



대형공동수조를 활용한 복합재료 프로펠러의 추진 성능 및 공동 성능 시험법에 대한 연구

김성훈^{1,†}·박정용¹·이형석¹·최희영²·정홍석³·설한신³·김명진⁴
HD현대중공업 선박해양연구소¹
HD한국조선해양 제조혁신랩²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 함정공학연구센터³
한국카본 방산사업본부⁴

A Study on Propulsion Performance and Cavitation Test Method of Composite Propellers Using a Large Cavitation Tunnel

Sunghoon Kim^{1,†}·Jeongyong Park¹·Hyoungsuk Lee¹·Heeyoung Choi²·Hongseok Jeong³·Hanshin Seol³·Myoungjin Kim⁴
HD Hyundai Heavy Industries¹
HD Korea Ship & Ocean Engineering²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering³
Hankuk Carbon⁴

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 traditional metallic marine propellers, which primarily consider hydrodynamic scaling, composite propellers require consideration of hydro-elastic scaling, accounting for both hydrodynamic forces and the deformation of the propeller blades. Model tests using by Mach number scaling, which must be performed at the same flow velocity of full-scale propellers, for hydro-elastic scaling of the composite propeller is conducted at the large cavitation tunnel (LCT). The deformation and performance of the composite propellers is influenced by flow velocity, necessitating tests under different velocities. This study presents the results of propeller open-water tests conducted across a range of velocities to assess the effect of the velocity on the propeller open-water characteristics. Additionally, a self-propulsion test of the composite propeller is conducted in the LCT. Based on the results, new prediction methods are proposed to estimate the full-scale performance of the composite propeller, and then applied to predict the full-scale performance of the composite propeller in comparison with that of the metallic propeller. This study also introduces a cavitation test method of the composite propeller based on the Mach number scaling. Using this method, the cavitation test is conducted to evaluate the cavitation performance of the composite propellers. Future work will focus on validating the proposed test method by comparing and analyzing the measured data of full-scale.

Keywords : Composite propeller(복합재료 프로펠러), Propulsion test(추진 성능 시험), Cavitation test(공동시험), Mach number scaling (마하수 상사), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형공동수조)

1. 서론

복합재료 프로펠러는 금속재료 프로펠러에 비해서 추진 성능이 뛰어나며, 가볍고 진동, 소음 성능이 우수할 뿐 아니라 캐비테이션 저감 효과가 우수하다고 알려져 있다 (Ashkenazi et al., 1974; Mouritz et al., 2021). 이러한 장점으로 90년대에 오토와 같은 레저용 선박에 주로 적용되었고, 2000년대에는 저소음/진동 특성을 기반으로

네덜란드, 독일, 영국 등에서 수중함 등 특수선 분야에서 주로 적용되었다 (ThyssenKrupp, 2011; ITTC, 2005).

높은 연료 효율과 축계 경량화를 요구하는 상선까지 연구가 확대되었으며, 일본의 니카시마 프로펠러는 다년간의 연구를 통하여 2014년 세계 최초로 직경 2m급의 복합재료 프로펠러의 상용화에 성공하였다. 니카시마 프로펠러는 일본 내 5척 이상의 화물선과 페리선과 같은 중소형 선박에 복합재료 프로펠러를 적용한 바 있다.

실선 운항에서 연비 6% 향상, 기관실 진동 40% 감소 등 우수한 추진 성능과 진동, 소음 성능이 있다고 주장하고 있다 (Nakashima Propeller Ltd., 2015). 국내에서는 HD현대 그룹에서 터그 보트에 2m 급 복합재료 프로펠러 설계, 제작하여 실증한 바 있다 (Choi et al., 2024).

하지만, 이러한 복합재료 프로펠러의 장점에도 불구하고, 제작, 설계 분야에서 뛰어넘어야 할 기술적 도전과제가 많은 상태다. 특히, 복합재료 프로펠러의 모형시험법에 대한 연구가 많이 부족하다. 유체역학적 상사만 만족하면 되는 금속재료 프로펠러와 달리, 복합재료 프로펠러는 하중에 따라 형상 변화가 발생하기 때문에 유체역학적 상사 뿐 아니라 형상 변형까지 고려된 유탄성학적 상사법이 요구된다.

유체-구조 연성해석 (fluid-structure interaction, FSI)의 검증을 위해서 몇몇 연구자들이 복합재료 프로펠러에 대해서 모형시험을 수행한 바 있다. Maljaars et al. (2018)는 모형 복합재료 프로펠러를 설계, 제작하여 공동수조에서 모형시험을 수행하고, 디지털 이미지 상관관계 분석 (digital image correlation, DIC)을 통해 복합재료 프로펠러의 변위를 계속하였다. 계속된 변위를 통해 경계요소법 (boundary element method, BEM)과 유한요소법 (finite element method, FEM) 연성해석과 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)과 FEM 연성해석의 결과 검증에 활용하였다. Kawakita (2019)는 하이 스쿠 프로펠러 (high-skewed propeller)를 복합재료 프로펠러로 제작하고, 부하에 따른 프로펠러 단독성능시험을 수행하고 변동압력을 계속하여 복합재료 프로펠러의 유체역학적 특성을 실험적으로 확인하였다. 또한, Rokvam et al. (2021)는 날개 하나의 길이가 600mm인 프로펠러 날개를 CFRP (carbon fiber reinforcement plastic)로 제작하고, DIC를 통해 정적 하중을 가해진 상태에 대한 변위를 계속하여, FEM 해석 결과와 비교하였다.

