual Environmentally Friendly Ship Supply Plan and Budget

Year	2021	2022	2023	2024	2025
Input Budget (KRW 100 million)	2050	3838	3623	2422	2223
Supply plan (ship)	39	39	60	75	81

본 연구에서는 국내 기술 기반으로 개발된 70 kW급 전기선외기 추진시스템을 대상으로 성능 및 안전성 검증을 수행하고, 고출력 전기선외기 추진시스템의 실운용 가능성과 기술적 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 본 론

2.1 전기선외기 추진시스템 개요

전기선외기 추진시스템의 구조와 주요 구성 요소를 Fig. 2에 나타내었다. 시스템은 크게 헤드, 중간축 및 하부 조립체로 구성되며, 헤드 부분에는 국산화한 듀얼 모터와 인버터 및 전기·전자 제어 모듈이 포함되어 있다. 듀얼 모터 구조는 단일 모터 대비 부하 분산 및 용량 확장에 유리하며, 일부 구동 계통 이상 발생 시에도 제한적인 추진이 가능하여 운용 신뢰성과 안전성을 향상시킬 수 있다. 특히 전기선외기 추진시스템은 국산 SiC 기반 듀얼 인버터 및 통합 제어 기술을 적용하여 고효율·고신뢰성을 확보하였으며, 해외 기술 의존도가 높은 고출력 전기선외기 핵심 전장 기술의 국산화 측면에서 기술적 차별성을 갖는다. 중간축 부분에는 열교환기와 구동축, 냉각장치가 배치되어 있으며, 하부 조립체는 베벨기어 구동축과 프로펠러로 구성되어 추진력을 발생시킨다.

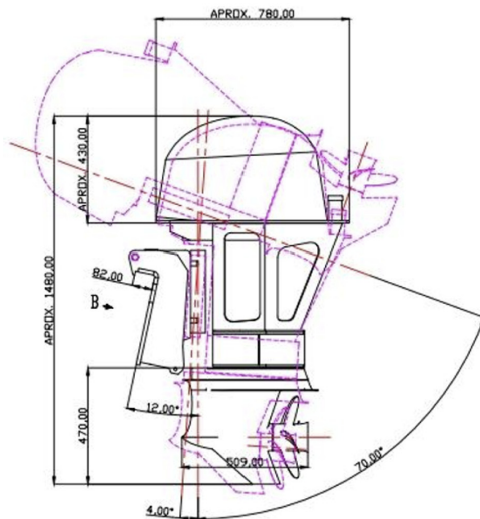


Fig. 2. Structural configuration of electric outboard propulsion system.

3. 시험 장치 및 시험 방법

3.1 시험 시스템 구성

시험 시스템은 70kW급 전기선외기 추진시스템의 출력 특성, 효율, 열적 안정성 및 전기적 안전성을 종합적으로 평가하기 위하여 구성하였다. 전원 공급 장치에서 공급된 전력은 인버터를 통해 모터로 전달되며, 모터에서 발생한 기계적 출력은 다이내모미터를 통해 부하 조건이 모사되도록 구성하였다. 또한 전력 분석기(WT3000), 회전 속도 센서 및 온도 센서를 이용하여 시스템의 운전영역별 출력 및 효율 특성과 고출력 운전 조건에서의 시스템 안정성을 분석하고자 하였다. 시험 시스템의 전체 구성은 Fig. 3에 나타내었다(Kim *et al.*[2018]).

