

# 대형 캐비테이션터널에서 펌프젯 추진기 자항성능 시험 및 해석 기법 연구

안종우<sup>†</sup>·설한신·정홍석·박영하  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## Study of the Self-Propulsion Test and Analysis for a Pumpjet Propulsor in LCT

Jong-Woo Ahn<sup>†</sup>·Han-Shin Seol·Hong-Seok Jung·Young-Ha Park  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

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.

In order to study the self-propulsion test and analysis techniques for the submerged body with pumpjet propulsors in the Large Cavitation Tunnel (LCT), at the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, a set of test equipment was designed and manufactured. The pumpjet propulsor is composed of rotor, stator and duct which results in the strong interaction between the components. To measure the thrust and torque for duct and stator, a ring-shaped sensor was applied. The test equipment including pumpjet is installed on the stern of the submerged body. As the whole pumpjet including duct and stator was considered as the propulsor from pumpjet open-water test, the self-propulsion test was conducted in the same way. The total thrust, combined thrust of rotor, duct and stator was used for the pumpjet self-propulsion test analysis. Accordingly, the self-propulsion test and analysis were conducted in the same way as those of the conventional propeller. The full-scale performances of the pumpjet propulsor were compared with those of the reference propeller. On the basis of the present study, it is thought that the pumpjet propulsor would be designed optimally.

**Keywords** : Pumpjet propulsor(펌프젯 추진기), Self-propulsion test(자항시험), Duct & stator sensor(덕트 및 스테이터 센서), Submerged body(몰수체), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형 캐비테이션터널)

### 1. 서론

최근 잠수함 및 어뢰와 같은 수중 몰수체의 추진장치로 펌프젯(pumpjet)이 요구되고 있다. 펌프젯은 로터, 덕트 및 스테이터로 구성되는데 스테이터 설치 위치에 따라 전류 및 후류 스테이터 펌프젯으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 전류 스테이터 펌프젯이 적용되었는데, 이와 같은 펌프젯이 몰수체 Fin 등에서 유발된 반류를 정류함으로써 캐비테이션 및 소음성능이 우수하다고 알려져 있다 (Renilson, 2015). 펌프젯은 스테이터 위치 및 덕트 형상에 따라 특성에 차이가 있지만 프로펠러보다 캐비테이션 및 소음 성능이 향상된다고 알려져 있다. 그러나 이러한 성능 향상도 펌프젯이 최적으로 설계되었을 때 가능하며, 최적 설계를 위하여는 모형시험 및 실선성능 해석을 통한 성능 평가가 정도 높게 수행될 필요가 있다. 펌프젯은 앞

서 언급한 3가지 장치로 구성된 바 장치 간에 상호 작용도 매우 크게 나타난다, 따라서, 장치별 각각의 성능을 파악할 수 있는 모형시험이 수행되어야 하는바, 아직까지 적합한 시험 장치 및 기법이 개발되지 않은 상황이다.

대형 캐비테이션터널(LCT)에서 프로펠러 추진 몰수체 자항 시험 기법은 이미 개발된 바 있으며 (Ahn et al. 2021), 펌프젯을 위한 자항 시험법을 개발하기 위하여 기존 몰수체 및 프로펠러 자항시험 장비를 이용하였다. 덕트 및 로터가 포함된 펌프젯의 경우 구성요소별 상호작용이 크기 때문에 추진장치 요소별 추력 및 토크 측정을 수행하여야 한다. 따라서, 덕트 및 스테이터 추력 및 토크를 측정할 수 있는 센서를 적용하였으며, 이를 스테이터 허브와 연결하여 추력(항력) 및 토크를 측정하였다.