항공, 풍력 터빈과 같은 분야에서는 비교적 오래전부터 헬리콥터의 로터 (rotor)나 풍력 터빈의 로터에 복합재료를 적용해왔다. 또한, 복합재료 로터를 실험실 단계에서 성능 시험을 위해 모형시험법을 개발하여 사용해왔다 (Cansdale, 1973; Friedmann, 2004; Hunt, 1973; Wolowicz et al., 1979). 대표적인 방법으로는 형상 변화가 고려되지 않은 강체 모형을 이용한 방법과 형상변화가 고려된 프루드 수 (Froude number) 상사와 마하 수 (Mach number) 상사가 있다. 항공, 풍력 터빈의 연구 내용을 이용하여 Young (2010)과 Motley et. al (2012)은 프루드 수 상사와 마하 수 상사를 활용한 복합재료 프로펠러 모형시험의 가능성 대해서 확인한 바 있다. 프루드 수 상사는 금속 프로펠러와 동일하게 프루드 수를 일치시켜 모형 시험을 수행하기 때문에, 자유 수면 효과를 고려할 수 있는 예안수조에서의 저항 시험을 가능하다. 또한, ITTC 78 방법 등 기존에 정립된 실선 성능 추정 방법을 통해 실선 프로펠러의 추진 성능을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 모형시험 시 실선 프로펠러와 동일한 변형이 재현되기 위해서는 실선 프로펠러와는 물성치가 다른 재료와 적층 설계가 필요하다. 이를 위해 프루드 수를 만족시키는 모형 복합재료 프로펠러의 재료는 실선 복합재료 프로펠러의 재료와 밀도는 동일하게 유지하면서 탄성계수가 모형의 축적비에 따라 달라져야 하기 때문에, 프루드 수를 만족시킬 수 있는 재료의 수급이 불가능한 상황이다.

반면, 마하 수 상사법은 모형 복합재료 프로펠러의 재료와 적층

설계가 실선 복합재료 프로펠러의 재료와 동일하게 사용하고, 시험 유속 조건을 실선과 동일한 조건을 맞추어 수행하는 방법이다. 따라서, 모형 제작을 위한 재료 수급 문제가 없기 때문에 현실적으로 가능한 유일한 모형시험 상사법이다. 다만, 실선 크기의 복합재료 프로펠러와 동일한 유속에서 작동해야 동일한 변형이 발생하여 유탄성학적 상사를 만족할 수 있다. 따라서, 실선 유속과 동일한 유속에서 동작 가능한 시험 장비와 고용량 동력계가 필요한 단점이 있다. 또한, 프루드 수가 일치하지 않기 때문에 기존의 저항 시험 방법을 사용하여 실선 복합재료 프로펠러의 추진 성능을 추정할 수 없다.

Young (2010)은 마하 수 상사법에 대해서 BEM-FEM 연성해석을 수행하여 마하 수 상사법의 가능성을 확인하였고, Kim et al. (2023)는 BEM-FEM 연성해석 뿐 아니라 점성영향을 고려한 복합재료 프로펠러에 대해서 CFD-FEM 연성해석을 통해 단독 성능 해석을 수행하였다. 또한, 마하 수 상사법을 통한 프로펠러 단독 성능 모형시험법의 가능성을 확인하고, 모형 복합재료 프로펠러의 단독 성능 실선 확장 방법을 제안하였다.

복합재료 프로펠러에 대한 시험적인 연구는 수치해석을 검증에 위한 변위 계측에 대한 연구와 BEM-FEM, CFD-FEM 연성 해석을 통해 마하 수 상사법의 가능성을 확인한 연구 수준에 그쳐 있다. 본 연구에서는 마하 수 상사법을 활용하여 복합재료 프로펠러의 유탄성학적 상사를 만족하는 모형시험을 개발하여 복합재료 프로펠러의 추진성능 시험법과 공동시험법을 개발하고자 한다. 빠른 유속에서 시험할 수 있는 대형공동수조(Large Cavitation Tunnel, LCT)에서 복합재료 프로펠러의 단독성능시험과 저항성능시험을 수행하였다. 또한, 그 결과를 이용하여 복합재료 프로펠러의 실선 성능을 추정할 수 있는 추정법을 새롭게 제안하였고, 마하 수 상사를 통해서 유탄성학적 상사를 만족하는 공동시험 방법을 개발하였다.

2. 대상선 및 대상 프로펠러

대형공동수조에서 복합재료 프로펠러의 추진 성능시험 및 공동 시험을 수행하기 위해 1MW급 친환경기술 해상실증선박 (K-GTB)을 대상선으로 선정하였다. K-GTB의 주요 제원은 Table 1에 정리되어 있다. 대상 복합재료 프로펠러는 기존 금속 프로펠러의 형상을 이용하여 프로펠러 설계점에서 동일한 형상을 가지도록 역설계를 수행하였다. 설계에 사용된 방법은 Lee (2018)가 제시한 BEM-FEM

Table 1. Principal dimensions of K-GTB

Item	Value
Length overall [m]	82.6
Breadth [m]	18.0
Draught [m]	4.0
Design speed [knots]	12.5
Number of propellers	2
Propeller diameter [m]	1.9
Maximum current rating (MCR)	1,100 kW X 395.0 RPM
Nominal current rating (NCR)	900 kW X 381.4 RPM

Table 2 Main particulars of composite propeller

Item	Value
No. of blades	4
EAR	0.55
Hub Ratio	0.165
Model Diameter [mm]	240.0
Mean pitch ratio	0.66
Total Skew [°]	31.9

