

신조 함정 안벽의장공사 중 하절기 선체부착생물 부착이 디젤·디젤 복합 추진체계 엔진 부하 특성에 미치는 영향: 시운전 실측 데이터 기반 정량적 분석

Effect of Summer Biofouling during Quay Outfitting Work on Engine Load Characteristics of CODAD Propulsion System in Newly Built Naval Vessel: A Quantitative Analysis based on Sea Trial Measurements

서철오* · 이재웅** †
Chul-oh Seo* and Jae-ung Lee** †

(Received 27 May 2026, Revision received 31 August 2026, Accepted 31 August 2026)

초록 : 본 연구는 신조 해군함정의 디젤·디젤 복합 추진 시스템에서 안벽 의장 단계의 생물부착이 엔진 부하 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 건조 일정 제약으로 선체부착생물 방지장치(MGPS)를 지속 가동하지 못한 하절기(해수온 26~28℃) 동안 심각한 생물부착이 발생하였으며, 이후 해상시운전에서 엔진 과부하 및 피치 슬로우다운 현상이 발생하여 긴급 재입거 및 프로펠러 소제가 필요하였다. 소제 전·후 비교 시운전 결과, 순항 속도에서 약 703 kW(17.8%), 최대 속도에서 약 350 kW(3.6%)의 축동력 감소가 확인되었으며, 엔진 성능 곡선 분석을 통해 부하 한계선 대비 운전 여유분을 정량화하였다. 이를 토대로 해군 함정 건조 프로그램에서의 시운전 전 프로펠러 검사 의무화를 위한 정량적 기준을 제안하였다.

키워드 : 선체부착생물, 디젤·디젤 복합 추진체계, 엔진 과부하, 추진기 소제, 해상 시운전 계획

Abstract : This study presents a quantitative analysis of how biofouling accumulated during the quay outfitting stage affects engine load characteristics in a Combined Diesel And Diesel (CODAD) propulsion system of a newly built naval vessel. Severe biofouling developed during summer months when seawater temperatures reached approximately 26~28℃, as the marine growth prevention system (MGPS) could not be continuously operated due to shipbuilding schedule constraints. Engine overload and pitch slowdown events encountered during subsequent sea trials necessitated emergency re-docking and propeller cleaning. Comparative sea trials conducted before and after cleaning revealed shaft power reductions of approximately 703 kW (17.8%) at cruising speed and 350 kW (3.6%) at maximum speed, with engine performance curve analysis further quantifying the operating margin relative to the engine load limit boundary. Based on these findings, quantitative criteria for mandatory pre-trial propeller inspection are proposed for naval shipbuilding programs.

Key Words : Biofouling, CODAD System, Engine Overload, Propeller Cleaning, Sea Trial Measurements

** † 이재웅(<https://orcid.org/0000-0002-2839-0448>) : 부교수,
한국해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662
*서철오(<https://orcid.org/0009-0009-2364-3483>) : 책임엔지니어,
한화오션 특수선설계담당

** † Jae-ung Lee(<https://orcid.org/0000-0002-2839-0448>) : Associate
Professor, Division of Marine System Engineering, Korea
Maritime & Ocean University.
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662
*Chul-Oh Seo(<https://orcid.org/0009-0009-2364-3483>) : Principal
Engineer, Naval Ship Design Department, Hanwhaocean.

1. 서 론

1.1 연구 배경

대한민국 해군은 잠수함, 구축함, 호위함, 고속함 등 다양한 함종을 운용하며 지속적인 전력 증강을 이루어왔다.¹⁾ 이러한 함정의 건조 과정은 일반 상선과 구별되는 고유한 특수성을 가진다.