펌프젯 추진 몰수체의 실선 성능을 추정하기 위하여는 펌프

젯 단독성능시험, 물수체 저항시험 및 자항시험이 요구된다. 펌프젯 단독시험은 별도로 수행하여 펌프젯 자체를 추진장치로 하여 해석한 결과(total)를 활용하였다 (Ahn et al. 2022). 물수체 저항시험은 나선과 덕트 및 스테이터가 포함된 물수체 2 가지를 수행하였으며, 도출 결과의 검증을 거쳐 나선 저항을 활용하였다. 자항시험 결과 해석도 펌프젯 자체를 추진기로 보고 로터, 덕트와 스테이터에서 도출된 추력(항력)을 합산한 총 추력(total)을 이용하여 수행하였다. 펌프젯 자체를 추진기로 간주함으로써 일반 프로펠러 추진과 같이 ITTC에서 제시한 표준 성능 추정기법을 활용하여 실선 성능 추정이 가능하였다.

기존 프로펠러 추진 물수체 자항시험에서 활용하였던 DARPA Suboff 잠수함은 실선이 존재하지 않는 연구용 모형이므로 실선 성능 해석을 위하여 기존 잠수함 등의 제원 조사를 통하여 축적비를 24.0으로 가정하였다. 실선 최고 선속을 35.0 knots로 가정하면서 실선 유속 15.0~ 35.0 knots 범위에서 저항 및 자항 시험이 수행되었다. 따라서, Froude수를 고려한 대형 캐비테이션터널 모형시험 유속범위는 1.575~3.575 m/s 이다. 대형 캐비테이션터널에서 저항시험 수행 후 부력효과(buoyancy effect), 물체위벽효과(solid blockage effect) 및 반류위벽효과(wake blockage effect)를 고려하여 수정한 결과가 미국 해군연구소 저항시험 결과 (Crook, 1990)와 거의 일치됨에 따라 위벽효과를 수정한 결과를 사용하여 실선 저항을 추정하였다 (Ahn et al. 2020, 2021). 대형 캐비테이션터널에서 선속별 실선 자항점은 표면마찰보정( $F_D$ )과 부력을 함께 고려하여 결정하였다. 유효반류비는 추력일치법(thrust identity)으로 프로펠러 단독시험 결과로부터 전진계수를 구하여 산정하였다. 실선성능은 ITTC 1978 해석 기법을 활용하여 추정되었으며, 2차원 해석방법을 적용하였다.

대형 캐비테이션터널에서 물수체 자항시험을 수행하는 목적이 캐비테이션 및 소음 시험조건 도출이지만 (Ahn et al. 2021) 자항성능 해석 과정에서 성능 평가 결과를 도출할 수 있다. 도출된 펌프젯 실선 성능 추정 결과는 INSEAN에서 설계된 기준 프로펠러 E1619 실선 추정 성능과 비교하였다. 성능 비교의 목적은 기준 프로펠러와의 펌프젯의 상대적 평가 결과를 기반으로 펌프젯의 개선 설계 방안을 모색하기 위함이다.

## 2. 펌프젯 자항시험 장치

대형 캐비테이션터널에서 수중 물수체 자항시험 기법을 개발하기 위하여 선정된 대상 물수체는 저항시험이 수행되어 고속 예인수조 결과와 비교를 수행한 바 있는 DARPA Suboff 잠수함 (Grove et al, 1989)이다. Fig. 1은 대형 캐비테이션터널 시험부에 설치된 대상 물수체를 보여주며, 자항시험을 위한 펌프젯이 설치되어 있다. 물수체 저항을 계측할 수 있는 저항동력계와 로터의 추력 및 토오크를 계측할 수 있는 프로펠러 동력계는 Fig. 2에 나타나 있다. 저항동력계, 프로펠러 동력계

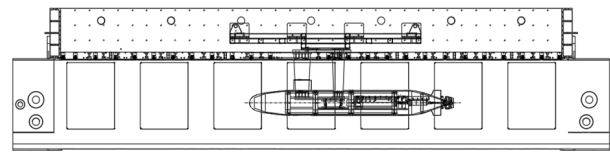


Fig. 1 The submerged body with pumpjet installed in LCT

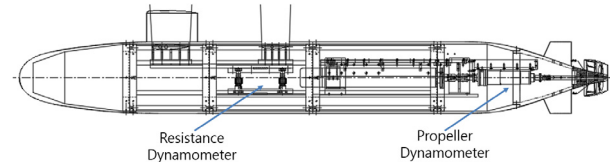


Fig. 2 The insides of the submerged body

시양은 기존 논문 (Ahn et al, 2020, 2021)에서 언급한 바 있다.