연성해석을 통해 NCR 조건에서 금속 프로펠러와 동일한 형상이 되도록 설계하였다. BEM-FEM 연성해석 기법은 프로펠러 날개 끝 부근에 압력을 과도하게 예측하는 문제를 보완하기 위해 Maljaars et al. (2018)가 제안한 tip correction model을 적용하였다. 구조해석은 상용 프로그램인 Abaqus 6.14를 이용하여 계산을 수행하였다. FEM 해석을 위해 SC8R continuum shell 격자를 이용하였고, 적층 모델은 적층 근사모델 (Lee, 2018)을 사용하였다. 해석에는 6,400개의 구조 요소를 사용하였다. 프로펠러가 회전, 변형하면서 발생하는 원심력과 코리올리 힘의 영향도 해석에 반영하여 계산을 수행하였다. BEM-FEM 연성해석은 분할 연성 2-way (iterative) coupled 해석방법을 사용하여 날개의 변형이 수렴할 때까지 계산을 반복 수행하였다. 또한, 해석의 안정성을 확보하기 위하여 Aitken dynamic relaxation 기법 (Küttler and Wall, 2008)을 적용함으로써 계산의 수렴성을 향상하였다. Table 2에 설계된 복합재료 프로펠러의 주요 제원이 정리되어 있다. 모형 복합재료 프로펠러는 마하 수 상사에 따라, 실선 복합재료 프로펠러와 동일한 복합재료와 적층 설계 형상을 적용하여 제작하였다.

3. 복합재료 프로펠러 단독 성능 시험

Fig. 1은 선박해양플랜트연구소의 대형공동수조 시험부에 설치된 프로펠러 단독 성능 시험용 동력계와 복합재료 프로펠러가 설치된 모습이다. 복합재료 프로펠러는 하중에 따라 날개의 변형이 다르게 발생하게 되기 때문에, 유속별로 프로펠러 단독성능 시험을 수행하여야 한다. 또한, 단독 시험도 마하 수 상사에 따라 실선 프로펠러와 동일한 유속에서 모형시험을 수행하였다. K-GTB의 실선 운항 속도를 고려하여 단독 성능 시험의 유속 조건은 A, A + 1.5, A + 3.0 노트



Fig. 1 H41 dynamometer for POW test

세 조건으로 결정하였다. H41 동력계 용량을 고려하여 전진비는 0.35 ~ 0.75까지 단독성능 시험을 수행하였다. Fig. 2와 3은 복합재료 프로펠러의 전진비 (advanced coefficient, J) 추력계수(K_T)와 토크 계수 (K_Q)를 나타낸다. 특히, 하중이 많이 걸리는 전진비 0.35 ~ 0.5에서는 유속이 높을수록 하중이 더 많이 발생하여 날개의 변형이 더 발생하여 추력과 토크가 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 레이놀즈 수의 영향으로 인해 유속이 증가하면 마찰 저항계수가 상대적으로 감소하고, 그에 따라 추력계수와 토크계수가 증가한다. 반대로 유속이 감소하면 마찰 저항계수가 증가하며, 이에 따라 추력계수와 토크계수는 감소할 수 있다. 이러한 증감의 정도는 기존 유속의 레이놀즈 수가 속한 유동 영역(층류, 천이, 난류)에 따라 달라질 수 있다.

유속별로 프로펠러의 피치가 변하기 때문에, 식 (1)에서와 같이 유속별로 단독성능 실선 확장을 위한 모형-실선 추력 계수 차이 (ΔK_T)가 달라지게 된다.

$$\Delta K_T = -\Delta C_D \cdot 0.3(P/D + \Delta P/D_{CP})(c \cdot Z/D) \quad (1)$$

$$\Delta K_Q = \Delta C_D \cdot 0.25(c \cdot Z/D) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 ΔC_D 는 실선-모형 프로펠러의 항력계수 차이를 뜻한다. P/D 는 프로펠러의 70% 반경에서의 피치비이며, $\Delta P/D_{CP}$ 는 복합재 프로펠러가 하중이 가해졌을 때 발생하는 70% 반경에서의 피치비 차이를 나타낸다. c 는 70% 반경에서의 코드(chord)이며, Z 와 D 는 프로펠러의 날개 수와 직경을 뜻한다.

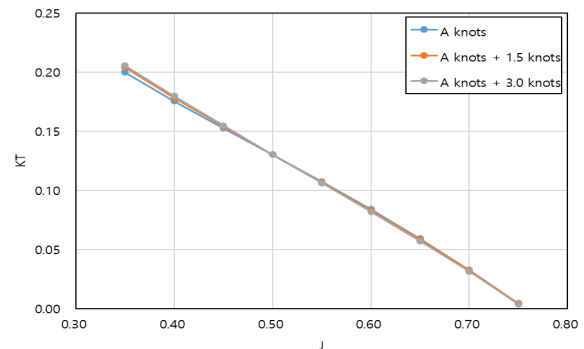


Fig. 2 Thrust coefficient of composite propeller

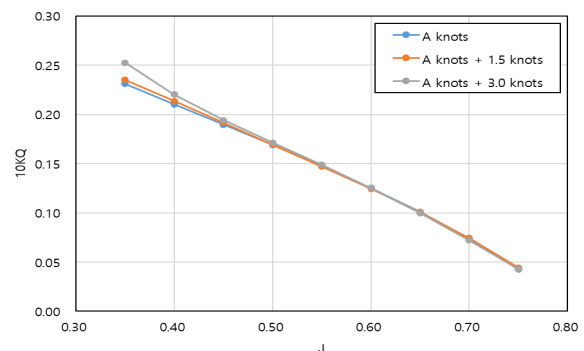


Fig. 3 Torque coefficient of composite propeller

복합재료 프로펠러의 단독성능 모형시험을 통해 매번 형상 변화를 예측하고 예측된 양을 이용하여 ΔK_T 를 구하는 것은 비용과 시간이 많이 소요된다. 따라서, 식 (1)의 $\Delta P/D_{CP}$ 를 모형시험에서 예측된 아래 식 (3), (4)를 통해 간단하게 하고자 한다. 먼저, ΔK_T 를 변형 전의 프로펠러 형상에 의한 부분($\Delta K_{T,R}$)과 형상 변화로 생기는 부분 $\Delta K_{T,CP}$ 으로 분리하고, $\Delta K_{T,CP}$ 는 식 (4)를 이용하여 근사적으로 구하는 방법을 제시하고자 한다. 프로펠러의 P/D 가 커지면 K_T 가 증가하고 P/D 가 감소하면 K_T 가 감소하는 상관 관계를 반영하여, 근사식을 도출하였다.