3.2 모터 성능시험

모터 성능시험은 전기선외기 추진시스템이 실제 운항 조건에서 요구되는 추진 출력을 안정적으로 제공할 수 있는지를 검증하기 위하여 수행하였다. 특히 선박 추진용 프로펠러는 회전속도 증가에 따라 추진 부하가 비선형적으로 증가하므로, 부분부하 영역부터 정격 및 최대 출력 영역까지 안정적인 토크 및 출력 특성을 유지하는 것이 중요하다. 따라서 시험에서는 회전속도 변화에 따른 토크, 출

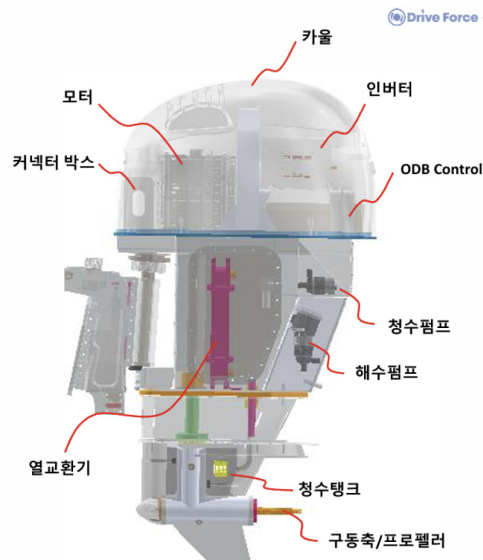


Table 2. Key Specifications of Electric Outboard Propulsion System

Item	Description	
Dimensions	1.48(H) × 0.78(L) × 0.53(W)	
Weight	148 kg, ABB plastic cover applied	
Outboard Unit Configuration	Head	Base plate, converter, Dual motor, inverter, electrical/electronic components, cooling fan
	Intermediate Shaft	Heat exchanger, drive shaft, submerged tank, pump
	Lower Assembly	Bevel gear, drive shaft, propeller
Motor Output	70 kW	
Motor Speed	2400 rpm	

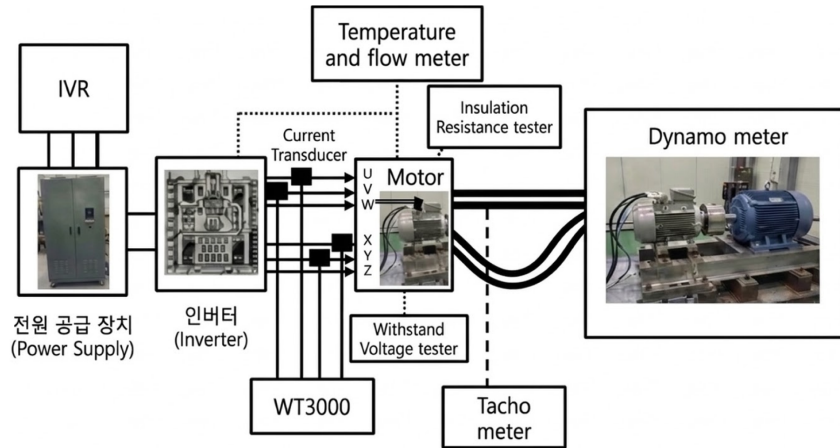


Fig. 3. Test configuration diagram of electric outboard propulsion system.

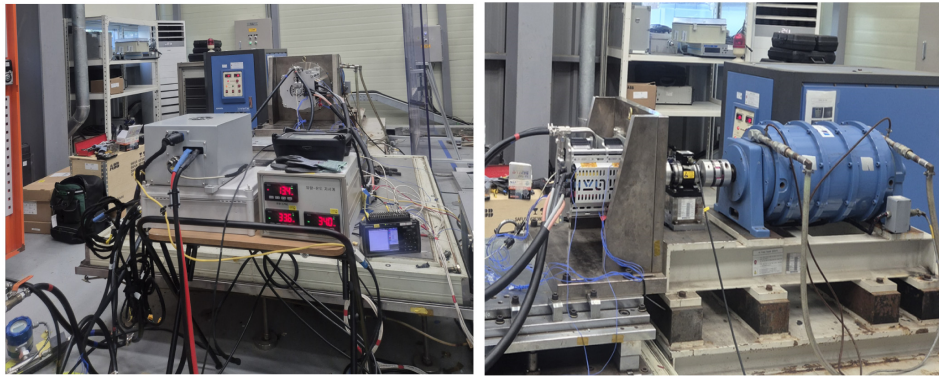


Fig. 4. Actual test setup of electric outboard propulsion system.