로터, 덕트 및 스테이터로 구성된 펌프젯의 요소별 추력 및 토오크를 계측하기 위하여 덕트 및 스테이터 센서가 적용되었다. 센서는 Fig. 3과 같이 물수체 선미와 스테이터 허브 사이에 설치된다. 덕트는 스테이터에 나사로 고정되므로 스테이터 부분의 덕트는 알루미늄으로 제작하였으며, 로터 부분의 덕트는 캐비테이션 관찰을 위하여 투명 아크릴로 제작된다. 두 재료로 제작된 덕트의 조립은 나사산을 만들어 조립된다. 로터의 경우 덕트와의 날개끝 간극(tip clearance)은 모형 시험 최소한도인 0.5~0.7 mm를 유지하면서 고속으로 회전하여야 하므로 덕트의 약간의 진동도 허용되지 않는다. 따라서, 스테이터 허브에 수베어링 설치를 통하여 로터가 덕트와의 날개끝 간극을 유지하면서 고속으로 회전할 수 있도록 하였다.

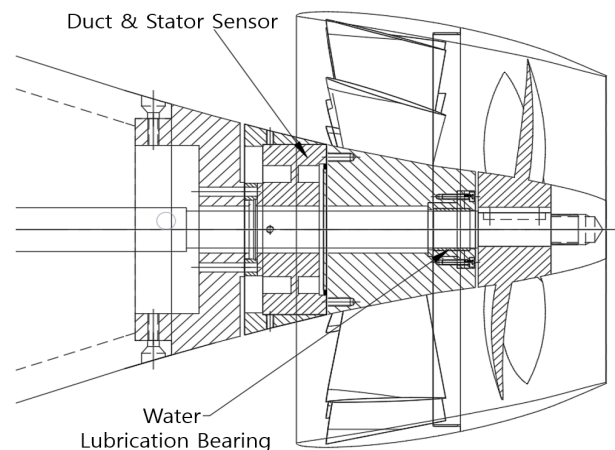


Fig. 3 Pumpjet setup for self-propulsion test

덕트 및 스테이터의 추력 및 토오크를 계측하기 위한 센서는 펌프젯 단독성능시험에서 사용하였던 센서를 활용하였다. Fig. 4는 덕트 및 스테이터 추력 및 토오크를 계측하기 위한 센서의 형상을 보여준다. 센서 안쪽 나사부는 물수체 선미와 연결되고, 바깥쪽 나사부는 스테이터 허브와 연결된다. 펌프젯 단독시험 수행 전 덕트 및 스테이터 센서의 성능 검증을 위하여 추력(항

력) 및 토오크의 캘리브레이션을 수행한 바 있다. 캘리브레이션 결과는 하중에 대한 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋은 것으로 나타났다 (Ahn et al. 2022). 또한 추력 및 토오크 캘리브레이션시 토오크 및 추력에 반응신호가 거의 없어 추력 및 토오크 간에 간섭이 없는 것으로 나타났다. 추력 및 토오크의 불확도(uncertainty)는 0.344 % 및 0.057 %로 나타나 우수한 특성을 보여준 바 있다 (Ahn et al. 2022).