$$\Delta K_T = \Delta K_{T,R} + \Delta K_{T,CP} \quad (3)$$

$$\Delta K_{T,CP} = \frac{K_{T,CP} - K_T}{K_T} \Delta K_{T,R} \quad (4)$$

식(4)에서의 K_T 는 금속 프로펠러의 해당 유속, 전진비에서의 예측된 추력계수 값이며, $K_{T,CP}$ 는 복합재 프로펠러의 해당 유속, 전진비에서의 예측된 추력계수 값이다. 본 연구에서 사용된 프로펠러의 축척비가 약 7.9으로 터널에서 수행된 프로펠러의 단독 성능 시험의 레이놀즈 수와 실선 프로펠러의 레이놀즈 수가 큰 차이가 없어 프로펠러의 실선 보정량이 무시할 만큼 작게 발생하였다. 따라서, 모형, 실선 프로펠러의 단독 성능 곡선이 동일하였다.

4. 복합재료 프로펠러 저항시험 및 실선성능 추정법

마하 수 상사법은 모형 복합재료 프로펠러의 재료와 적층 설계가 실선 복합재료 프로펠러와 동일하게 사용할 수 있고, 시험 유속 조건을 실선과 동일한 조건을 맞추어 수행하는 방법이다. 예인 수조에서 시험을 수행하기엔 너무 유속이 빠르며, 프루드 수를 만족하지 않기 때문에, 예인 수조에서 성능 시험을 수행하기가 어렵다. 복합재료 프로펠러의 추진 성능 시험은 빠른 유속에서 시험이 가능한 선박 해양플랜트 연구소의 대형공동수조에서 수행하였다. Fig. 4는 대형 공동수조 시험부에 설치된 K-GTB의 모형 선박이 설치된 모습이다.

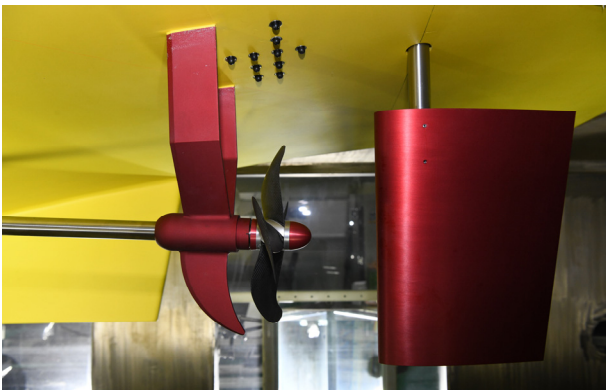


Fig. 4 Model ship and propeller of K-GTB installed in LCT

본 연구에서 제시한 복합재료 프로펠러의 저항 시험 절차는 다음과 같이 진행된다. 먼저, 복합재료 프로펠러의 설계점에서 변형된 형상으로 금속 프로펠러를 제작하고, 금속 프로펠러의 예인수조에서 프로펠러 단독 성능 시험 및 저항 성능 시험 수행한다. 수조 저항 시험으로부터 얻은 금속 프로펠러의 실선 성능 정보를 이용하여, 식 (5), (6)과 같이 마하 수 상사에 맞게 캐비테이션 터널에서 저항 시험을 수행할 시험 조건인 실선 회전수 n_s 와 추력 계수 K_T 를 계산한다.

$$n_{mach} = \lambda \cdot n_s \quad (5)$$

$$T_{mach} = K_T \rho n_{mach}^2 D_{mach}^4 \quad (6)$$

대형공동수조에 저항시험과 동일하게 선체, 프로펠러, 방향타와 부가물을 설치하고, 마하 수 상사가 만족하도록 금속 프로펠러를 마하수 상사를 만족하는 모형 프로펠러의 회전수 n_{mach} 에 맞게 회전시키고, 추력이 마하수 상사로 계산된 추력 T_{mach} 이 되도록 터널의 유속 조건을 조절한다. 이 때의, 금속 프로펠러의 토크 Q_{mach} 를 예측한다. 금속 프로펠러를 시험부에서 제거하고 복합재료 프로펠러를 설치한다. 복합재료 프로펠러를 설치한 터널의 유속 조건을 금속 프로펠러에서 찾은 터널의 유속 조건이 되도록 조절한다. 그 후, 복합재료 프로펠러의 회전수를 조절하여, T_{mach} 이 되도록 한다. 선박의 저항을 터널에서는 예측할 수 없기 때문에, 금속 프로펠러와 추력 감소계수 (thrust deduction, t)가 동일하다고 가정을 하였다. 복합재료 프로펠러의 T_{mach} 가 되면, $n_{mach,CP}$ 와 $Q_{mach,CP}$ 를 예측한다.