상선의 경우, 진수 후 통상 2~3개월 이내에 의장 공사를 완료하고 시운전에 돌입하는 반면, 함정은 복잡한 추진체계와 고도화된 무장 체계의 설치 및 정밀 연동 작업으로 인해 안벽 계류 기간이 8~9개월에 달하는 것이 일반적이다.²⁾ 이와 같은 장기 안벽 계류는 선체 및 추진기 표면의 선체부착생물 부착 문제를 구조적으로 내포하고 있다. 안벽 계류 중에는 선체와 추진기를 보호하기 위해 선체부착생물 방지장치(Marine Growth Prevention System, MGPS)를 상시 가동하는 것이 원칙이다. 그러나 함정 건조 공정상의 전력 공급 제약, 의장 작업 일정 충돌 등으로 인해 해당 장치를 지속적으로 운용하지 못하는 상황이 빈번히 발생한다. 특히 선체부착생물의 성장 속도는 수온 15~25℃ 구간에서 최고조에 달하며³⁾, 한반도 근해의 표층 수온이 급격히 상승하는 하절기(8~9월)에는 단기간 내에도 상당한 부착량이 형성될 수 있다. 다만 15~25℃는 부착 생물의 성장 속도가 최고조에 이르는 구간을 의미하는 것으로, 이를 상회하는 수온에서도 이미 정착한 개체의 성장과 신규 유생의 2차 정착은 지속된다. 따라서 표층 수온이 25℃를 초과하는 하절기 조건 역시 본 연구의 논의 범위에 포함된다.

1.2 선행연구 검토

선체부착생물(biofouling)이 선박 추진성능에 미치는 영향에 관한 연구는 주로 상선의 운항 중 사례를 중심으로 수행되어 왔다. Schultz⁴⁾는 표면 거칠기 수준에 따른 선박 저항 및 추진 동력 증가량을 체계적으로 정량화하였으며, 중질 파울링(hard fouling) 조건에서 필요 동력이 최대 86%까지 증가할 수 있음을 제시하였다. Demirel et al.⁵⁾은 전

산유체역학(CFD)을 활용하여 추진기 표면 거칠기 변화가 추력 계수(K_T) 및 토크 계수(K_Q)에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. Farkas et al.⁶⁾은 바이오 파울링 수준을 ISO 19030 기준으로 분류하고, 선속-동력 관계 분석을 통해 연료 소비량 증가를 정량화하였다. 국내에서는 Yang et al.⁷⁾이 선박 방오도로 코팅의 저항성능을 검토하였으며, 저마찰 방오코팅 적용에 따른 총저항 변화를 실험적으로 분석하였다.

그러나 기존 연구의 대부분은 운항 중인 상선을 대상으로 하며, 신조 함정의 건조 단계에서 발생하는 선체부착생물 부착 문제, 특히 선체부착생물 방지장치 운용 제약이라는 공정 구조적 요인과 디젤·디젤 복합 추진체계의 엔진 부하 한계 마진 잠식 간의 정량적 관계를 실측 데이터로 분석한 연구는 사실상 보고된 바 없다. 본 연구는 이 공백을 실제 시운전 계측 데이터를 통해 최초로 정량화하였다는 점에서 차별성을 갖는다.

1.3 연구 목적 및 구성

디젤·디젤 복합 추진(Combined Diesel And Diesel, CODAD) 추진체계는 2대 이상의 디젤엔진을 감속기어를 통해 하나의 추진축에 결합하는 기계식 추진방식으로, 부하 조건에 따라 가동 엔진 수를 조절함으로써 저속 순항 시의 연료 효율과 고속 기동 시의 동력 성능을 동시에 확보할 수 있어 중소형 수상함에 널리 채택된다.

본 연구는 실제 함정의 해상 시운전 중 발생한 엔진 과부하(engine overload) 사례를 바탕으로, 하절기 안벽 의장 공사 중 추진기 표면에 부착된 선체부착생물이 디젤·디젤 복합 추진체계의 엔진 부하 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 구체적으로는 추진기 소재 전후의 축 마력 및 선속의 비교, 운용 모드별 엔진 부하율 변화, 엔진 부하선도(engine load limit curve) 대비 운전 마진 잠식량을 수치화하였으며, 이를 토대로 향후 함정 건조 및 시운전 공정에서 적용 가능한 정량적 선저 점검 기준을 제안하였다.

