



대형공동수조를 활용한 수중함용 복합재 추진기의 공동 및 소음 성능 평가

문자훈¹·정승진¹·이재혁²·장창환¹·김영진¹·이준혁¹·김명진³·정재권^{1,†}

한화오션 제품전략기술원¹

한화오션 특수선사업부²

한국카본 방산사업본부³

Evaluation of Cavitation and Noise Performance of Composite Propellers for Underwater Vehicles using a Large Cavitation Tunnel

Jahoon Moon¹·Seungjin Jeong¹·Jae-Hyuk Lee²·Changhwan Jang¹·Youngjin Kim¹·Jun-Hyeok Lee¹·Myoungjin Kim³·Jaekwon Jung^{1,†}

Product Strategy and Technology Institute, Hanwha Ocean CO., LTD¹

Naval Ship Business, Hanwha Ocean CO., LTD²

Hankuk Carbon³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Unlike conventional metallic propellers, composite propellers for underwater vehicles exhibit hydroelastic deformation under operating loads and therefore require evaluation methods that account for both hydrodynamic loading and structural deformation. In this study, model tests based on Mach number scaling were conducted in a large cavitation tunnel to evaluate the cavitation and noise performance of composite propellers designed for an underwater vehicle. To reproduce full-scale hydroelastic response, model-scale self-propulsion conditions were derived for two metallic and two composite propellers. The validity of the proposed composite propeller design and evaluation procedure was assessed by comparing measured blade deformation with predictions from fluid-structure interaction (FSI) analysis, which showed that the two-way FSI approach provided close agreement with the measured deformation. Using the established Mach-scaled procedure, cavitation inception speed (CIS) and noise characteristics were evaluated and compared with those of reference metallic propellers under Mach-scaled self-propulsion conditions. The results showed that the composite propellers achieved delayed cavitation inception and reduced noise levels compared with the metallic propellers. This improvement suggests that load-induced dynamic deformation enhances both cavitation and noise performance. Furthermore, this study also demonstrates that conventional cavitation assessment methods developed for rigid metallic propellers are not adequate for composite propellers and that Mach number scaling is essential for their reliable evaluation.

Keywords : Composite propeller(복합재 추진기), Cavitation test(공동 시험), Cavitation inception speed(CIS, 캐비테이션 초생속도), Cavitation noise(공동 소음), Mach number scaling(마하 수 상사), Large cavitation tunnel(LCT, 대형공동수조)

1. 서 론

수중함의 은닉성은 생존성과 임무 수행 능력에 직결되며, 이를 달성하기 위한 핵심 요소 중 하나는 저소음 추진 시스템의 확보이다. 추진기에서 발생하는 캐비테이션은 수중방사소음(Underwater Radiated Noise, URN)을 급격히 증가시키고 진동 및 침식 등에 의한 성능

저하를 유발할 수 있다. 따라서 캐비테이션 초생속도(Cavitation Inception Speed, CIS)는 설계 및 운용 결정의 핵심 관리 지표로 간주된다(Ahn et al., 2023). 이로부터 최근 경량, 내식, 감쇠 특성이 우수한 복합재 추진기의 적용이 주목받고 있다. 복합재 추진기는 캐비테이션 제어 효과, 진동 및 소음 성능, 추진 성능 모두 우수한 것으로 알려져 있다(Ashkenazi et al., 1974; Mouritz

et al., 2021). 이러한 복합재 추진기는 일반적으로 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)과 같이 상대적으로 낮은 밀도와 낮은 강성을 갖는 재료로 제작된다. 이로 인해 복합재 날개는 금속재 날개와 달리 이방성 탄성, 비선형 감쇠 특성으로 인해 하중 및 속도 조건에 따른 유탄성 거동 특성이 두드러지며, 굽힘-비틀림 커플링 등의 동적 변형 특성이 캐비테이션 초생과 URN 스펙트럼에 직접 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Choi, 2023). 이러한 특성을 기반으로 2000년대부터 네덜란드, 독일, 영국 등을 필두로 수중함을 포함하는 함정 분야에서 복합재 추진기의 적용이 진행된 바 있고(ThyssenKrupp, 2011; ITTC, 2005), 일본의 나카시마 프로펠러, 국내의 HD현대 그룹 등에서 상선 분야에도 연료 효율 향상과 추계 경량화 등을 달성하고자 복합재 추진기를 도입하여 실증한 바 있다(Nakashima Propeller Ltd., 2015; Choi et al., 2024).

항공기, 헬리콥터, 풍력 터빈 등의 날개 및 로터 구조에는 복합재료의 적용이 오래전부터 검토되어 왔으며, 이들 구조물의 성능을 평가하기 위한 시험 기법 또한 비교적 이른 시기부터 개발 및 활용되어 왔다. 이러한 분야에서는 복합재 날개 구조물의 성능을 추정하는 과정에서 구조물의 유탄성 특성을 효과적으로 반영하기 위하여 프루드 수(Froude number) 및 마하 수(Mach number) 상사에 기반한 기법을 적용함으로써 작동 중 발생하는 날개 형상 변형의 영향을 고려하였다. 대표적으로 Hunt (1973)는 헬리콥터 로터의 동역학적·공력적 상사를 달성하기 위한 조건을 무차원 매개변수 분석에 기반하여 체계적으로 정리하였으며, 이를 통해 동역학적·공력적 상사를 지배하는 핵심 무차원 매개변수들을 이론적으로 도출하였다. 이 연구에서는 프루드 수, 마하 수, 그리고 레이놀즈 수(Reynolds number) 상사가 동시에 만족되기 어렵다는 점을 제시하고, 목적에 따라 이들 상사 조건을 선별적으로 일치시켜야 함을 보임으로써 유연 특성을 갖는 날개형 구조물에 대한 상사 법칙의 이론적 기틀을 마련하였다. 이후 Cansdale (1973)은 1/5 축소 로터 모형을 이용한 실험을 수행하여 Hunt (1973)가 제안한 상사 법칙의 이론적 목표치에 근접한 결과를 도출함으로써 해당 상사 법칙의 실험적 유효성을 검증하였다. 나아가 Friedmann(2004)은 모형시험과 수치해석을 병행하여 프루드 수 상사와 마하 수 상사가 갖는 특징을 정량적으로 분석하고, 상사 법칙 선택에 대한 합리적인 기준을 제시하였다.

고전적으로 각종 선박이나 함정의 저항 및 추진 성능을 추정하기 위한 모형시험은 프루드 수 상사에 기반하여 수행되는 경우가 많다. 해당 분야에서는 프루드 수 상사 기반의 모형시험을 적용할 경우, 오랜 기간 그 실효성이 검증된 ITTC 1978 성능 추정 기법을 활용하여 실선 추진기의 추진 성능을 비교적 용이하게 추정할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 모형시험 기법은 금속재 추진기가 매우 높은 강성을 가지며, 작동 하중에 의한 기하학적 형상 변형이 발생하지 않는다는 가정을 전제로 한다. 그러나 복합재 추진기는 금속재 추진기에 비해 상대적으로 높은 유연성을 가지므로, 실제 작동 하중 조건에서 형상 변형이 발생할 가능성이 크