력 및 효율 특성을 계속함으로써 추진시스템의 출력 및 효율 특성을 확인하고자 하였다. 시험은 Fig. 4와 같이 다이내모미터를 이용하여 모터에 부하를 인가한 상태에서 수행되었으며, 다양한 운전 조건에서 모터의 토크 및 출력 특성을 분석하였다. 이를 통해 전기선 외기 추진시스템에 적용된 모터의 기본적인 운전 특성과 출력 성능을 평가하였다(Jang[2016]).

실제 선박 운항 시 발생하는 프로펠러 추진 부하 특성을 고려하여 다이내모미터 부하 조건을 설정하였다. 선박 추진용 프로펠러 부하는 회전속도 증가에 따라 토크와 출력이 비선형적으로 증가하므로, 시험에서는 부분부하 영역부터 정격 및 최대 출력 영역까지의 운전 특성을 확인할 수 있도록 부하 조건을 구성하였다(Kim *et al.*[2018]). 이에 따라 본 연구에서는 프로펠러 법칙(propeller law)에 기반한 부하 프로파일(load profile)을 적용하여 실제 운항 조건의 가변 추진 부하 특성을 모사하였다(Carlton[2012]).

$$Q = K_Q n p^2 D^5 \quad (1)$$

여기서 Q = 프로펠러 토크(Propeller torque)

K_Q = 토크 계수(Torque coefficient)

ρ = 유체 밀도(Fluid density)

n = 회전수(Rotational speed)

D = 프로펠러 직경(Propeller diameter)

식 (1)은 회전속도와 프로펠러 토크 간의 관계를 나타내며, 이를 기반으로 부하 조건을 설정하였다. 이를 통해 회전속도 변화에 따른 추진시스템의 토크, 출력 및 효율 응답 특성을 확인하고자 하였다. 시험에 사용된 다이내모미터는 정격 토크 500 N·m(정밀도 $\pm 0.1\%$), 정격 회전속도 2800 rpm, 최대 회전속도 7500 rpm 및 정격 출력 140 kW의 사양을 갖추고 있어 70 kW급 추진시스템의 성능 평가에 충분한 작동 범위를 확보하고 있다. 또한 $\pm 0.1\%$ 수준의 토크 측정 정밀도를 통해 효율 분석에 필요한 계속 데이터의 신뢰성을 확보하였으며, 정격 및 최대 출력 조건에서 추진시스템의 기계적 출력 특성을 실시간으로 계속하였다.

3.3 온도 제어 시험

온도 상승 시험은 고출력 연속 운전 조건에서 모터 및 냉각 시스템의 열관리 성능을 평가하기 위하여 수행하였다. 일반적으로 전기 추진시스템은 장시간 고부하 운전 시 권선 및 전력변환장치의 발열이 증가하며, 과도한 온도 상승은 절연 열화 및 출력 저하의 주요 원인이 될 수 있다. 시험에서는 연속 운전 조건에서 주요 부위의 온도 변화를 계속함으로써 냉각 시스템의 열 제거 성능과 장시간 운전 시 열적 안정성을 확인하고자 하였다. 본 시험은 모터를 일정 부하 조건에서 연속 운전시키면서 주요 부위의 온도를 측정하는 방식으로 진행하였다. 온도 측정은 모터 외부 표면 및 주요 발열 부위를 대

Table 3. 140 kW Dynamometer Specifications

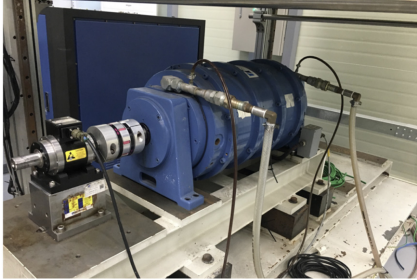
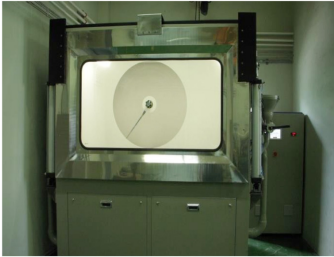
Equipment photo	Item	Specification
	Rated. Torque	500N·m ($\pm 0.1\%$ accuracy)
	Rated. Speed	2 800 rpm
	Max. Speed	7 500 rpm
	Rated. Power	140 kW