터널에서 구한 T_{mach} , $Q_{mach,CP}$ 와 $n_{mach,CP}$ 를 이용하여, 복합재료 프로펠러의 2개의 실선 성능 확정법을 개발하였다. 첫 번째 실선 성능 추정법은 실선 성능 직접 보정법이다. 식 (7) - (9)에서와 같이, 금속 프로펠러와 복합재료 프로펠러의 회전수, 토크의 상대 비를 이용하여 실선 프로펠러의 회전수, 토크에 직접 보정하여 실선 성능 계산한다.

$$T_{S,CP} = T_S \quad (7)$$

$$Q_{S,CP} = \gamma_Q Q_S \quad (8)$$

$$n_{S,CP} = \gamma_n n_S \quad (9)$$

여기에서 T_S 와 $T_{S,CP}$ 는 금속 프로펠러와 복합재 프로펠러의 실선 추력이며, Q_S 와 $Q_{S,CP}$ 는 금속 프로펠러와 복합재 프로펠러의 실선 토크를 뜻한다. 그리고, γ_Q , γ_n 은 모형시험에서의 복합재 프로펠러와 금속 프로펠러의 토크 비, 회전수 비 뜻한다. 또한, n_S 와 $n_{S,CP}$ 은 각각 실선 금속 프로펠러와 복합재 프로펠러의 회전수를 뜻한다.

Fig. 5에서와 같이, 역으로 선각효율 (hull efficiency, η_H), 프로펠러 상대회전효율 (propeller relative rotative efficiency, η_R), 실선 프로펠러 단독 효율 (propeller open-water efficiency, $\eta_{O,S}$)을 계산한다. 추력일치법 (thrust identity)를 통해 얻은 추력계수 (K_{TS})에 해당하는 전진비 (J_S)와 유속과 회전수 관계를 통해 구한 전진비(J_S)를 이용하여유효 반류비 (wake fraction, w_{TS})을 계산한다.

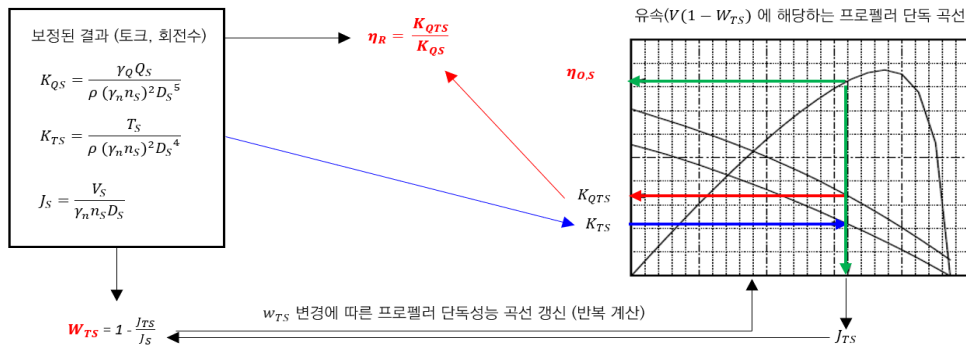


Fig. 5 Prediction method of performance for composite propeller by direct correction to full scale data

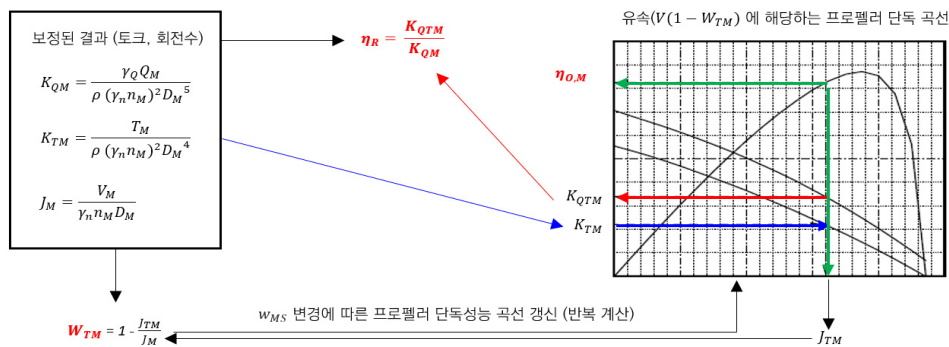


Fig. 6 Prediction method of performance for composite propeller by direct correction to model test data

자항시험에서 얻은 토크 계수(K_{QS})와 프로펠러 단독 성능 곡선에서 추력 일치법을 얻은 토크 계수 (K_{QTS})를 이용하여, 복합재료 프로펠러의 η_R 를 구할 수 있다. 이 때, 3개의 유속에서 수행된 프로펠러 단독 성능 곡선을 자항 시험의 속도별로 내삽하여, 프로펠러에 유입되는 속도 $V(1-w_{TS})$ 에 맞게 계산한다. 자항 계수를 구하면서, w_{TS} 가 변경되기 때문에 수렴될 때까지, 속도 $V(1-w_{TS})$ 에 해당하는 프로펠러 단독 곡선을 갱신하면 반복 계산을 한다. 해당 절차는 Fig. 5에 나타나 있다. 실선 회전수와 토크를 보정하는 실선 성능 직접 보정법은 실선 복합재와 모형 복합재료 프로펠러의 회전수가 마하 수 상시를 정확하게 상사된다.

두 번째 실선 성능 추정법은 예인 수조 시험에서 구한 모형 시험값을 보정하는 방법이다. 실선 성능 직접 보정법과 유사하게, 식 (10)-(12)을 이용하여 금속 프로펠러와 복합재료 프로펠러의 회전수, 토크의 상대 비를 이용하여 모형 프로펠러의 회전수, 토크에 직접 보정하여 모형 시험 값을 보정하여, 예인 수조 시험에서의 복합재료 프로펠러의 모형 시험 결과 값을 구한다. 추력일치법을 통해 얻은 모형선의 추력계수 (K_{TM})에 해당하는 전진비 (J_{TM})와 유속과 회전수 관계를 통해 구한 전진비(J_M)를 이용하여 유효 반류비 (wake fraction, w_M)를 계산한다. 자항시험에서 모형 토크 계수(K_{QM})와 프로펠러 단독 성능 곡선에서 추력 일치법을 얻은 토크 계수 (K_{QTM})를 이용하여, 모형 복합재료 프로펠러의 단독효율 η_{OM} 과 η_R 를 구할 수 있다.