다. 이러한 추진기 형상 변형은 추진 성능뿐만 아니라 캐비테이션 성능의 변화를 유도할 수 있으므로, 복합재 추진기를 적용한 선박이나 함정을 대상으로 하는 모형시험에서는 모형 추진기와 실선 추진기 간의 형상 변형 모드 상사를 추가적으로 고려할 필요가 있다. 복합재 추진기의 형상 변형 모드 상사를 만족시키기 위해서는 모형선과 실선 간 유체 관성력과 구조 강성 간의 비율을 일치시켜야 하며, 이때 유체 관성력은 추진기 축방향 유속과 추진기 회전에 따른 선속도에 의해 결정된다(Hunt, 1973; Cansdale, 1973). 프루드 수 상사를 적용할 경우 축척비에 따라 모형 복합재 추진기에 사용되는 소재가 달라져야 하며, 복합재 추진기 제작을 위한 적층 패턴 또한 실선 추진기와 다르게 설계되어야 한다. 동시에 실선과 모형선 추진기의 밀도는 동일하게 유지되어야 한다(Hunt, 1973). 그러나 일반적인 선박 또는 함정용 추진기의 모형 제작 단계에서 이러한 조건을 만족하는 재료를 입수하는 것은 물리적으로 불가능하다는 명확한 한계가 프루드 수 상사 기반 모형시험에 존재한다(Young, 2010; Motley and Young, 2012). 반면, 마하 수 상사를 적용할 경우 축척비에 따른 모형 추진기와 실선 추진기 간 동일한 소재 사용과 복합재료 적층 패턴을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 다만 모형선과 실선의 축척비에 관계없이 시험 유속이 실선의 선속과 동일한 수준으로 구현되어야 한다. 따라서 마하 수 상사 모형시험을 위해선 대형 공동수조와 같은 높은 시험 유속 구현이 가능한 설비가 필요하다.

Young (2010)은 수중 운용 복합재 추진기를 대상으로 한 프루드 수 상사 기반 모형시험법이 갖는 물리적 한계를 보완하기 위하여 마하 수 상사법 적용 가능성을 검토하였으며, 경계 요소법-유한 요소법 연성 해석(boundary element method-finite element method, BEM-FEM)을 기반으로 마하 수 상사법의 유효성을 검증하였다. 또한 Motley and Young (2012)은 BEM-FEM 연성 해석을 활용하여 수중 운용을 목적으로 설계된 실선 복합재 추진기와 모형 복합재 추진기의 변형 특성 및 유체역학적 성능을 프루드 수 상사법 결과와 비교·분석함으로써, 마하 수 상사법의 적용 타당성을 추가적으로 입증하였다.

Kim and Lee (2023)는 유체-구조 연성 해석(Fluid-Structure Interaction, FSI) 기법을 활용하여 점성 영향을 고려한 복합재 추진기 대상 단독 성능 해석을 수행하였고, 그 결과를 기반으로 복합재 추진기의 단독 성능 실선 확장 방법을 제안하였다. 이외에도 Kim et al. (2025)은 마하 수 상사 기반 복합재 추진기의 추진 성능 시험법과 캐비테이션 특성 시험법을 제안하고 그 유효성 검증을 위해 복합재 추진기가 장착된 1 MW급 친환경기술 해상실증 선박 모형을 대상으로 대형공동수조 기반 시험을 수행하였다. 해당 시험 결과로부터 복합재 추진기의 추진 및 공동 특성 평가를 위한 마하 수 상사 기반 모형시험법에 대한 유효성이 입증되었다.

그럼에도 불구하고, 수중함 운용에 특화된 복합재 추진기를 대상으로 마하 수 상사 기반의 모형시험 수행 및 유효성 검증 결과와 CIS, 소음 성능의 통합 평가에는 공백이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 미국 해군연구소(DTRC)에서 개발 및 공개한 DARPA Suboff 잠수함 모델(Grove et al., 1989)과 형상정보가 공개된

INSEAN E1619 (Di Felice et al., 2009) 추진기를 기반으로 설계된 복합재 추진기 대상 마하 수 상사 기반 모형시험을 수행하여 수중함용 복합재 추진기의 CIS 및 소음 성능을 평가하였다. 설계된 복합재 추진기의 공동 및 소음 성능 평가를 위한 시험 조건은 Kim et al. (2025)이 제안한 복합재 추진기의 자항시험법 및 실선 성능 추정법에 기반하여 도출되었다.

해당 시험은 대형공동수조에서 수행되었으며, 수중함용 복합재 추진기의 주요 성능은 참고 추진기인 INSEAN E1619의 성능과 함께 비교되었다. 더불어 수중함용 모형 복합재 추진기의 작동 중 발생 변위량을 계측하여 설계치와 비교함으로써 모형시험의 유효성을 검증하였다. 이외에도 마하 수 상사 기반의 모형시험법과 전통적인 모형시험법 간의 캐비테이션 성능 추정 결과 비교를 통해 마하 수 상사 기반의 모형시험법의 유효성을 검증하고자 하였다.

2. 시험 추진기 설계

수중함용 복합재 추진기 대상 마하 수 상사 기반 모형시험법의 유효성 검증과 캐비테이션 및 소음 성능 분석을 위해 선정된 대상 모형 수중함 DARPA suboff의 주요 제원은 Table 1과 같다. DARPA suboff는 연구 목적으로 설계된 모델로써 별도의 실선이 존재하지 않기 때문에 축척비 λ 는 15.0으로 가정하였다. 본 연구에서는 복합재 추진기 성능 평가 목적의 모형시험을 위해 설계 참고 추진기 E1619를 포함하여 총 4종의 추진기 성능을 비교하였다. 4종의 추진기는 각각 금속재 2종, 복합재 2종으로 구성되어 있으며 각각의 추진기는 무하중 상태에서 각기 다른 형상을 갖는다. 금속재 추진기 2종은 각 E1619O, E1619M으로 명명하였으며, 복합재 추진기 2종은 각각 CFRP1, CFRP2로 명명하였다. E1619O는 참고 추진기 E1619와 같다. CFRP1은 복합재 추진기의 변형 특성을 고려하여 임의의 작동점에서 E1619O와 CFRP1의 형상이 같아지도록 역설계를 진행하여 초기 형상을 도출하였다. DARPA suboff는 축척비와 마찬가지로 특징되는 설계 작동점이 존재하지 않기 때문에 임의의 작동점을 선정할 필요가 있었고 해당 작동점은 선속 A knots로 선정하였다.

Fig. 1은 작동점에서의 E1619O 및 E1619M의 날개 압력면 압력 분포를 나타내고 있다. E1619O의 작동점 부근에서 날개 끝 근방의 음의 받음각이 발생함을 확인하였고, 이로 인해 Fig. 1의 E1619O 흡입면 압력분포와 같이 날개 끝 근방에서 과도한 양압력이 형성됨을 확인하였다. 실증화되어 운용 중인 추진기들의 특성과 비교했을 때, 다소 보편적이지 않은 참고 추진기의 설계 형상에 의해 복합소재 적용에 따른 추진기의 성능 해석 결과가 왜곡되는 것을 최소화하고자 개선형 금속재 추진기 설계가 필요할 것으로 판단되었다. 이에 따라 새롭게 설계된 금속재 추진기가 E1619M이다. E1619M은 E1619O의 0.8~1.0 r/R 영역의 피치를 증가시킴으로써 음의 받음각을 최소화하였고, 이를 통해 Fig. 1 하단의 그림과 같이 흡입면 양압력 발생을 억제하였다. CFRP2는

Table 1 Main particulars of DARPA suboff

Length overall (L_{OA})	4.356 m
Maximum hull radius (R_{max})	0.254 m
Wetted surface area (S)	6.338 m ²
Volume of displacement (∇)	0.718 m ³

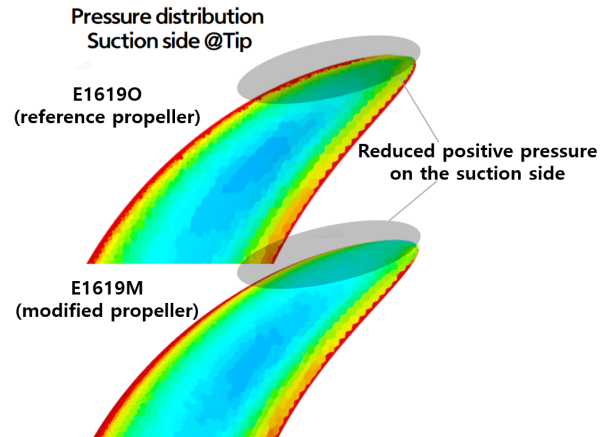


Fig. 1 Pressure distributions on the suction side of the E1619O and E1619M at the operating point

작동점 발생 하중을 통해 변형된 형상이 E1619M과 동일해지도록 역설계되었다.