Table 4. Specifications of IP55 Test Nozzle and Dust Test Chamber

Equipment photos	Item	Specification
	Size	Φ 6.3 mm nozzle
	Test Flow Rate	12.5L/min $\pm$ 5%
	Size	2300(W) $\times$ 2100(D) $\times$ 2500(H)
	Capacity	400l/min
	Spray Pressure	- 758.5 mmHg

상으로 수행하였으며, 온도 센서를 이용하여 시간에 따른 온도 변화를 계속하였다(Heo *et al.*[1995]). 계속된 온도 데이터는 모터 운전 시간에 따른 온도 상승 특성을 분석하고, 장시간 운전 시 열적 안정성을 평가하기 위한 기초 자료로 활용하였다.

3.4 외관 검사

전기선외기 추진시스템의 구조적 이상 여부를 확인하기 위하여 외관 검사를 수행하였다. 외관 검사는 시스템의 주요 구성 요소를 대상으로 손상, 변형 및 조립 상태 등을 확인하는 방식으로 진행하였다. 이를 통해 시스템의 구조적 건전성과 조립 상태를 점검하였다.

3.5 PT(비파괴 검사)

전기선외기 추진시스템의 주요 구조부 및 용접부에서 발생 가능한 표면 균열과 미세 결함을 확인하기 위하여 침투탐상시험(PT, Penetrant Testing)을 수행하였다.

전기선외기 추진시스템은 운전 중 지속적인 진동 및 추진 하중을 받게 되므로, 구조부의 미세 균열은 장기 운용 시 구조적 안전성 저하의 원인이 될 수 있다. 따라서 주요 구조부의 표면 결함 유무를 평가하여 장기 운용에 필요한 구조적 건전성을 검증하고자 하였다(Lho[2018]).

3.6 IP 방수 방진 시험

IP 시험은 해상 환경에서 발생 가능한 수분 및 분진 유입에 대한 시스템 보호 성능을 검증하기 위하여 수행하였다. 전기선외기 추진 시스템은 인버터 및 전기·전자 제어장치가 밀폐 구조 내부에 탑재되어 있으므로 외부 수분 유입 시 절연 성능 저하 및 시스템 고장이 발생할 가능성이 있다. 따라서 시험에서는 IEC 60529 기준에 따라 방진 및 방수 시험을 수행하여 환경 내구성과 운용 신뢰성을 평가하였다. 방진 시험을 통해 분진 차단 성능을 평가하였으며, 방수 시험에서는 물 분사 조건에서의 수분 유입 여부와 시험 후 시스템의 정상 작동 여부를 확인하였다(IEC 60529[2013]).

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 70 kW급 전기선외기 추진시스템의 성능 특성, 열적 안정성 및 전기적 안전성을 평가하기 위하여 성능시험, 온도 제어 시험, 절연내력시험 및 절연저항시험을 수행하였다. 또한 회전속도 변화에 따른 출력 및 효율 특성과 고출력 운전 조건에서의 시스템 안정성을 분석하였으며, 실제 해상 운용 환경을 고려한 환경 내구성 과 운용 신뢰성을 검토하였다.

4.1 모터 성능 시험 결과

모터의 출력 및 효율 특성을 분석하기 위하여 성능시험을 수행하였다. 시험에서는 모터의 회전 속도, 토크, 전압 및 전류를 측정하여 출력 특성을 분석하였다. 성능시험을 통해 측정된 주요 데이터는 Table 5, Table 6, Table 7에 나타내었다.