Table 1 Operation mode of the surface ship

Mode		Power (kW) × rpm	Engine Load Ratio (%)	Remark
1	2DE	18,000 × 183.6	86.5	4 engines operated
2	1DE	6,700 × 148.0	64.4	2 engines operated
3	2DE trail shaft	13,600 × 169.0	65.4	4 engines 1 shaft trailed
4	1DE trail shaft	5,194 × 140.0	49.9	2 engines 1 shaft trailed
5	2DE locked shaft	6,170 × 129.0	59.3	4 engines 1 shaft locked
6	1DE locked shaft	5,554 × 132.0	53.4	2 engines 1 shaft locked
7	2DE towing	11,546 × 173	55.5	4 engines operated

2. 추진체계 개요

본 연구 대상 함정의 디젤·디젤 복합 추진 추진 체계는 Fig. 1과 같다. 2개의 디젤엔진을 1개의 감속기어에 각각 연결하여 총 2개의 추진기축을 구동하는 기계식 추진방식으로, 평시는 엔진 2대, 작전시는 엔진 4대의 탄력적 가동을 통해 연료 효율성과 속도 성능 최적화가 가능하여 주로 중소형 함정에 채택된다.

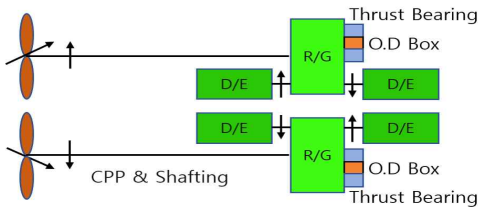


Fig. 1 Propulsion system for CODAD

Table 2 Specification of the CODAD system

Major component	Specification
Main engine	Type: 16V1163M84 (four-stroke)
	Rated power: 5,200 kW × 1,180 rpm
	Idle speed: 500 rpm
Reduction gear	Type: ASL 2 × 154/173
	Power per shaft: 5,200 kW
	Input speed: 1,280 rpm
	Shaft speed: 183.6 rpm
	Shaft rake: 3.3
	Gear ratio: 6.972
Propeller	Type: 5 blades controlled pitch
	Diameter: 4,300 mm
	Material: Ni-Al-Bronze
	Hub diameter: 1,100 mm

함정의 운용 모드는 Table 1에서와 같이 총 7가지로 구성되며, 각 모드별 정격 동력과 그에 상응하는 엔진 부하율(설계치)을 함께 나타내었다.

아울러 본 연구 선박의 디젤·디젤 복합 추진 추진체계의 주요 요목은 Table 2와 같다.

3. 선체부착생물 성장 특성 및 추진성능 저하 메커니즘

3.1 선체부착생물 성장 특성

선체부착생물은 수중 구조물 표면에 부착하는 생물학적 오손층으로, 박테리아 바이오필름(microfouling)에서 시작하여 따개비(barnacle), 홍합(mussel), 관벌레(tubeworm) 등의 대형 생물(macrofouling)로 천이되는 단계적 군집 형성 과정을 거친다.³⁾ 부착 속도 및 생물량은 수온에 강한 의존성을 보이며, 15~25℃ 구간에서 성장 속도가 최고조에 달한다.⁸⁾ 2025년 국립수산물과학원 실시간 수온관측 자료에 따르면 거제 해역 표층 수온은 8~9월 중 약 22~28℃에 달한다. 또한, 해양 기질 표면의 초기 바이오필름(미생물 막)은 침적 후 수 시간 내에 급격히 형성되며, 거대 파울러의 분산 단계인 해조류 포자 및 무척추동물 유생(소형 파울러)들은 광범위한 수온 및 염도 조건, 그리고 와류 환경 속에서도 수 초 이내에 신속하게 정착(Initial Adhesion)하는 특성을 지닌다.⁹⁾ 따라서 하절기 1개월 이상의 안벽 계류는 추진기 표면에 유의미한 파울링 층을 형성하기에 충분한 조건을 제공한다.

3.2 표면 거칠기 증가와 추진 효율 저하 메커니즘

추진기 표면에 선체부착생물이 부착되면 표면 거칠기(surface roughness)가 급격히 증가하고, 이는 날개 주위 경계층 내 난류 전이를 촉진시켜 점성 마찰저항을 상승시킨다. ITTC(2014)의 추진기 성능 가이드 라인¹⁰⁾에 따르면, 추진기 표면 거칠기 증가는 추력 계수 감소 및 토크 계수 증가를 동반하여 추진기 효율을 저하시킨다. Demirel et al.⁹⁾은 전산유체역학 분석을 통해 선체 표면 거칠기 및 바이오파울링의 심화가 선박의 저항 성능을 크게 악화시켜 심각한 석회질 파울링(Heavy calcareous fouling) 형성 시 선박유효마력이 최대 107.5%까지 급격히 증가할 수 있음을 제시하였다. 따라서 동일 선속 유지를 위해서는 저하된 효율을 보상하기 위한 추가적인 엔진 동력이 요구되며, 이것이 엔진 부하 상승의 직접적 원인이 된다.