복합재 추진기는 설계 선속에서 하중에 의한 굽힘 효과로부터 무하중 상태 대비 피치가 작아지고 레이크는 증가되도록 설계되었다. 복합재 추진기의 형상 역설계는 복합재 추진기 단독 상태에서 FSI 해석을 기반으로 수행되었다. CFRP1의 경우 해석 상 유입 유속은 실선 선속과 동일한 속도를 갖도록 설정되었다. CFRP2의 경우 해석 상 유입 유속은 후술 될 마하 수 상사법에 따른 수정된 유속을 이용하였으며, 수중함 후류의 평균 반류값이 적용된 유속을 적용하였다. 유동 해석은 상용 소프트웨어 STAR-CCM+ v18.02를 사용하여 수행되었고, 구조 해석은 Abaqus 2017을 이용하였다. CFRP1 형상은 유동 해석을 통해 계산된 압력장을 구조 해석 모델에 단방향으로 적용한 뒤, 변형된 형상에 대해 다시 유동 해석을 반복하는 1-way FSI 해석의 반복을 통해 역설계되었다. 이때 1차 해석의 초기 형상은 E1619O이다. CFRP2 형상 역설계는 해석 시간 간격(time-step)마다 유동 해석에서 계산된 압력장을 구조 해석 모델에 반영하여 구조 변형을 계산하고, 변형된 형상 경계를 다시 유동 해석의 경계 조건으로 갱신하는 2-way FSI 해석을 기반으로 수행되었다. CFRP2 또한 설계 초기 형상 정보가 없으므로 E1619M의 형상을 초기 형상으로 가정한 후 2-way FSI 초기 해석을 수행하였다. 이후 초기 해석 수렴 형상으로부터 도출되는 변형량을 초기 형상에 역방향으로 적용하여 이를 후속 해석의 초기 형상으로 입력하여 2-way FSI 해석을 반복하였다. 동일한 과정을 반복하며 지속적으로 업데이트 된 2-way FSI 해석 초기 형상이 작동점에서 E1619M과 동일한 형상을 갖는 단계에서 상기 반복 해석을 완료하고 이를 CFRP2의 최종 초기 형상으로 선정하였다. 위 과정

Table 2 Main particulars of reference and design propellers

Model propeller diameter (D_{PM})			262 mm
Number of blades (Z)			7
Expanded area ratio (A_E/A_0)			0.608
Hub diameter ratio (D_H/D_{PM})			0.226
Pitch ratio at 0.7R ($P_{0.7R}/D_{PM}$)			
E1619O	CFRP1	E1619M	CFRP2
1.15	1.27	1.19	1.23

에서 복합재 추진기의 주된 형상 변화는 피치에서 발생하는 것을 확인하였다. E1619O를 포함하여 이를 참고로 하는 4종의 추진기에 대한 기본 제원은 Table 2와 같다. 복합재 추진기 설계 및 수치적 성능평가를 위한 구조 해석은 8절점 연속체 쉘 요소 (8-node Continuum Shell Element, SC8R) 기법 격자를 이용하였고, 추진기 날개 하나 당 4,700개의 구조 요소를 사용하였다. 유동 해석의 경우 작동 유체를 비압축성으로 가정하고 운동량 이송과 질량 보존 지배방정식으로 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 식과 연속방정식을 활용하였다. 속도와 압력의 연성을 위해 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 방법을 사용하였으며, 난류 모델은 Lag Elliptic Blending $k-\epsilon$ 모델을 활용하였다. 유동 해석을 위한 격자는 수중함 도메인에 약 770만 개, 추진기 도메인에 약 600만 개가 사용되었다. 시간 간격은 작동점 선속 A knots 조건에서 2.86×10^{-5} 초로 설정하였다.

3. 복합재 추진기 대상 모형시험

3.1 복합재 추진기 자항 조건 도출

마하 수 상사 기반 모형시험을 통해 유탄성 특성을 갖는 수중함용 복합재 추진기의 자항조건 도출과 더불어 캐비테이션 및 소음 성능 추정을 위해서는 모형시험 단계에서 실선의 선속과 동일한 유속을 발생시킬 수 있어야 한다. 즉, 고속 유동 구현에 제약이 존재하는 예인수조 설비를 마하 수 상사 모형시험에 활용하는 것은 무리가 있다. 따라서 고속 유동장 구현이 용이한 대형공동수조 설비가 필수적이며 본 연구에서는 한화오션 대형공동수조 설비를 활용하였다. Fig. 2는 한화오션 대형공동수조의 개략도이다. 대상 수중함 모형 및 추진기들의 한화오션 대형공동수조 시험부 내 설치 상태는 각각 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 이외에도 마하 수 상사 모형시험을 위해서는 작동 하중에 의해 변형된 복합재 추진기의 형상과 동일한 강체 추진기와 대상선의 실선 작동 조건이 필요하다(Kim et al., 2025). 금속재 참고 추진기 장착 상태에서의 실선 작동 조건은 일반적인 프루드 수 상사법을 통해 도출할 수 있으며, 본 연구에 활용된 E1619O가 장착된 DARAPA suboff의 실선 작동 조건은 Ahn et al. (2021)의 선행 연구를 통해 공개된 결과를 활용하였다.

복합재 추진기의 캐비테이션 및 소음 성능 추정을 위해서는 복

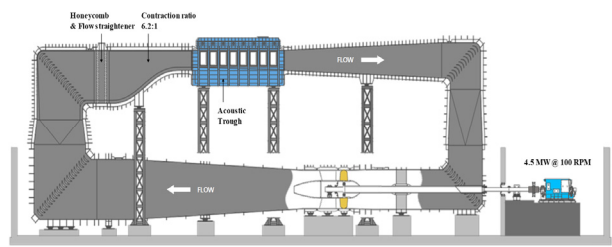


Fig. 2 Schematic drawing of the Hanwha Ocean cavitation tunnel



Fig. 3 Installation of the model submarine with E1619O inside the test section of the large cavitation tunnel