Table 5의 500rpm 조건은 전기선외기 추진시스템의 저속 운전

특성과 초기 구동 안정성을 평가하기 위한 조건으로 설정하였다. 또한 다이노미터를 이용하여 정격 및 최대 출력 지점까지 부하를 단계적으로 인가하는 부하 프로파일(load profile)을 적용함으로써 실제 운용 환경에서 발생 가능한 가변 추진 부하에 대한 시스템의 기계적·열적 대응 특성을 반영하였다. 시험 결과, 모터는 정격 운전 조건(2400 rpm)에서 최대 75 kW 수준의 출력을 안정적으로 유지하였으며, 출력 증가에 따른 급격한 효율 저하 없이 약 98% 수준의 높은 효율 특성을 나타내었다. 이는 SiC 기반 듀얼 인버터 적용에 따른 스위칭 손실 감소와 고효율 전력변환 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

또한 정격 출력 및 최대 출력 영역에서도 전류 증가에 비해 출력 증가 특성이 안정적으로 유지되어 고출력 운전 조건에서 시스템의 전기적·기계적 안정성이 확보된 것으로 분석된다.

Fig. 5는 회전속도 변화에 따른 토크, 출력 및 효율 특성을 나타낸 것이다. 부분부하 영역에서는 저속 운전 조건에서도 비교적 높은

Table 5. Performance Data

Speed(rpm)	Torque(N·m)	Voltage(V)	Current(A)	Input(W)	Output(W)	Efficiency(%)
500	184.7	7.476	2 251			
2400	279.0	326.5	147.6	71 202	70 172	98.6
2400	298.9	329.0	158.6	76 386	75 182	98.4

Table 6. Motor Temperature Rise Test

Item	Temperature [°C]				Test Time [min]
	Specimen Surface 1	Specimen Surface 2	Water Supply	Water Discharge	
Minimum	26.2	26.5	23.1	23.5	60
Maximum	34.9	34.3	25.7	27.2	
End	34.7	34.2	24.3	26.4	

Table 7. Dielectric Withstand Voltage Test

Test Object	Test Voltage [kV]	Test Time [min]
U, V, W	1.50	1
X, Y, Z	1.50	1

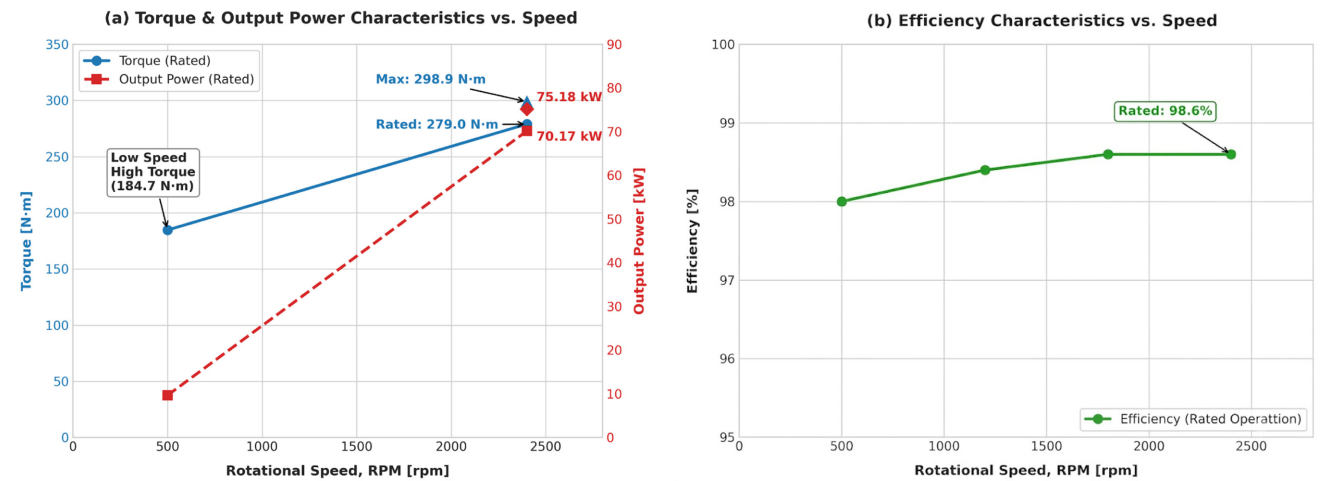


Fig. 5. Comparison of torque, output, and efficiency under operating conditions.