3.3 신조 함정 건조 단계의 구조적 취약성

상선과 달리, 신조 함정 건조 단계에서는 다음과 같은 구조적 취약성이 복합적으로 작용한다. 첫째, 안벽 계류 기간이 상선 대비 3~4배 길어 선체부착생물 누적 노출 시간이 절대적으로 증가한다. 둘째, 건조 공정상 전력 공급 불안정 및 의장 작업 일정 우선으로 인해 선체부착생물 방지장치를 상시 가동하지 못하는 상황이 빈번히 발생한다. 셋째, 신조 함정은 도장 후 초기 상태이므로 방오도료의 초기 용출 속도가 높으나, 작업 공백 기간이 길어질수록 도료 효과가 감소하여 생물 부착에 더욱 취약해진다. 이러한 복합 요인은 시운전 직전 함정의 추진기 표면 상태를 운항 중 상선과 질적으로 다른 조건에 노출시킨다.

4. 현장 발생 경위 및 조치

의장 공사 완료 후 최종 성능 검증을 위한 해상 시운전 중 발생한 주기관 과부하(overload) 및 피치 슬로우다운(pitch slowdown) 현상의 원인을 규명하기 위해, 함정을 도크(dock)에 재입거(긴급상가)를 수행하였다.

상가 후 육안 점검 결과, Fig. 2의 좌측 사진과 같이 추진기 허브 및 블레이드 전면에 다량의 선체부착생물이 부착되어 있음을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 고압 세척기(high-pressure water jet)를 이용한 소제 작업을 수행하였으며, Fig. 2의 우측 사진과 같이 부착된 선체부착생물을 전면 제거하였다. 소제 전후의 시각적 비교는 부착 범위가 추진기 허브 및 블레이드 전 면적에 걸쳐 분포하고 있었음을 명확히 보여 준다. 다만 본 사례의 부착 정도는 긴급 상가 일정상 육안 관찰에 의한 정성적 평가로 한정되었으며, 부착 면적률·두께 등 정량 지표는 계측하지 못하였다. 따라서 이차에서 제시하는 정량적 수치는 부착량 자체가 아니라, 육안상 블레이드 전 면적에 걸친 대형 생물 부착이 확인된 조건에서의 엔진 부하 변화량에 대한 것임을 밝혀 둔다.



Fig. 2 Configuration of propeller

5. 엔진 부하 특성 정량 분석

5.1 계측 방법

추진기 소제에 따른 엔진 성능 영향을 분석하기 위해 동일 조건 하에 재시운전을 실시하였다. 선속 계측은 위성항법 보정시스템(Differential Global Positioning System, DGPS)을 이용하였으며, 파고 1 m 조건에서 순항 속력 및 최대 속력을 측정하였다. 데이터의 객관성 확보를 위해 조류 및 풍향 등 외력의 영향을 고려하여 순방향($20^{\circ} \pm 20^{\circ}$)과 역방향($200^{\circ} \pm 20^{\circ}$)으로 각각 기동한 후 평균값을 기록하였다. 축 마력은 함정에 설치된 축 마력 계측장치를 이용하여 측정하였다. 위성항법 보정

시스템 위치 정확도는 ± 1 m 이내이다. 선박의 속력은 변위를 시간으로 나눈 값이므로, 고정밀 DGPS의 위치 오차 가수 노트(knot) 이상으로 이동하는 함정의 선속 계산에 미치는 계통적 불확도(Systematic Uncertainty)는 극히 미미한 수준(0.1% 미만)으로 평가된다. 축 마력 계측 오차는 제작사가 권고하는 $\pm 2\%$ 이내로 관리되었다.