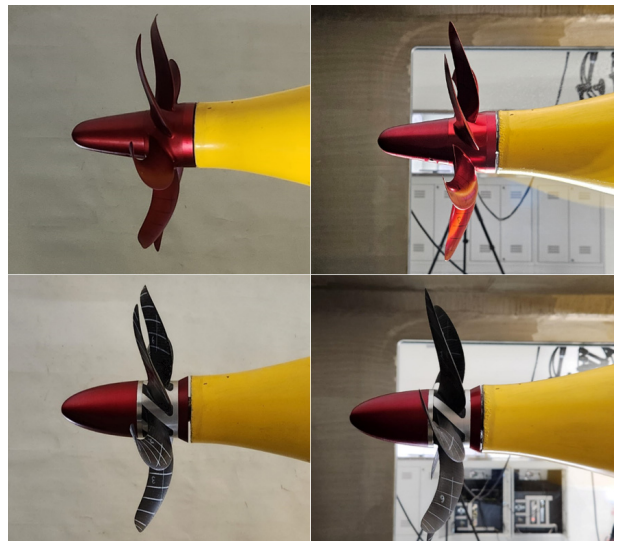


Fig. 4 Photograph of the reference propeller and the designed propellers. (left-top: E1619O, left-bottom: CFRP1, right-top: E1619M, right-bottom: CFRP2)

합재 추진기의 실선 회전수 $n_{S,CP}$ 도출이 필요하다. 해당 실선 복합재 추진기 회전수 도출을 위해서 마하 수 상사 시험 조건 하의 금속재 추진기의 회전수 $n_{M,mach}$ 계산이 필요하며, 이는 실선과 모형선 간 전진계수 J 가 동일한 것을 이용하여 식 (1)과 같이 도출할 수 있다.

$$n_{M,mach} = \lambda \times n_S \quad (1)$$

수중함 모형이 실선 선속 V_S 와 동일한 조류 유속 V_T 를 갖

Table 3 Modified tunnel flow velocities(V_T') for Mach number scaling

V_S [knot]	V_T' [m/s]
A-3	$1.200 \times (A-3)$
A-2	$1.191 \times (A-2)$
A-1	$1.175 \times (A-1)$
A	$1.161 \times (A)$
A+1	$1.149 \times (A+1)$
A+2	$1.131 \times (A+2)$

도록 공동수조 내부 유속을 구현한 후 금속재 추진기를 식 (1)의 회전수로 구동한다면 축척효과에 의해 실선 추력 계수 K_{TS} 와 모형 추력 계수 K_{TM} 이 일치하지 않는 결과가 나타난다. 이는 모형선의 반류가 실선의 반류보다 커 운동학적 상사가 달성되지 못한 것으로 추정할 수 있다. 따라서 수조 내부 유속을 일정 부분 조정하여 $K_{TS} = K_{TM}$ 이 달성되도록 하였고, 이로써 모형선-실선 간 운동학적 상사와 동역학적 상사를 동시에 달성한 것으로 판단하였다. 추가로 모형 추진기 주변 국부 3차원 유동의 일치가 필요한 마하 수 상사 또한 달성한 것으로 판단하였다. 위 과정을 통해 수정 터널 유속 V_T' 도출 결과는 Table 3과 같다. 수정된 유속 조건은 참고 추진기 E16190를 기반으로 설계된 추진기들의 작동조건 도출에 활용된다. E1619M, CFRP1, CFRP2의 각각에 대해 수정된 유속 조건에서 E16190와 동일한 추력을 갖는 지점을 선속별 자항점으로 판단하였다. E16190를 포함한 설계 추진기들에 대한 모형 자항 회전수 $n'_{M,mach}$ 도출 결과는 Table 4와 같다. 동일한 유속 조건 하에서 금속재 추진기들 보다 복합재 추진기의 회전수가 작은 결과를 Table 4에서 확인할 수 있다. 이로부터 설계 조건 하에서 여전히 복합재 추진기의 피치가 큰 상태일 것으로 추정할 수 있다. 그럼에도 불구하고 2-way FSI 해석 기반으로 설계된 E1619M과 CFRP2 간의 회전수 편차가 E16190와 CFRP1 간의 편차보다 작게 나타나고, 복합재 추진기의 설계 및 해석에 2-way FSI 해석이 더욱 적합함을 확인할 수 있다. 실선 복합재 추진기의 회전수 n'_S 는 $n_{M,mach}$ 와 $n'_{M,mach}$ 간의

Table 4 Self-propulsion conditions for each propeller based on Mach number scaling

V_S [knot]	$n'_{M,mach}$			
	E16190	E1619M	CFRP1	CFRP2
A-3	$0.81n_A$	$0.80n_A$	$0.77n_A$	$0.78n_A$
A-2	$0.88n_A$	$0.86n_A$	$0.83n_A$	$0.84n_A$
A-1	$0.94n_A$	$0.93n_A$	$0.89n_A$	$0.90n_A$
A	n_A	$0.99n_A$	$0.95n_A$	$0.96n_A$
A+1	$1.06n_A$	$1.05n_A$	$1.01n_A$	$1.03n_A$
A+2	$1.12n_A$	$1.11n_A$	$1.07n_A$	$1.09n_A$

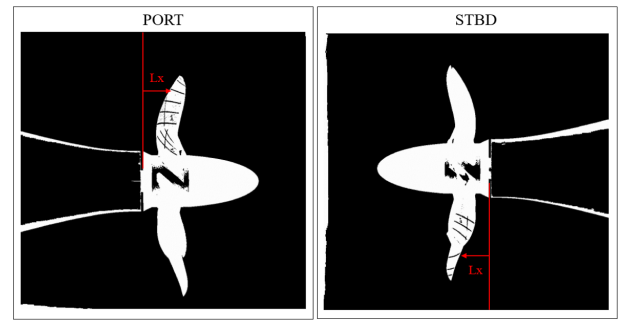


Fig. 5 Post-processed images for measuring deformation of the composite propeller

비율 γ_n 을 E16190의 실선 작동 회전수 n_S 에 적용하여 추정하였다. 상기 자항조건 도출 절차는 Kim et al. (2025)의 마하 수 상사 기반 복합재 추진기 자항조건 도출 과정과 동일하다.

3.2 복합재 추진기 변위 계측

설계된 복합재 추진기의 변형 특성 확인을 위해 수치해석과 시험을 통해 작동 하중 하에서 CFRP1과 CFRP2의 유동 방향 변형량을 비교하였다. 복합재 추진기의 유동 방향 변형량은 고정된 화각 내에서 복합재 추진기 변형 전과 후의 추진기 윤곽선 추출 정보를 기반으로 계산되었다. 계측용 이미지 예시와 계측 기준 등은 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5와 같은 고정된 화각 내에서 복합재 추진기들의 변형 전, 후 날개 윤곽선 간의 수평 방향 화소(pixel) 개수 N_p 를 확인하고, 이에 화소 당 실제 거리 L_p 를 곱하여 최종 변형량을 산출하였다. 본 연구에서 L_p 는 0.15 mm이다.

CFRP1 설계 당시 설계 정확도 검증을 위해 A knots의 유속 조건에서 설계를 위한 수치해석 조건과 동일한 회전수로 추진기가 가동될 때 CFRP1의 0.95R 위치에서의 유동 방향 변형량 추정 및 계측 결과는 Table 5와 같다. 해당 시점의 설계 단계에서는 1-way FSI 기법을 이용하여 수치해석 자본 소모를 줄이고, 고전적인 공동 시험 기법을 활용하면서도 유용한 결과를 도출하는 것이 목적이었다. 해석 및 실험 조건 또한 엄밀한 마하 수 상사 해석 기법이 정립되기 전에 선정된 것으로 복합재 추진기 자항을 위한 수조 유속과 회전수로 설정 및 구동되지 못했다. 결과적으로 CFRP1의 경우 설계 당시 지정된 조건에서 예상 변형량은 5.4 mm로 추정되었으나, 실제 시험을 통해 도출된 변형량은 1.7 mm 수준으로 상당한 괴리가 발생하였다. 이후 동일한 CFRP1 대상으로 2-way FSI 해석을 추가 수행한 결과 추정된 변형량은 1.6 mm 수준으로 동일한 조건의 실험 결과와 상당히 높은 정합성을

Table 5 Deformation of CFRP1 at the design speed with an arbitrary propeller rotational speed

Deformation		
Numerical (1-way FSI)	Numerical (2-way FSI)	Experimental
5.4 mm	1.6 mm	1.7 mm

Table 6 Deformation of the composite propellers under the design condition based on Mach number scaling

Deformation			
CFRP1		CFRP2	
Numerical	Experimental	Numerical	Experimental
–	4.2 mm	2.99	3.05

보였다. 이로부터 시험 조건 선정의 적합 여부를 떠나 수치해석 기반의 복합재 추진기 설계시 2-way FSI 해석이 필수적임을 확인할 수 있다.