$$n_{M,CP} = \gamma_n n_M \tag{12}$$

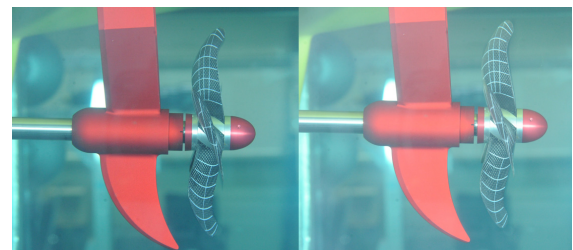


Fig. 7 Composite propeller during propulsion test at LCT (left : before deformation, right : after deformation)

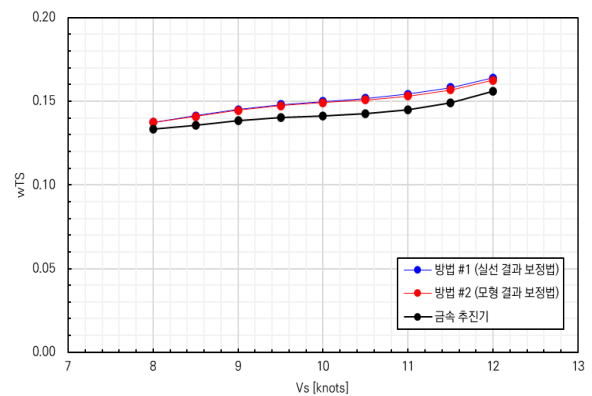


Fig. 8 Wake fraction of composite propeller

$$T_{M,CP} = T_M \tag{10}$$

$$Q_{M,CP} = \gamma_Q Q_M \tag{11}$$

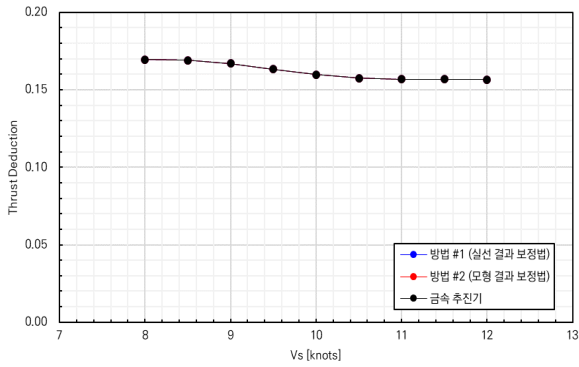


Fig. 9 Thrust deduction of composite propeller

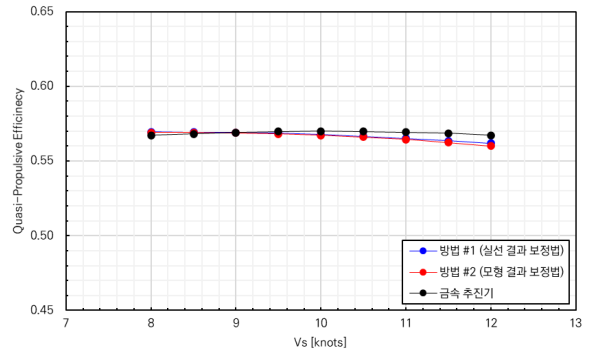


Fig. 13 Quasi-propulsive efficiency of composite propeller

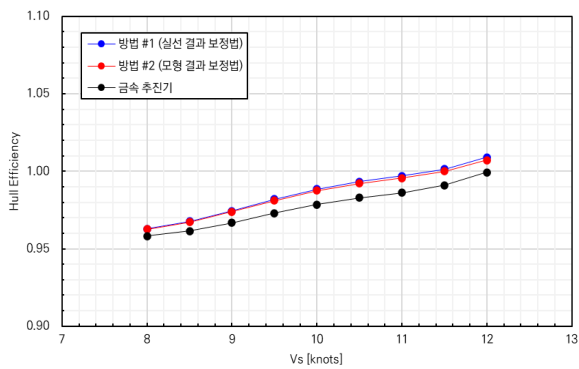


Fig. 10 Hull efficiency of composite propeller

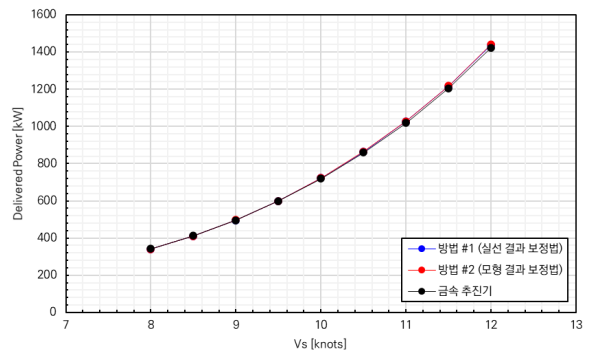


Fig. 14 Delivered power of composite propeller

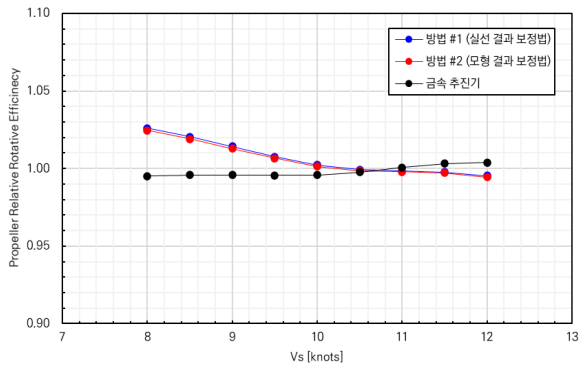


Fig. 11 Propeller relative rotative efficiency of composite propeller

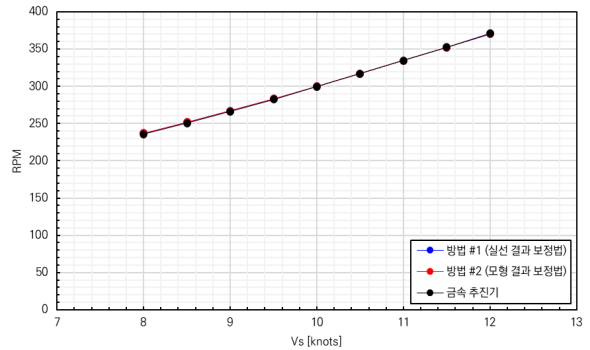


Fig. 15 RPM of composite propeller

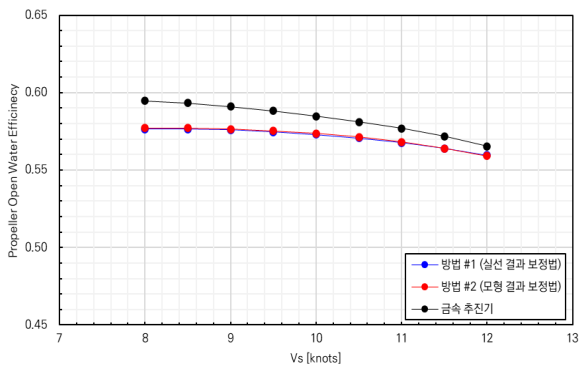


Fig. 12 Propeller open-water efficiency of composite propeller

여기에서 T_M 와 T_{MCP} 는 금속 프로펠러와 복합재료 프로펠러의 모형 추력이며, Q_M 와 Q_{MCP} 는 금속 프로펠러와 복합재료 프로펠러의 모형 토크를 뜻한다. 또한, n_M 와 n_{MCP} 은 각각 모형 금속 프로펠러와 복합재료 프로펠러의 회전수를 뜻한다.

자항시험에서 얻은 데이터를 보정하고, 모형 유효반류비와 단독 성능 곡선을 수렴할 때까지 반복 계산하여, 모형 프로펠러 단독효율, 유효반류비, 프로펠러 상대회전효율 계산한다. ITTC 78 방법에 따라 실선 확장을 수행하여, 선각효율, 프로펠러 상대회전효율, 프로펠러 단독효율, 실선 유효 반류비를 하고 실선 추력, 토크, 회전수를 계산한다. 새롭게 추정된 실선 회전수와 마하 수 상사 시험시의 회전수가 마하 수 상사법에 의한 회전수와는 미세한 차이가 발생한다. 해당 실선 확장 방법 절차는 Fig. 6에 나타나 있다.