5.2 시운전 환경 조건

해상 시운전은 예상치 못한 탑재 장비 이상으로 하절기 작업 공백(약 1개월) 직후 재개되었다. 2023년 8월 거제 근해 해역의 표층 수온은 약 16~30℃로, 선체부착생물의 최적 성장 구간(15~25℃)을 포함하되 그 상한을 일부 상회하는 조건이었다. 수온이 25℃를 초과하는 경우에도 이미 정착한 초기 파울러의 추가 성장 및 2차 정착은 지속되는 것으로 알려져 있어,⁹⁾ 1개월간의 공백이 프로펠러 표면 상태에 유의미한 변화를 유발하기에 충분한 조건이었음을 확인할 수 있다.

5.3 소제 전후 축 마력 및 선속 비교

소제 전후 계측 결과는 Table 3과 같다. 본 절의 계측값은 4장에서 기술한 부착 조건, 즉 추진기 허브 및 블레이드 전 면적에 걸쳐 육안으로 식별 가능한 수준의 대형 생물이 부착된 상태를 기준으로 한 것이다. 소제 후 재시운전에서 기존에 발생하였던 피치 슬로우다운 현상은 더 이상 관찰되지 않았다. 순항 속력(1DE, Pitch 85%) 조건에서 소제 후 축마력은 3,950 kW에서 3,247 kW로 703 kW(17.8%) 감소하였으며, 최대 속력(2DE, Pitch 100%) 조건에서는 10,400 kW에서 10,050 kW로 350 kW(3.6%) 감소하여 추진 효율이 유의미하게 개선되었음을 확인하였다.

순항 속력에서의 마력 감소율(17.8%)이 최대 속력 조(3.6%)에 비해 현저히 큰 이유는, 저속·저피치 조건에서 표면 거칠기 효과가 상대적으로 더 크게 작용되며, 이는 저속·저피치 상태에서는 블레이드 주위로 흐르는 유체의 경계층(boundary layer) 두께가 상대적으로 두꺼워지기 때문이다. 따라서 소제 전후의 정량적 비교는 두 차례 시운

Table 3 Comparison of speed and shaft power

Mode	Pitch (%)	Before - Power/shaft (kW)	Before - Engine rpm	After - Power/shaft (kW)	After - Engine rpm	Speed (kts)	Reduction (kW)	Reduction (%)
1DE	85	3,950	1,040	3,247	1,040	16.01	703	17.8
2DE	95	-	-	8,053	1,280	20.28	-	-
2DE	96	-	-	8,588	-	20.47	-	-
2DE	97	-	-	8,696	-	20.72	-	-
2DE	98	-	-	8,960	-	20.84	-	-
2DE	99	-	-	9,086	1,280	21.58	-	-
2DE	100	10,400	1,240	10,050	1,280	21.84	350	3.6

Table 4 Engine load ratio for propeller cleaning

Mode	Pitch (%)	Load before(%)	Load after(%)	Margin recovery(%)
1DE	85	75.9	62.4	13.5
2DE	100	100.0 ^{*)}	96.6	3.4

^{*)} 소제 전 2DE 100% 피치 조건에서 엔진 부하율은 정격 동력(5,200 kW/shaft)에 도달한 상태를 의미

전에서 모두 계측이 이루어진 순항 속력(1DE, Pitch 85%)과 최대 속력(2DE, Pitch 100%) 두 조건에 한정되며, 아래에서 논의하는 속력 구간별 거칠기 효과 역시 이 두 조건의 대비에 근거한 것이다. 중간 피치 구간을 포함한 연속적인 부하 특성 비교는 후속 계측을 통해 보완되어야 할 과제이다.

한편, Table 3에서 소제 전 축마력이 1DE Pitch 85%와 2DE Pitch 100% 두 조건에만 제시된 것은, 소제 전 시운전 중 엔진 과부하에 따른 피치 슬로우다운이 발생하여 중간 피치 구간(Pitch 95~99%)의 계측을 완료하지 못하였고, 이후 시운전 일정상 해당 구간의 재계측이 불가능하였기 때문이다. 중간 피치 구간은 소제 후 시운전에서만 계측되어 소제 전후 비교가 성립하지 않으므로, Table 3의 해당 행에서는 소제 전 축마력과 감소량(kW 및 %)을 '-'로 표기하였다.

5.4 운용 모드별 엔진 부하율 분석

소제 전후 주요 운용 조건별 엔진 부하율을 정격 동력(5,200 kW/shaft) 기준으로 산정한 결과를 Table 4에 제시하였다. 순항 속력 조건(1DE, Pitch 85%)에서 소제 전 엔진 부하율은 75.9%로, 설계

부하율(64.4%) 대비 11.5%p 초과 운전 상태였다.