Table 6은 마하 수 상사 적용 자항 조건 상에서 계측 및 계산된 복합재 추진기 날개 끝단의 유동 방향 변형량을 나타내고 있다. CFRP1의 경우 마하 수 상사가 고려된 자항 시험 조건에서의 변형량 결과는 시험 계측 결과만 존재하며 이는 4.2 mm 수준이다. 설계 단계에서부터 마하 수 상사가 고려되고 2-way FSI 해석이 적용된 CFRP2의 경우 수치해석과 시험에서 추정하는 변형량은 모두 3.0 mm 수준으로 측정 정밀도 내에서 높은 정합성을 보였다. CFRP1은 자항점에서 CFRP2 대비 유동 방향 변형이 더 많이 발생하도록 설계되었으므로 위 결과는 합리적인 결과로 판단할 수 있다.

3.3 복합재 추진기 캐비테이션 초생 속도 계측

모형시험을 통한 CIS 계측 시 날개끝 와류 캐비테이션(Tip Vortex Cavitation, TVC)을 제외한 캐비테이션의 경우 모형과 실선에서 동일한 CIS를 갖는 것으로 간주한다. 하지만 레이놀즈 수 상사가 불가한 이유로 점성의 영향이 크게 작용하는 TVC의 초생 속도는 모형시험 상 계측 결과에 추가적인 실선 확장이 요구된다(McCormick, 1962). 해당 확장은 실선과 모형선 간의 레이놀즈 수 비율에 따라 실선 TVC 발생 캐비테이션 수를 추정하여 CIS를 예측하며, 식 (2)를 따른다.

$$\frac{\sigma_{i,S}}{\sigma_{i,M}} = \left(\frac{Re_S}{Re_M} \right)^m \quad (2)$$

여기서 σ_i 는 초생 캐비테이션 수, Re 는 레이놀즈 수, m 은 모형선-실선 상관계수이다. 하첨자 S 와 M 은 각각 실선과 모형선의 물리량을 의미한다. 각 캐비테이션 유형에 대한 CIS를 추정하고 그중 가장 작은 CIS 값이 대상선과 대상 추진기에 대한 최종 CIS로 평가된다. 위 확장식을 활용하는 경우 대체로 TVC의 CIS가 가장 작은 CIS로 추정되기에 본 연구에서는 TVC의 초생을 중점적으로 확인하였다. 더불어 본 연구의 모든 시험 추진기에서 압력면 날개끝 와류 캐비테이션(Pressure Side Tip Vortex Cavitation, PSTVC)의 초생이 가장 빨리 나타났다. Fig. 6은 시험 대상 추진기들의 PSTVC 발생을 보여준다.

일반적인 금속재 추진기 대상 CIS 계측 시험은 대형공동수조 시험부 유속을 고정한 후 추진기의 회전수와 수조 내부 압력을 변경시키며 진행된다. 이 과정에서 전진계수와 캐비테이션 수의

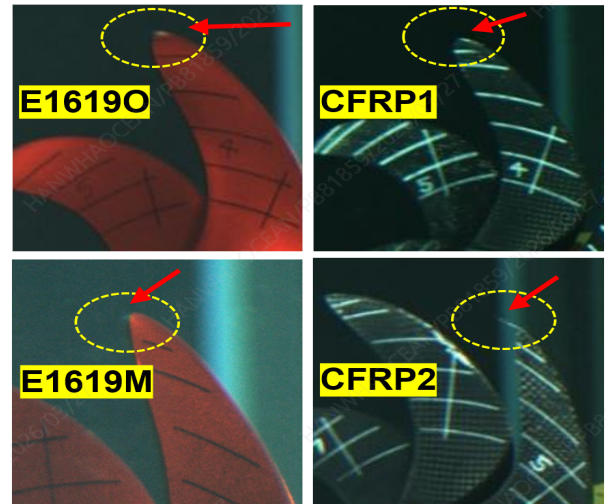


Fig. 6 Photographs of the PSTVC for each designed propeller

변화에 따른 추진기 날개 위치별 캐비테이션 발생 시점을 확인한다(Ahn et al., 2023). 하지만 복합재 추진기의 경우 실선 추진기와 모형 추진기 간 형상 변형 모드 일치를 위해 수조 유속이 시험 조건별로 변경되어야 한다. 그때의 추진기 회전수는 자항 조건 도출 시험에서 도출된 회전수로 설정되어야 한다. 이 경우 변경 가능한 요소는 수조 내부 압력이므로 지정된 유속과 회전수에서 수조 내부 압력만을 조절하여 캐비테이션 발생 시점을 확인해야 한다. 따라서 복합재 추진기의 마하 수 상사 기반 CIS 판별 작동 조건 곡선은 실선의 선속 V_S 와 회전수 기반 캐비테이션 수 σ_n 의 관계로 표현되어야 한다. σ_n 은 아래 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\sigma_n = \frac{p_M - p_{v,M}}{0.5\rho_M n_M^2 D_M^2} = \frac{p_S - p_{v,S}}{0.5\rho_S n_S^2 D_S^2} \quad (3)$$

여기서 p 는 추진기 위치의 압력, p_v 는 추진기 작동 온도에서의 증기압력, ρ 는 작동 유체의 밀도, D 는 추진기 직경이다. 캐비테이션 수는 수심에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구에서는 작동 상태의 수심을 15.5 m로 가정하였다. 모든 시험 대상 추진기들의 시험 당시 수온은 18℃ 수준으로 유지되었다.

마하 수 상사 기반의 CIS 추정 기법의 유효성 검증을 위해 E1619O와 CFRP1 대상으로 고전적인 CIS 추정과 마하 수 상사 기반의 CIS 추정을 모두 수행하였고 그 결과는 Fig. 7~8과 같다. 고전적인 CIS 추정법은 추진기 전진계수 J_A 와 전진속도 기반 캐비테이션 수 σ_A 기반 작동 조건을 활용하여 추정된다(Ahn et al., 2023). J_A 와 σ_A 는 식 (4), (5)와 같이 정의된다. 해당 식에서 V_A 는 추진기 유입 속도이다.

$$J_A = \frac{V_A}{nD} \quad (4)$$

$$\sigma_A = \frac{\sigma_n}{J_A^2} \quad (5)$$

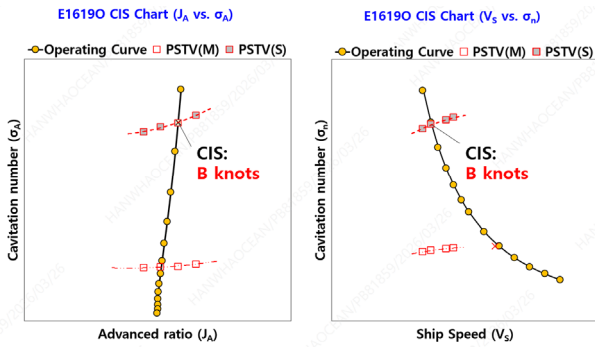


Fig. 7 Estimated CISs for E16190 (left: conventional method, right: Mach number scaling method)