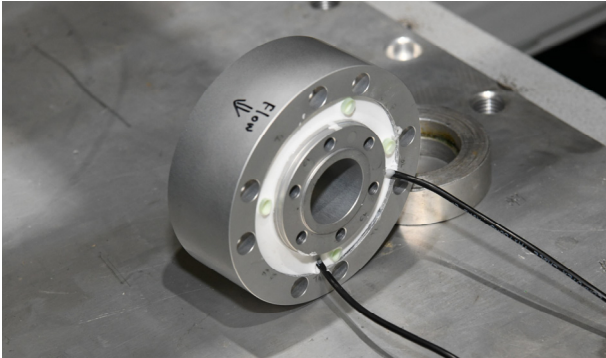


Fig. 4 Sensor for duct and stator measurement

### 3. 저항시험

펌프젯의 경우 펌프젯 자체를 추진기로 보는 관점과 덕트 및 스테이터를 선체에 포함하고 로터 만을 추진기로 고려하는 2가지 관점이 존재한다. 펌프젯 단독시험에서 펌프젯 자체를 추진기로 보는 것이 타당함을 언급한 바 있지만 저항시험도 2가지 관점을 고려하여 수행하였다. Fig. 5는 물수체 나선저항(bare hull)을 계측하기 위한 구성을 보여주며, Fig. 6은 덕트 및 스테이터를 포함한 저항(hull+duct+stator)을 계측하기 위한 구성을 보여준다.



Fig. 5 Setup for bare hull resistance test

2가지 구성에 대하여 저항 시험을 수행한 후 기존 논문에서 언급한 바와 같이 부력 및 위벽효과를 수정하였다 부력효과 수정으로 저항이 9~10 % 감소하였으며, 위벽효과 수정으로 유속

이 5.3 % 증가하여 기존 실험 결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다 (Ahn et al, 2020). 2가지 구성의 모형 저항시험 결과는 Fig. 7에서 보여진다. Fig. 7에는 나선저항, 덕트 및 스테이터가 포함된 저항과 함께 덕트 및 스테이터 만의 저항도 나타나 있다. 일반적으로 덕트 및 스테이터가 포함된 전체 저항은 나선저항과 덕트 및 스테이터의 저항을 합산한 결과와 동일할 것으로 생각할 수 있으나, Fig. 7의 결과에서는 차이가 나타난다. 나선저항과 덕트 및 스테이터가 포함된 전체 저항의 차이는 5.6~7.1 %였으나, 나선저항에 덕트 및 스테이터 저항을 합산한 저항은 나선저항에 비하여 16.0~21.0 % 증가하였다. 10.4~ 13.9 % 이상의 저항 차이가 나타나고 있는데, 이는 덕트 및 스테이터가 선미에서의 유동을 저하시킴으로 인하여 압력이 증가하기 때문에 나타나는 현상이라 사료된다. 덕트 및 스테이터를 선체에 포함하는 경우 물수체 자체의 저항 감소 등의 복잡한 문제가 발생함에 따라 단독시험에서 언급한 바와 같이 펌프젯 자체를 추진기로 보고 나선저항을 활용하는 방안을 검토하였다. 따라서, 저항시험 결과를 기존에 방식대로 해석하였으며 (Ahn et al. 2021) 저항시험 결과 해석에도 사용하였다. Fig. 8은 모형 나선저항으로부터 실선 축적비( $\lambda$ )를 24.0으로 가정하여 얻은 전저항 계수( $C_{TS}$ )이다.