소제 후에는 62.4%로 설계 부하율 수준으로 회복되어 13.5%p의 운용 마진이 복원되었다. 최대 속력(2DE, Pitch 100%) 조건에서는 소제 전 정격 동력의 100%에 도달하여 엔진 부하선도와의 여유가 사실상 소멸된 상태였으며, 소제 후 96.6%로 3.4%p의마진이 회복되었다.

5.5 엔진 성능 곡선 분석

엔진 제작사가 제공하는 엔진 성능 곡선(engine performance curve)을 Fig. 3과 같이 분석한 결과, 소제 전 1DE 모드(Pitch 85%) 운전점은 엔진 부하 곡선으로부터 약 703 kW(13.5%p) 내측에 위치하고 있음을 알 수 있었으며, 엔진 부하 한계 곡선의 해칭 영역까지 근접한 상태로 운전됨에 따라 피치 슬로우다운 현상이 발생하였다.

이는 해상 조건 변화, 조류 영향 등 미세한 부하 변동이 발생할 경우에도 보호 시스템이 즉각 작동할 수 있는 임계 조건이었음을 의미한다. 소제 후에는 동일 운전점이 한계 곡선으로부터 충분한 마진을 확보한 영역으로 이동함으로써 안정적인 운용이 가능한 상태로 복원되었다. 이러한 분

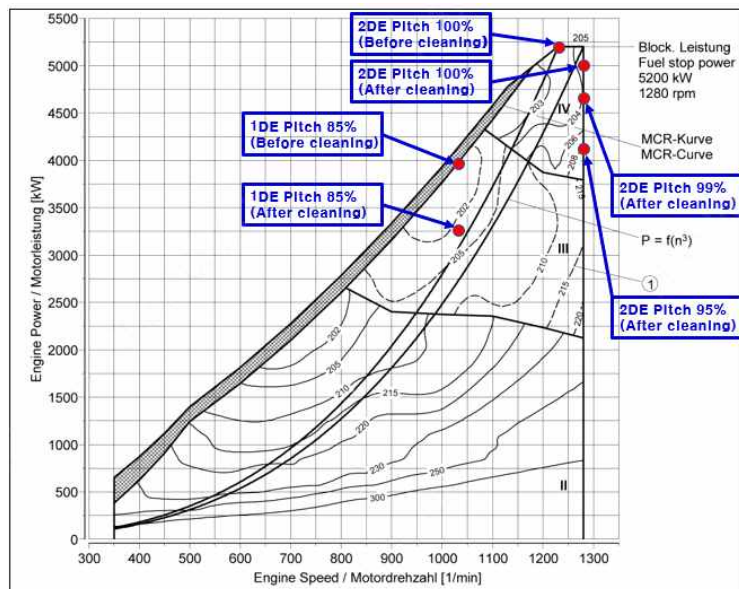


Fig. 3 Engine performance curve

석은 선체부착생물 부착이 단순한 추진 효율 저하에 그치지 않고, 함정의 운용 안전 마진을 직접적으로 잠식함을 정량적으로 입증하였다.

6. 결론 및 공정 관리 권고안

본 연구에서는 신조 함정의 안벽 계류 중 하절기 선체부착생물 부착이 디젤·디젤 복합 추진 추진체계의 엔진 부하 특성에 미치는 영향을 시운전 실측 데이터를 통해 정량적으로 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) 엔진 과부하 원인의 정량적 규명: 하절기 약 1개월간의 작업 공백 기간 중 형성된 프로펠러 표면 선체부착생물(육안 기준 허브 및 블레이드 전면적에 걸친 대형 생물 부착 수준)은 순항 속력 조건에서 엔진 부하율을 설계값 대비 11.5%p 초과시키고, 엔진 부하 한계 곡선과의 여유 마진을 703 kW(13.5%p) 수준으로 압박하여 피치 슬로우다운을 유발하였다.

2) 소재 효과의 정량적 실증: 추진기 소재 후 순항 속력 조건에서 703 kW(17.8%), 최대 속력 조건에서 350 kW(3.6%)의 축마력 감소를 계측하였으며, 엔진 부하율은 각각 13.5%p 및 3.4%p 회복되어 정상 운용 마진이 복원되었음을 확인하였다.