두 가지 방법을 이용하여 각각의 저항요소를 구한 결과는 Fig. 8~15에 작성되어 있다. 두 가지 방법을 이용해서 최종적으로 구한 복합재료 프로펠러의 전달마력과 회전수는 Fig. 14와 15에 있다. 유효반류비는 최대 약 1%까지 차이가 발생하였고, 추력 감소비는 본 연구에서 가정한 비와 같이 동일하였다. 두 방법은 선각 효율에서는 유효반류 차이로 인해서 최대 0.2%가 차이를 보였으며, 프로펠러 단독효율과 상대회전효율도 비슷한 수준의 차이를 보여준다. 최종적으로, 전달마력은 최대 0.3% 미만 차이가 발생했으며, 회전수는 0.1% 미만을 발생한 것으로 보아, 두 가지 방법으로 얻은 결과는 거의 유사하였다. Fig. 7은 대형공동수조에서 저항 시험 중인 복합재료 프로펠러의 모습이며, 왼쪽은 변형 전이고, 오른쪽 그림은 변형 후의 모습이다.

5. 복합재료 프로펠러 공동시험

복합재료 프로펠러의 공동 시험 (cavitation test)도 마하 수 상사를 통해 복합재료 프로펠러의 변형된 형상이 반영된 시험을 진행해야 한다. 프로펠러의 공동 수 (cavitation number, σ)와 전진비 J 를 정의하면 식 (13)과 (14)와 같다.

$$\sigma = \frac{p_m - p_v}{0.5\rho_m n_m^2 D_m^2} = \frac{p_s - p_v}{0.5\rho_s n_s^2 D_s^2} \tag{13}$$

$$J = \frac{V}{n_m D_m} = \frac{V}{n_s D_s} \tag{14}$$

여기에서, p_m 과 p_s 는 모형, 실선에서의 압력 (static pressure)이며, p_v 는 증기압 (vapor pressure)를 뜻한다. 식 (13)에서 마하 수 상사의 유속이 동일한 사실을 이용하여, 식 (13)과 (14)을 조합하면 모형 시험에서의 압력을 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$p_m = \frac{\rho_m}{\rho_s} (p_s - p_v) + p_v \tag{15}$$

식 (15)에서 유추할 수 있듯이, 모형 시험에서의 압력은 실선 프로펠러의 압력과 거의 유사하고, 모형 시험과 실선의 밀도 차이만큼 보정하면 된다.

복합재료 프로펠러의 공동 시험을 수행하기 전, 금속 프로펠러에 대해서 특정 유속에서의 공동 시험을 일반적으로 수행하는 방법과 마하 수 상사 방법으로 수행한 방법을 수행하여 두 결과를 비교해 보았다. Fig. 16은 동일한 금속 프로펠러를 일반적인 공동 시험 방법과 마하 수 상사를 통해 수행한 공동시험 결과다. Fig. 16에서 확인할 수 있는 것과 같이, 공동 수와 추력계수 등 공동 시험에서 반드시 지켜야 하는 시험 조건을 동일하게 하였기 때문에, 거의 유사한 공동 패턴 현상을 확인할 수 있었다.