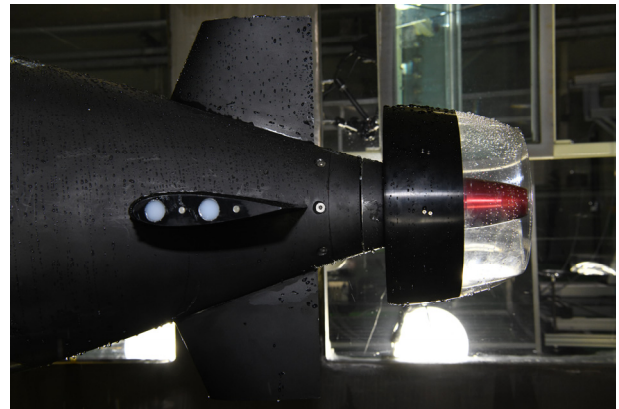


Fig. 6 Resistance test setup of hull with duct and stator

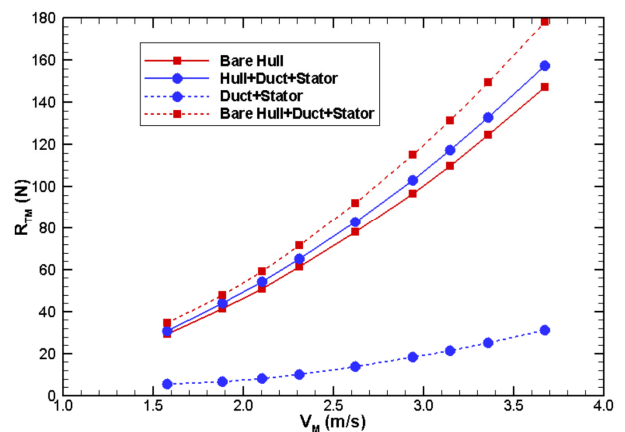


Fig. 7 Resistance test results

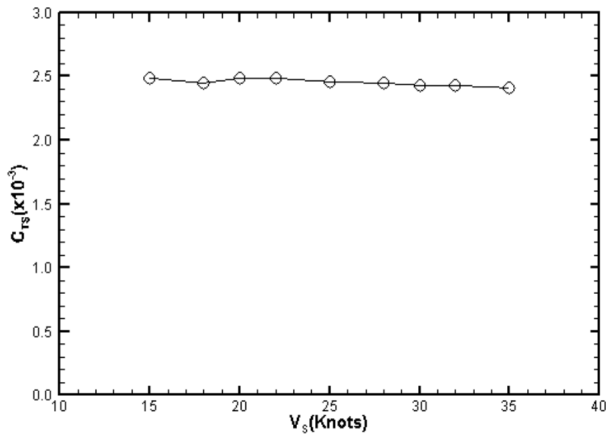


Fig. 8 Total resistance coefficient (full-scale)

### 4. 모형 자항시험 및 해석

펌프젯 추진장치의 자항시험을 위한 설치는 Fig. 9에 나타나 있으며, 펌프젯 추진장치의 기본 제원은 Table 1에 나타나 있다. 자항시험은 실선과 동일한 Froude 수에서 수행하게 되는데, 이때 Reynolds 수는 실선과 차이가 크므로 모형에서의 경계층은 실선보다 두껍게 형성된다. 따라서 자항시험은 실선과 모형선의 저항차이를 표면마찰보정( $F_D$ )으로 정의하고 프로펠러가 실선 부하조건과 동일하게 작동하는 조건에서 시험을 수행한다. 본 연구에서는 2차원 해석법을 적용하는 바,  $F_D$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_D = \frac{\rho_M V_M^2}{2} S_M [C_{FM} - (C_{FS} + C_A)] \quad (1)$$

여기서  $\rho_M$ 은 대형 캐비테이션터널의 물의 밀도,  $V_M$ 은 시험부의 위벽효과 수정 유속,  $S_M$ 은 물수체 모형의 침수 표면적이다.  $C_{FM}$ 과  $C_{FS}$ 는 모형 및 실선 마찰저항계수로 ATTC 곡선 수식으로 산정하는 것이 적합함을 언급한 바 있다 (Ahn et. al, 2020).  $C_A$ 는 선형의 표면 거칠기에 따른 마찰저항 수정계수로서 실선시험 자료를 기반으로 얻은 기관 고유의 값을 사용한다.  $C_A$ 가 2차원 해석법을 기반으로 도출됨에 따라 물수체 추진성능 해석시 2차원 해석법이 기관의 표준기법이다.

Table 1 Principal particulars of model pumpjet

Item		
Diameter, D (mm)	Rotor	210.0
	Stator	248.2
Rotor	Mean pitch, (P/D) <sub>mean</sub>	1.0254
	Chord at 0.7R, C <sub>0.7R</sub> (mm)	62.328
	Expanded area ratio, (A <sub>E</sub> /A <sub>O</sub> )	0.8794
No. of blades	Rotor	7
	Stator	11