3) 속력 구간별 거칠기 효과의 차별성 확인: 표면 거칠기 증가에 따른 마찰저항 상승효과는 저속·저피치 조건(순항 속력)에서 최대 속력 조건에 비해 약 5배 크게 나타났으며(17.8% 대 3.6%), 이는 순항 운용이 주를 이루는 함정의 실질적 연료 소비 및 추진 효율에 더 큰 영향을 미침을 시사한다. 다만 이 결과는 소재 전후 모두 계측이 이루어진 두 운전 조건의 대비에 근거한 것으로, 중간 피치 구간을 포함한 전 속력역으로의 일반화를 위해서는 추가 계측이 요구된다.

4) 공정 관리 권고안 제시: 본 연구가 단일 함종·단일 사례에 기반한다는 한계를 고려하여, 이상의 분석 결과는 전 함종에 대한 일반 기준이 아니라 동급 디젤·디젤 복합 추진체계 함정에 우선 적용 가능한 잠정 기준으로 다음과 같이 제안한

다. ① 하절기(8~9월) 중 선체부착생물 방지장치 미가동 상태로 30일 이상 안벽 계류된 함정은 시운전 개시 전 선저 및 추진기 수중 점검을 의무화한다. ② 점검 결과, 육안으로 확인 가능한 수준의 대형 생물이 확인될 경우, 재상가 후 추진기 소재 작업을 필수 공정으로 편입한다. ③ 신조 함정 건조 일정 수립 시 하절기 시운전 전 선저 점검 소요 기간(2~3일)을 공정표에 사전 반영한다.

본 연구는 단일 함종의 단일 사례 데이터에 기반하고 있으며, 함종별 추진체계 구성 및 프로펠러 형상에 따라 정량적 결과는 상이할 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 함종 및 계류 조건을 포함한 데이터 확장과 표면 거칠기 실측을 통한 메커니즘 정밀화가 요구된다.

Author contributions

C. O. Seo; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation. C. O. Seo and J. U. Lee; Methodology, Project administration. C. O. Seo; Resources, Software. J. U. Lee; Supervision, Validation, Visualization. C. O. Seo; Writing-original draft. J. U. Lee; Writing-review & editing.

References

1. S. M. Shin, J. H. Park, Y. P. Hong and K. G. Oh, 2021, "Propulsion system of R.O.K.N warships & future of propulsion system", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 25(6), 53-59.
(<https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.6.053>)
2. G. E. Scheuing, 2009, "Propulsion plant selection and system integration for naval vessels", Proceedings of the World Maritime Technology Conference (WMTC 2009), 1-22.
3. D. M. Yebra, S. Kiil and K. D. Johansen, 2004, "Antifouling technology - past, present and future steps towards efficient and environmentally

- friendly antifouling coatings”, *Progress in Organic Coatings*, 50(2), 75-104.
(<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.06.001>)
4. M. P. Schultz, 2007, “Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering”, *Biofouling*, 23(5), 331-341.
(<https://doi.org/10.1080/08927010701461974>)
5. Y. K. Demirel, O. Turan and A. Incecik, 2017, “Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD”, *Applied Ocean Research*, 62, 100-118.
(<https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.12.003>)
6. A. Farkas, N. Degiuli and I. Martić, 2021, “Assessment of the effect of biofilm on the ship hydrodynamic performance by performance prediction method”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 102-114.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.12.005>)
7. J. W. Yang, H. Park and I. W. Lee, 2017, “Full Scale Frictional Resistance Reduction Effect of a Low Frictional Marine Anti-fouling Paint based on a Similarity Scaling Method”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(1), 71-81.
(<https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.1.71>)
8. L. D. Chambers, K. R. Stokes, F. C. Walsh and R. J. K. Wood, 2006, “Modern approaches to marine antifouling coatings”, *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3642-3652.
(<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.129>)
9. M. E. Callow and J. A. Callow, 2002, “Marine biofouling: a sticky problem”, *Biologist*, 49(1), 10-14.
10. ITTC, 2014, “1978 ITTC performance prediction method”, *ITTC Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5-02-03-01.4.
(<https://ittc.info/media/4068/75-02-03-014.pdf>)