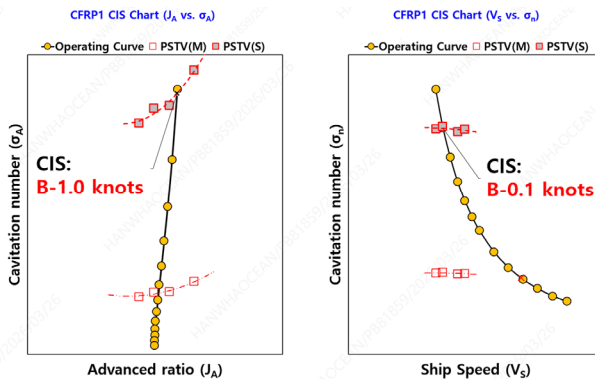


Fig. 8 Estimated CISs for CFRP1 (left: conventional method, right: Mach number scaling method)

Fig. 7에 나타난 바와 같이 금속재 추진기 E16190의 경우 마하 수 상사 적용 유무에 따라 CIS 추정법이 달라지더라도 최종적으로 동일한 CIS가 추정되었다. 이로부터 마하 수 상사 기반의 CIS 추정법의 개별적인 유효성을 확인할 수 있다. Fig. 8의 복합재 추진기 CFRP1 CIS 추정 결과의 경우 해석 기법의 마하 수 상사 적용 유무에 따라 0.9 knots의 비교적 큰 차이가 발생하였다. 이로부터 추진기 변형 모드를 고려할 수 없는 고전적인 CIS 추정법은 복합재 추진기의 CIS 추정에 유효하지 않고 마하 수 상사 기반의 CIS 추정이 필수적임을 확인할 수 있다. Fig. 9은 E1619M 및 CFRP2의 마하 수 기반 CIS 추정 결과를 나타낸다. E1619M의

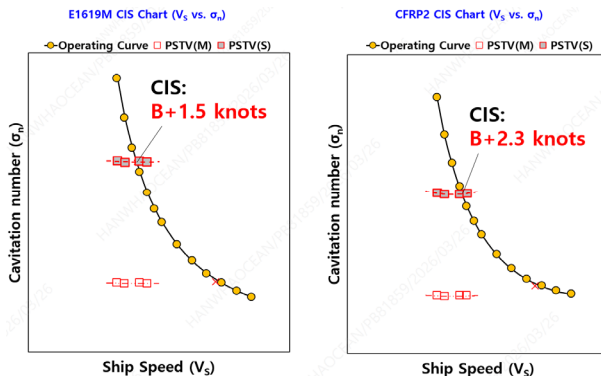


Fig. 9 Estimated CISs for E1619M (left) and CFRP2 (right) based on the Mach number scaling method

경우 E16190 날개 끝단 압력 불균형을 개선한 결과로 E16190 대비 1.5 knots의 CIS 개선이 확인된다. 작동점에서 E1619M의 형상을 갖도록 설계된 CFRP2는 E1619M 대비하여 0.8 knots의 추가적인 CIS 개선이 확인되었다. 즉, 복합재 추진기의 주요 특성인 작동 하중에 의한 동적 변형이 추진기 상 하중 분포를 개선하여 CIS 성능을 향상시키는 효과가 CFRP2에서 뚜렷하게 나타났다.

3.4 복합재 추진기 소음 예측

마하 수 상사를 고려한 시험 추진기들의 자항 조건에서 소음 계측을 수행하였다. 각 추진기가 마하 수 상사를 달성하는 수정된 유속 조건에서 소음 계측이 수행되었으며 운항 수심은 동일하게 15.5 m를 가정하였다. 소음 계측이 수행된 유속 조건은 A-2, A, A+2 knots 조건이며, 선속별 소음 특성을 비교하기 위해 추진기를 각각의 자항 조건에 해당하는 회전수로 구동하고 수조 내부 압력을 실선 작동 조건의 캐비테이션 수에 맞추어 소음 계측이 진행되었다. 실선 작동 조건의 캐비테이션 수를 맞추기 위한 수조 내부의 압력은 약 2.3 bar이다. Fig. 10은 설계 선속에서 소음 계측시험 시 추진기 상태 및 주변 환경을 나타낸다. 소음 계측시험 진행 간 시험 유속과 관계없이 허브 와류 캐비테이션(Hub Vortex Cavitation, HVC)을 비롯한 어떤 형태의 캐비테이션도 발생하지 않았다.

Fig. 11 설계 선속에서의 각 추진기별 협대역 및 1/3 옥타브 밴드의 소음 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 11(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 배경소음을 함께 표현하였으며, 이 배경소음은 추진기 소음 계측 환경과 동일한 유속 및 압력 조건에서 추진기를 가동하지 않고 계측한 소음이다. 작동점에서 동일한 형상을 갖도록 설계된 E16190과 CFRP1, E1619M과 CFRP2의 소음 계측 결과를 각각 비교해보면 복합재 추진기가 금속재 추진기 대비 전반적인 주파수 대역에서 낮은 소음 수준을 보인다. 특히, 10 kHz 대역 근방에서 두 재료의 추진기 간 두드러진 차이를 확인하였다. 이를 분석하기 위해 스트로할 수(Strouhal number, St)를 계산해본 결과 해당 구간의 스트로할 수는 0.18~0.20 근방으로 계산되었다. 이는 후류 영역에 규칙적인 교번 와류림 패턴(Von

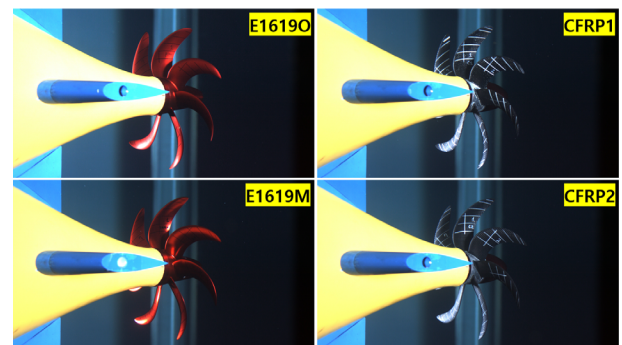


Fig. 10 Photographs of each designed propeller during noise measurements at the design speed

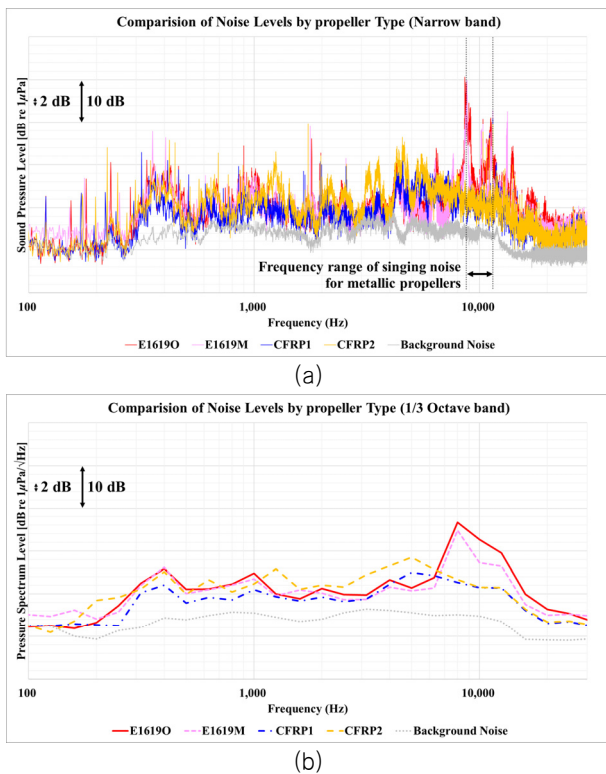


Fig. 11 (a) Narrow band and (b) 1/3 octave band pressure level for the propellers at the design operating condition