Fig. 9 Installation for the self-propulsion test

에인수조 시험에서는 표면마찰보정 만을 고려하여 자항점을 결정하면 되지만, 대형 캐비테이션터널 시험에서는 부력을 추가하여 보정하여야 한다. Fig. 10은 대형 캐비테이션터널에서 자항점 결정을 위하여 수행된 실험결과를 보여준다. 각각의 선속에서 로터 회전수를 변경하면서 저항동력계에서 측정된 물수체 저항( $F_x$ )과의 관계를 보여준다. 각각의 선속에서 자항점은 표면마찰보정과 부력을 합친 값을 고려해주면 된다. Fig. 10은 자항점에서의 회전수( $n_M$ )를 얻을 수 있도록 각각의 선속에서 표면마찰보정과 부력을 합친 값을 표시하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각의 선속에서 프로펠러 동력계와 덕트 및 스테이터 센서에서 측정된 추력( $T_M$ ) 및 토크( $Q_M$ )를 보여준다. Fig. 11에서 덕트 및 스테이터의 추력(항력)은 유속에 따라 증가하지만 동일 유속에서 로터 회전수 변화에 거의 영향을 받지 않는 결과를 보여준다. Fig. 12에서 로터와 덕트 및 스테이터의 토크 분포를 보여주는데, 토크 균형(torque balance)이 되지 않는 경향이 유사하게 나타난다. 추후 토크 균형을 위한 설계 개선이 요구된다. 펌프젯 단독시험시 펌프젯 자체를 추진기라고 간주함으로써 Fig. 11의 로터와 덕트 및 스테이터 추력(항력)은 합산이 요구되는 바, 총 추력(total)은 Fig. 13과 같다. 토크는 로터의 토크를 가지고 자항해석을 수행한다. Fig. 10에서 얻은 각각의 자항점에서의 프로펠러 회전수를 이용하여 Fig. 12와 Fig. 13으로부터 각각의 선속에서 펌프젯 추력 및 토크를 구할 수 있다. 각각의 선속에서 추력, 토크 및 회전수로 모형의 추력계수  $K_{TM}$ 과 토크계수  $10 K_{QM}$ 을 얻을 수 있다.