토크 특성이 유지되어 접·이안 및 저속 조종 운전 시 요구되는 추진 응답성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 정격 운전 영역에서는 약 70 kW 수준의 출력을 안정적으로 유지하였으며, 최대 출력 영역에서는 약 75 kW까지 출력이 증가하였음에도 효율 저하가 제한적으로 나타났다.

일반적으로 프로펠러 기반 추진 시스템은 회전속도 증가에 따라 추진 부하가 비선형적으로 증가하므로 고속 운전 영역에서 전력변환 손실 및 발열 증가가 발생할 가능성이 높다. 그러나 전기선외기 추진시스템은 고출력 운전 영역에서도 안정적인 효율 특성을 유지함으로써 실제 운항 환경 적용 가능성을 확인하였다. 이는 Kim *et al.* [2018]의 전기추진 선외기 운전 특성과 유사한 경향을 나타내며, 전 운전 영역에서 안정적인 운전 성능을 확보하고 있음을 보여준다.

4.2 온도 제어 시험 결과

모터의 열적 안정성을 평가하기 위하여 1시간 동안 온도 상승 시험을 수행하였다. 시험에서는 70 kW급 고출력 모터의 열설계 적절성을 검증하기 위해 냉각수로 청수를 사용하였으며, 유량은 37L/min으로 설정하였다. 모터 주요 부위의 온도를 측정하여 시간에 따른 온도 변화 특성을 분석하였다. 온도 측정은 시료 표면 1, 시료 표면 2, 급수부 및 배수부의 총 4개 지점에서 수행하였으며, 각 측정 위치는 Fig. 7에 나타내었다. 시험 결과, 각 측정 지점의 온도는 Fig. 6와 같이 시험 시간 동안 일정 범위 내에서 안정적으로 유지되는 경향을 보였다. 또한 Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 시료 표면 1과 시료 표



Fig. 7. Locations of temperature measurement points (specimen surface 1 and 2).

면 2의 온도는 각각 최대 약 34.9°C 및 34.3°C로 측정되었으며, 급수부와 배수부 역시 유사한 수준에서 안정적인 온도 범위를 유지하는 것으로 확인되었다.

이러한 데이터는 고출력 구동 상태에서도 냉각 시스템이 열을 효과적으로 제어하고 있음을 보여준다. 따라서 모터는 장시간 운전 시에도 과도한 온도 상승 없이 안정적인 열적 거동을 나타내며, 70 kW급 전기선외기 추진 시스템의 지속 운전 조건에서도 안정적인 열 특성을 나타내었다. 기존 연구에서는 단시간 운전 기반의 기본 성능 검증이 주로 수행된 반면, 본 연구에서는 70 kW급 고출력