Kármán vortex street)이 형성될 가능성이 높은 구간이다. 따라서 10 kHz 근방에서 확인된 금속재 추진기들의 높은 소음 수준은 추진기 명음(Singing Noise) 현상으로부터 기인된 것으로 추정된다. 스트로할 수는 식 (6)과 같이 정의된다. 여기서 f 는 주파수, d 는 와흘림이 발생하는 추진기 끝단 뒷날 두께, V_P 는 추진기 선속도(linear velocity)이다.

$$St = \frac{fd}{V_P} \quad (6)$$

한편, Fig. 11(a)의 배경소음과 추진기 구동 시 소음을 비교해 보면, 일부 주파수 대역에서는 그 차이가 3 dB 미만으로 나타나는 계측 유효성 부족 구간이 존재한다. 그러나 금속재 추진기와 복합재 추진기의 소음 수준을 비교하기에는 충분히 유의미한 결과로 판단된다. 특히 추진기 가동 시 그 차이가 확연히 드러나는

Table 7 Average overall acoustic noise levels for each propeller operating condition

Propeller	Submarine speed		
	A-2 knots	A knots	A+2 knots
E1619O	N-1.8 dB	N dB	N+2.3 dB
E1619M	N-3.4 dB	N-1.8 dB	N+9.1 dB
CFRP1	N-6.3 dB	N-6.0 dB	N-3.0 dB
CFRP2	N-4.8 dB	N-3.4 dB	N+4.4 dB

금속재 추진기와는 달리 복합재 추진기는 배경소음을 소폭 상회하는 수준의 정숙성을 보인 것으로 분석된다. 더불어, 명음 현상에 의한 소음으로 추정되는 주파수 대역의 소음 성분을 제외하더라도 복합재 추진기의 평균 소음 준위는 금속재 추진기보다 낮게 계속되었다.

Table 7은 각각의 시험 추진기에 대해 전체 주파수 영역의 평균 소음 준위를 시험 조건별로 도출한 결과이다. E1619O 대비 CFRP1의 평균 소음 준위 감소량은 시험 조건에 따라 4.5~6.0 dB 범위이며, CFRP2는 E1619M 대비 1.4~4.7 dB의 평균 소음 감소가 확인되었다. 즉, 설계점 외의 영역에서도 복합재 추진기의 소음 저감 특성이 확인되며, 또한 시험 조건과 관계없이 CFRP2 대비 CFRP1의 소음 감소 수준이 더 큰 경향을 보인다. 이는 CFRP2 대비 더 큰 변형이 발생하도록 설계된 CFRP1의 동

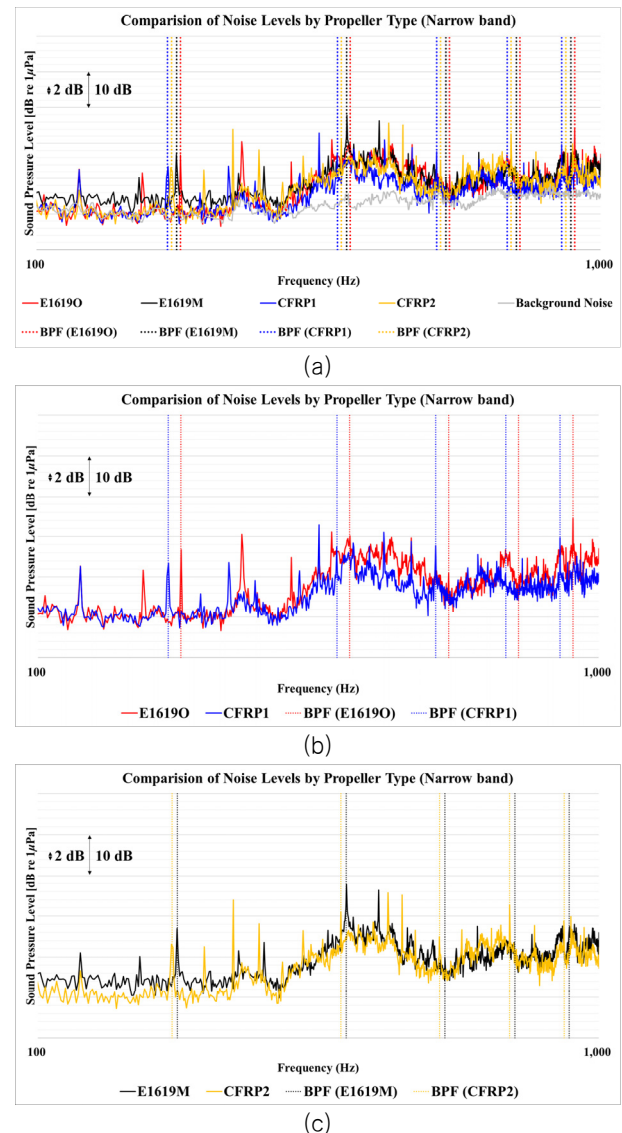


Fig. 12 Comparison of narrow band noise spectra and BPF(1st~5th) components by propeller type; (a) all models and background noise, (b) E1619O vs. CFRP1, (c) E1619M vs. CFRP2

적 거동 특성에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 복합재 추진기의 주요 특성인 작동 하중에 의한 동적 변형이 추진기 소음 감소에 효과가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 추진기별 소음 특성을 정밀하게 분석하기 위해 Fig. 11의 전체 계측 주파수 대역 중 100~1,000 Hz 대역에 대한 소음 스펙트럼과 날개통과주파수(Blade Passing Frequency, BPF) 성분을 분석하였다. Fig. 12에서 확인할 수 있듯이, 모든 추진기 모델에서 1~5BPF에 해당하는 주파수 성분이 비교적 뚜렷한 토널(Tonal) 형태로 나타나고 있다. Fig. 12(b) 및 Fig. 12(c) 비교 관점에서 전반적으로 고차 BPF 성분으로 갈수록 에너지 크기가 상대적으로 감소하는 경향이 나타나며, 이로부터 복합재 추진기의 소음 저감 성능을 일정 부분 확인할 수 있다.

한편, BPF 성분 이외에도 추진기별 소음 패턴을 살펴보면 100~1,000 Hz 대역 전반에 걸쳐 다수의 토널 성분들이 관찰된다. 이러한 성분들은 Fig. 11의 배경소음 분포 패턴을 고려했을 때 공동수조 내 구동 시스템의 기계적 소음이 추진기 날개면에서 산란된 결과와 유동 소음에 의한 날개의 응답이 복합적으로 나타난 것으로 추정된다. 특히 복합재 추진기의 금속재 추진기 대비 낮은 강성에 의해 저주파 대역에서 유체-구조 연성으로부터 미세한 조화 성분들이 추가적으로 발생할 수 있겠지만 Fig. 12(b)와 (c)의 비교에서 확인할 수 있듯이 전반적인 광대역 소음 레벨은 금속재와 동등하거나 더 낮은 수준을 유지하고 있어 수중방사소음 저감 측면에서의 상대적 우위를 확인할 수 있다.