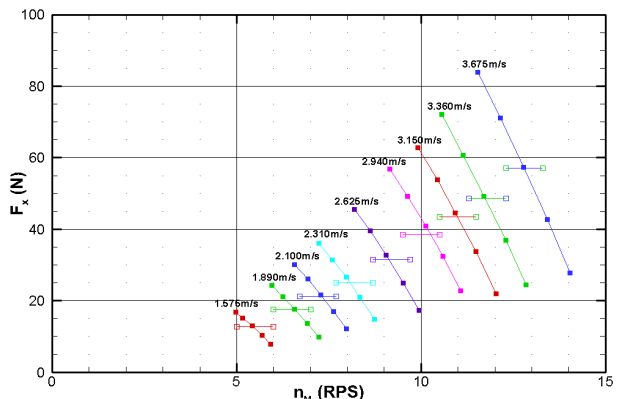


Fig. 10 Self-propulsion point at each speed

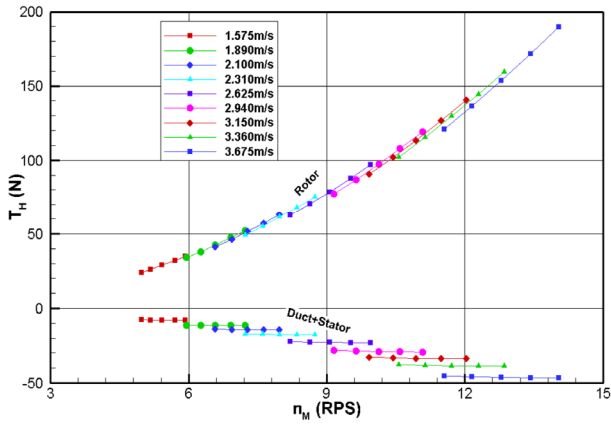


Fig. 11 Thrust (Drag) of pumpjet components at each speed

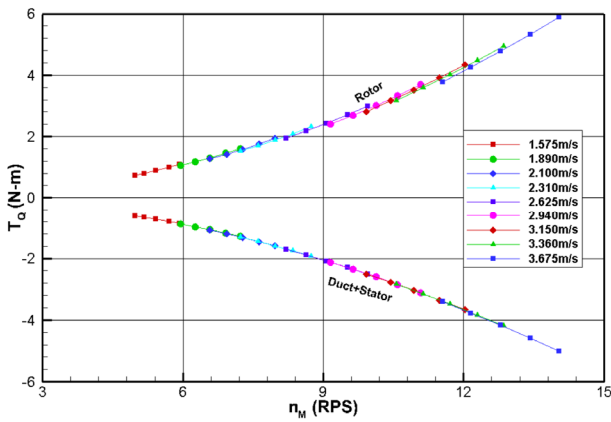


Fig. 12 Torque of pumpjet components at each speed

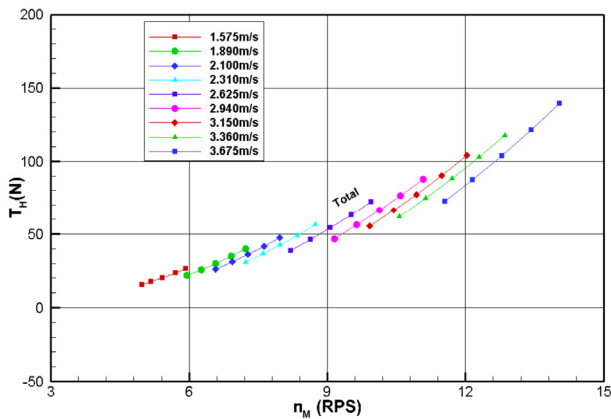


Fig. 13 Total thrust of pumpjet at each speed

Fig. 14는 대형 캐비테이션터널에서 H41 동력계를 이용하여 역방향으로 수행된 펌프젯 자체(total)의 모형 단독시험 결과를 보여준다 (Ahn et al. 2022). 자항점에서의 추력계수( $K_{TM}$ )를 이용하여 추력일치법(Thrust identity)으로 동일추력점에서 모형 전진계수( $J_{TM}$ )와 펌프젯 단독상태에서의 토오크계수( $10K_{QTM}$ )를 얻을 수 있다. Fig. 15는 프로펠러 단독시험 결과로부터 각각의 선속에서의 동일 추력점에서 얻어진 모형 전진계수( $J_{TM}$ )와 토오크계수( $10K_{QTM}$ ) 분포를 보여준다. 추력 및 토오크계수는 선속

증가에 따라 약간 감소하는 경향을 보이며, 전진계수는 증가하는 경향을 보여준다. 이는 프로펠러 추진 자항시험에서는 나타나지 않은 현상으로 (Ahn et al. 2021) 펌프젯에서는 덕트가 존재함으로써 유속 변화에 따른 경계층 변화로 나타난 현상으로 사료된다.

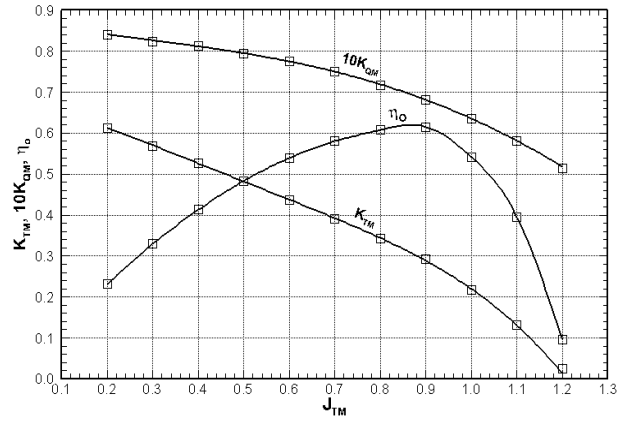


Fig. 14 POW results of model pumpjet (Total)