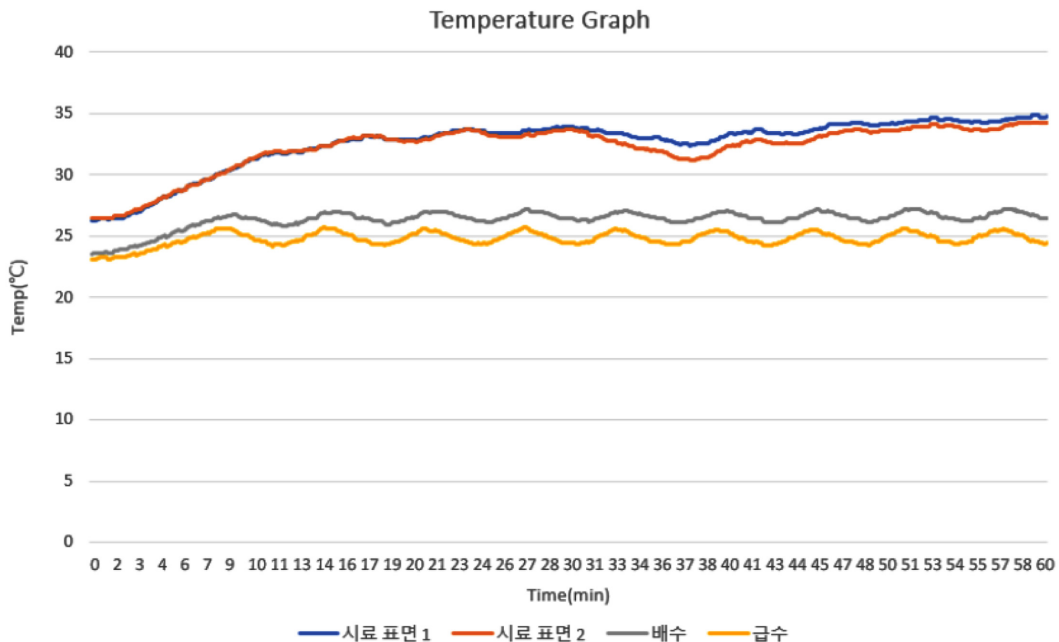


Fig. 6. Temperature Graph.

Table 8. Insulation Resistance Test

Test Object	Test Voltage [kV]	Test Time [min]	Insulation Resistance [GΩ]
U, V, W	500	1	67.8
X, Y, Z	500	1	162.9

연속 운전 조건에서 열적 안정성을 평가하였다는 점에서 차별성을 가진다.

절연저항 측정 결과 U,V,W 단자군은 67.8 GΩ, X,Y,Z 단자군은 162.9 GΩ으로 측정되어 모두 높은 절연저항 특성을 나타내었다. 또한 절연내력시험에서는 권선과 외함 사이에 1500 V를 1분간 인가한 조건에서도 절연 파괴 및 이상 전류 발생이 확인되지 않았다. 일반적으로 저전압 회전기기의 절연저항은 수 MΩ 이상, 절연내력 시험에서는 절연 파괴가 발생하지 않아야 하는 것으로 알려져 있다(Kim and Park[2012]). 따라서 전기선외기 추진시스템은 절연저항 및 절연내력 기준을 만족하며, 해양 환경에서 요구되는 전기적 안전성을 확보한 것으로 나타났다.

4.4 외관 및 PT 검사 결과

전기선외기 추진시스템은 운전 중 추진 하중과 진동에 지속적으로 노출되므로, 주요 구조부의 손상 및 용접 결함은 시스템의 구조적 안전성과 운용 신뢰성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 전기선외기 추진시스템의 구조 건전성과 표면 결함 여부를 확인하기 위하여 외관 검사 및 침투탐상시험(PT)을 수행하였다. 외관 검사에서는 주요 구조부의 손상, 변형 및 조립 상태를 중점적으로 점검하였으며, PT 시험은 주요 용접부 및 구조 접합부를 대상으로 수



Fig. 8. Visual and PT Inspection.



Fig. 9. IP55 test results.

행하였다. 시험 과정에서는 침투액과 현상제를 이용하여 표면 균열 및 미세 결함 발생 여부를 확인하였다. Fig. 8은 외관 검사 및 PT 검사 결과를 나타낸다. 검사 결과 주요 구조부 및 용접부에서 균열, 변형 및 기타 결함은 발견되지 않았으며, 추진시스템의 구조적 건전성과 안전성이 유지되는 것으로 확인되었다(Korea Ministry of Government Legislation).

5. 결 론

70 kW급 전기선외기 추진시스템의 성능 및 전기적 안전성을 평가하기 위하여 모터 성능시험, 온도 제어시험, 절연내력시험, 절연저항시험, 외관 검사, 침투탐상시험(PT) 및 IP시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모터 성능시험 데이터를 통해 회전 속도, 토크 및 출력 특성을 확인한 결과, 설정된 운전 조건에서 안정적인 출력 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 전기선외기 추진시스템이 실제 운용 조건에서도 안정적인 출력 특성을 나타내었다.