4. 결 론

고전적인 금속재 추진기가 아닌 유탄성 특성을 갖는 복합재 추진기와 관련된 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 특히 단순한 형상의 복합재 날개를 대상으로 수행된 기초연구뿐 아니라 복잡한 3차원 유동장 내에서 복합재 추진기가 보이는 동적 변형 특성과 그에 따른 유체역학적 성능을 설계 단계에서 평가하고 그 유효성을 검증하고자 하는 시도 또한 진행되고 있다. 대표적으로 고전적인 프루드 수 상사가 아닌 마하 수 상사 기반의 수치해석 및 모형시험의 필요성이 지속적으로 제기되고 있으며, 그에 따라 마하 수 상사를 기반으로 하는 성능 추정 기법의 유효성이 일부 입증된 바 있다. 하지만 복합재 추진기 설계를 위한 유체-구조 연성 수치해석 기법의 유효성을 실제 모형시험 결과로 검증한 연구는 다소 부족한 실정이다. 나아가, 복합소재의 유탄성 특성을 적극적으로 성능 향상 요소로써 활용할 수 있는 함정용 추진기 분야에서는 관련 연구 결과가 극히 드물다.

본 연구는 수중함의 저항, 추진, 공동 특성을 모두 확인할 수 있는 대형공동수조 설비로부터 시험 결과를 취득하여 복합재 추진기 설계 기법의 유효성을 검증하고, 복합재 추진기의 공동 및 소음 특성을 분석하고자 하였다. 복합재 추진기 설계를 위한 여러 유체-구조 연성 해석 방식의 설계 유효성은 실제 복합재 추진기의 3차원 유동장 내 변형량 계측 결과를 기반으로 평가되었다. 또한, 수치해석 상 추정되는 복합재 추진기의 변형량과 실제 시

험 상 발생한 변형량 비교를 통해 다양한 해석 기법 중 복합재 추진기 설계에 활용 가능한 해석 기법의 유효성을 확인하였다.

이외에도 마하 수 상사를 기반으로 수중함용 복합재 추진기의 캐비테이션 초생 속도 평가 절차를 수립하고, 금속재 추진기 대상 평가 결과와 비교하여 그 유효성을 검증하였다. 해당 과정에서 복합재 추진기의 공동 성능을 평가하기 위해서는 마하 수 상사의 적용이 필수적임을 확인하였고, 마하 수 상사 기반의 모형 시험을 통해 복합재 추진기의 동적 변형 특성이 캐비테이션 초생을 지연시키는 것을 확인하였다.

아울러 마하 수 상사 기반 작동 조건 별 소음 계측 시험을 통해 금속재 추진기와 복합재 추진기 간의 소음 특성 및 성능을 비교하였으며, 복합재 추진기는 소음 성능 또한 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 확인된 금속재 추진기 대비 복합재 추진기의 소음 저감 결과에 대해, 복합재 추진기 날개의 작동 중 변형에 따른 유체 기인 소음 저감 효과와 재료의 감쇠 특성에 따른 구조진동 기인 소음 저감 효과 간의 기여도 배분은 명확히 규명되지 않았다. 따라서 향후 배경소음에 대한 정량적 비교 및 검토와 함께, 상기 각 요소의 기여도를 체계적으로 분석하기 위한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로 본 연구에서는 대형공동수조 설비 활용을 기반으로 수중함용 복합재 추진기 공동 및 소음 특성의 엄밀한 평가 절차를 제시하였고 그 유효성을 검증하였다. 해당 평가 기법은 수중함용 복합재 추진기에 국한되지 않고 수상함 및 일반 상용 선박 대상 복합재 추진기의 성능 평가에도 유효할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRIT-CT-22-016).

References

- Ahn, J.W., Kim, G.D., Paik, B.G., Park, Y.H. and Seol, H.S., 2023. Study of the Cavitation Inception Speed (CIS) improvement through the propeller design and the stern appendage modification. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(4), pp.231-239.
- Ashkenazi, Y., Golfman, I., Rezhkov, L. and Sidorov, N., 1974. Glass-fiber-reinforced plastic parts in ship machinery. *Sudostroyenniye Publishing House*.
- Cansdale, R., 1973. *An aeroelastic model helicopter rotor*. Technical report of Aeronautical Research Council Current Papers C.P. No. 1288.
- Choi, H.Y., Hah, Z.H., Kang, B.G., Kim, S.H., Lee, H.S. and Lee, D.J., 2024. Development of low noise composite marine propeller. *Proceedings of 2024 Fall Conference of the Korean Society for Composite Material*, pp.110.

- Choi, Y.S., 2023. *Development of low-noise composite propeller fluid-structure interaction analysis and design system using machine learning*. Ph.D. Seoul National University.
- Di Felice, F., Felli, M., Liefvendahl, M. and Svennberg, U., 2009. Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller. *1st International Symposium on Marine Propulsors*. Trondheim, Norway
- Friedmann, P., 2004. Aeroelastic scaling for rotary-wing aircraft with applications. *Journal of Fluids and Structures*, 19(5), pp.635–650.
- Groves, N., Huang, T. and Chang, M., 1989. *Geometric characteristics of DARPA suboff models david taylor research center report*, Report No DTRC/SHD-1298-01.
- Hunt, G., 1973. *Similarity requirements for aeroelastic models for helicopter rotors*. Tech report of Aeronautical Research Council Current Papers C.P. No. 1245.
- ITTC, 2005. *Final report and recommendations to the 24th ITTC*, ITTC
- Kim, S.H. and Lee, H.S., 2023. A numerical study on propeller open-water characteristics of model-scaled composite propellers using mach number scaling method. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*.
- Kim, S.H., Park, J.Y., Lee, H.S., Choi, H.Y., Jeong, H.S., Seol, H.S., and Kim, M.J., 2025. A study on propulsion performance and cavitation test method of composite propellers using a large cavitation tunnel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 62(3), pp.179–186.
- McCormick, B.W., 1962. On cavitation produced by a vortex trailing from a lifting surfaces. *Journal of Basic Engineering*, pp.369–379.
- Motley, M. and Young, Y.L., 2012. Scaling of the transient hydroelastic response and failure mechanisms of self-adaptive composite marine propellers. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012(1), 632856.
- Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P. and Challis, K., 2001. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structure*, 53, pp.21–41.
- Nakashima Propeller Ltd., 2015. *Benefits of Carbon Composite Marine Propeller* [Online] (Updated 1 November 2015) Available at: https://www.classnk.or.jp/http://www.classnk-d.com/assets/pdf/katsudou201511_D.pdf. [Accessed 25 November 2024]

- ThyssenKrupp, 2011. Acoustically optimized propeller from composite materials. *Techforum*, 1, pp.59–63.
- Young, Y.L., 2010. Dynamic hydro-elastic scaling of self-adaptive composite marine rotors. *Composite Structures*, 92, pp.97–106.

Authorship Contribution Statement

Jahoon Moon: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Seungjin Jeong:** Data curation, Investigation, Methodology, Software, Validation, Writing – review & editing; **Jae-Hyuk Lee:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing – review & editing; **Changhwan Jang:** Conceptualization, Data curation, Investigation, Methodology, Software; **Youngjin Kim:** Formal analysis, Validation, Visualization; **Jun-Hyeok Lee:** Conceptualization, Methodology, Supervision; **Myoungjin Kim:** Funding acquisition, Resources; **Jaekwon Jung:** Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