복합재료 프로펠러 저항 시험 조건에서 찾은 회전수 $n_{mach,CP}$ 로 작동시켜 금속 프로펠러와 동일한 추력이 내도록 한다. 추력은

동일하지만, 복합재료 프로펠러의 변형으로 인해 회전수가 동일하지 않기 때문에 공동수는 같지 않다. 따라서, 식 (15)에서 얻은 압력 p_m 로 터널 압력을 조절한 후, 복합재료 프로펠러의 공동 거동을 관측하였다. Fig. 17은 Fig. 16과 동일한 유속 조건에서 복합재료 프로펠러의 공동 거동을 관측한 사진이다.

6. 결론

현재까지 많은 연구들은 복합재료 프로펠러의 성능을 확인하기 위한 설계, 해석 위주의 연구가 수행되어 왔다. 몇몇 연구자들이 모형 시험 방법론에 대해서 개념에 대한 제시를 해왔으나, 복합재료 프로펠러의 모형 시험을 통한 추진 성능 평가, 공동 성능을 평가하는 방법에 대한 연구가 매우 부족한 상황이다. 본 연구에서는 마하 수 상사 기반의 복합재료 프로펠러의 추진 성능 평가 모형시험 방법을 제시하였고, 복합재료 프로펠러의 공동 성능을 평가할 수 있는 공동 성능 평가 모형 시험법을 제시하였다. 하지만, 대형공동수조에서는 선박의 저항을 계측하지 못하기 때문에, 변형이 발생했을 때의 모습의 평균 형상의 금속 프로펠러에 대해서 예인수조, 공동수조에서 계측을 먼저 수행하였다. 그 후, 복합재료 프로펠러의 시험 결과를 보정하여 실선 추진 성능, 공동 성능 시험을 수행하였다. 실선 시운전을 통한 성능 계측 및 실선 수치 해석 등의 추가 연구를 통해 본 연구에서 제시한 모형시험 방법론을 검증할 예정이다.

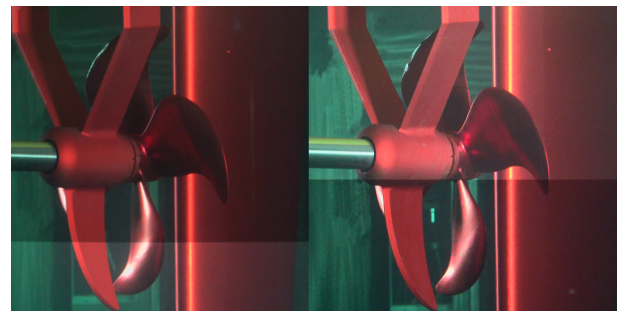


Fig. 16 Cavitation test of metallic propeller (left: conventional test, right: Mach no. test)

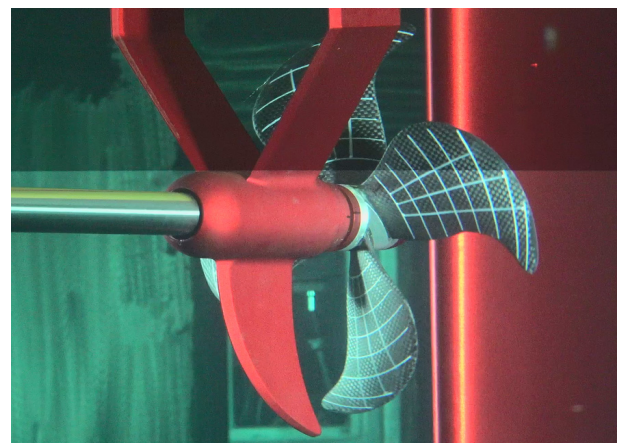


Fig. 17 Cavitation test of composite propeller

후 기

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥
구소의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (KRIT-CT-22-016).

References

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.

Friedmann, P., 2004. Aeroelastic scaling for rotary-wing aircraft with applications. *Journal of Fluids and Structures*, 19(5), pp.635-650.

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.

Kawakita, C., 2019. An experimental study on hydrodynamic performance of flexible composite model propellers. *6th International Symposium on Marine Propulsors*.

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*.

Küttler, U. and Wall, W., 2008. Fixed-point fluid-structure interaction solvers with dynamic relaxation, *Computational Mechanics*, 43. pp. 61-72.

Lee, H.S., 2018, *A study on the BEM-FEM based hydro-elastic analysis of composite marine propellers*, Ph.D thesis, Seoul National University.

Maljaars, P., Bronswijk, L., Windt, J., Grasso, N. and Kaminski, M., 2018. Experimental validation of fluid-structure interaction computations of flexible composite propellers in open water conditions using BEM-FEM and RANS-FEM methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(51).

Motley, M. and Young, Y.L., 2012. Scaling of the transient hydroelastic response and failure mechanisms of self-daptive composite marine propellers. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012, 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]

Rokvam, S., Vedvik, P., Mark, L., Rømcke, E., Ølnes, J., Savio, L. and Echermeier, A., 2021. Experimental verification of the elastic response in a numeric model of a composite propeller blade with bend twist deformation. *Polymers*, 13(21).

ThyssenKrupp, 2011. Acoustically optimized propeller made from composite materials, *techforum*, 1, pp.59-63.

Young, Y.L., 2010. Dynamic hydro-elastic scaling of self-daptive composite marine rotors. *Composite Structures*, 92, pp.97-106.

Wolowicz, C., Bowman, J. and Gilbert, W., 1979. *Similarity requirements and scaling relationships as applied to model testing*. Technical report of NASA technical paper No. 1435.