(2) 온도 상승 시험 결과, 장시간 운전 시에도 주요 부위의 온도가 안정적인 범위 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 모터의 열적 안정성이 확보되어 장시간 운전 조건에서도 안정적인 열 특성을 나타내었다.

(3) 절연내력 및 절연저항 시험 결과, 모터 권선의 절연 성능이 시험 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 전기적 안전성이 확보되어 실제 적용이 가능하다고 생각된다.

(4) 외관 검사 및 침투탐상시험(PT) 결과, 주요 구조부에서 균열이나 결함이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 시스템의 구조적 건전성이 확보되어 안정적인 운용이 가능하다고 생각된다.

(5) IP 방수 시험 결과, 시스템이 IP55 등급의 방수 성능을 만족하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 외부 환경에서의 수분 유입을 효과적으로 차단할 수 있어 실제 해상 운용 환경에 적용 가능한 방수 성능을 확보하였다.

(6) 기존 전기선외기 연구가 저출력급 시제품의 추진 성능 평가 중심으로 수행된 것과 달리, 본 연구에서는 70 kW급 고출력 전기선외기 추진시스템을 대상으로 운전영역별 성능 특성, 전기적 안전성 및 환경 내구성을 통합적으로 검증하였다. 또한 듀얼 모터 및 SiC 기반 듀얼 인버터 기술을 적용하여 고출력 운전 안정성과 시스템 신뢰성을 확보하였으며, 외관 검사, 침투탐상시험(PT), 절연 시험 및 IP55 시험을 통해 「선박안전법」 제12조(예비검사)에 따른 예비검사 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업(한국산업기술기획평가원 지원, 과제번호: 제2023-501호, 20026552)의 일환으로 수행된 연구의 일부를 수정·보완한 것이다.

References

- [1] Carlton, J., 2012, Marine Propellers and Propulsion, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann.
- [2] IMO, 2023, IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization (IMO).
- [3] IEC, 2013, IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code).
- [4] International Maritime Organization (IMO), 2023, 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization, London.
- [5] Jang, K.B., 2016, Technology Trends to High Efficiency Motors: Focused on Induction Motor, J. Korean Inst. Electr. Eng., 65(6), 995-1000.
- [6] Kim, Y.B., Lee, J.H., Cho, Y.S., 2018, Performance Evaluation of 20 HP Outboard Motor in Consideration of Application to Electric Propulsion Ship, J. Ocean Eng. Technol., 32(6), 518-525.
- [7] Kim, Y.M., Park, J.P., 2012, Insulation Diagnosis and Dielectric Breakdown Characteristics of 6.6 kV Motor Stator Windings, J. Korean Inst. Electr. Eng., 61(11), 1626-1631.
- [8] Korea Ministry of Government Legislation, Ship Safety Act, Article 12 (Preliminary Inspection).
- [9] KOREIS, 2024, 2024 Summary Report on Eco-friendly Ship Technology Development Trends, Korea Organization for Innovative Eco-friendly Ship Technology Development, Busan.
- [10] Cho, T.J., 2018, A Study on the Development of Diagnosis System of Defects on Surface of Inner Overlay Welding of Long Pipes Using Liquid Penetrant Test, J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc., 19(10), 121-127.
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2025, Operation Plan for Eco-friendly Ship Fuel Infrastructure and Policy Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [12] Ministry of Oceans and Fisheries, 2023, Strategy for Decarbonization of International Shipping, Policy Report, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [13] Ministry of SMEs and Startups, 2024, Project Plan for Eco-friendly Technology Development in Shipbuilding and Marine Industry, R&D Report, Ministry of SMEs and Startups.

Received 4 June 2026

Revised 21 July 2026

Accepted 22 July 2026