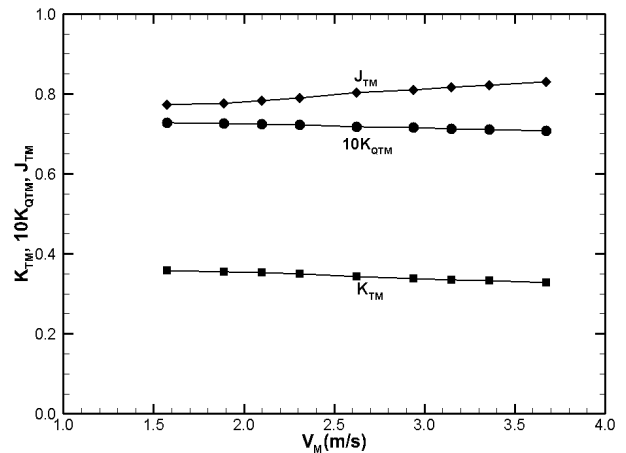


Fig. 15  $J_{TM}$  and  $10K_{QTM}$  acquired from POW results

## 5. 실선 성능 추정

실선 성능 추정은 기존 프로펠러 추진 물수체와 같이 ITTC에서 제시한 표준 성능 추정법에 따라 수행된다 (The Ship Hydrodynamics Research Committee, 2009). Fig. 16은 Fig. 14에 펌프젯 단독시험 결과를 ITTC '78 방법에 따라 실선으로 추정할 결과를 보여준다. 실선에서의 전진계수( $J_{TS}$ )와 토오크계수( $10K_{QTS}$ )는 Fig. 16으로부터 구할 수 있는데, 자항시험에서의  $K_T/J^2$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S_S}{2D_{RS}^2} \times \frac{C_{TS}}{(1-t)(1-W_{TS})^2} \quad (2)$$

여기서  $S_S$ 는 실선 침수표면적,  $D_{RS}$ 는 실선 로터 직경,  $W_{TS}$ 는 실

선 반류,  $C_{TS}$ 는 실선 전저항계수,  $t$ 는 추력감소계수이다. 전진계수와 토오크계수는 해당 선속에서 계산된  $K_T/J^2$ 에서 값을 읽으면 된다. 실선 추정된 추진계수들의 선속별 분포는 Fig. 17에 나타나 있다. Fig. 17에 나타난 추진계수들을 이용하여 실선에서의 물리량을 산정할 수 있다. 실선 전진계수( $J_{TS}$ )는 모형시험과 같이 고속으로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다. 다른 자항계수들은 고속으로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다. 실선 반류비( $W_{TS}$ )는 프로펠러의 경우 기존 예인수조 실험에서 0.28~0.35 사이에서 도출된 바 있는데, 펌프젯 추진의 경우 저속에서는 그 범위 안에서 도출되지만 고속에서 약간 벗어난다. 추력감소계수( $t$ )는 기존 프로펠러 추진에 비해 매우 작은 값이 나타나고 있으며, 고속으로 갈수록 감소량이 크게 나타난다. 이는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 펌프젯의 덕트 및 스테이터가 설치됨으로서 물수체 자체의 저항이 감소하면서 자항점에서의 추력이 기존 프로펠러 추진보다 작아지기 때문에 추력감소계수가 작아지게 된다. 추력계수의 경우 Fig. 15에서 보여지듯이 고속으로 갈수록 감소하는 경향을 보여주는데 추력감소계수에도 영향을 미치고 있다.

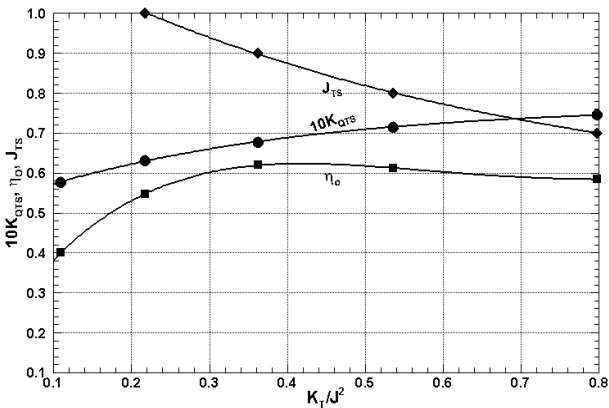


Fig. 16 Full-scale results of POW model test

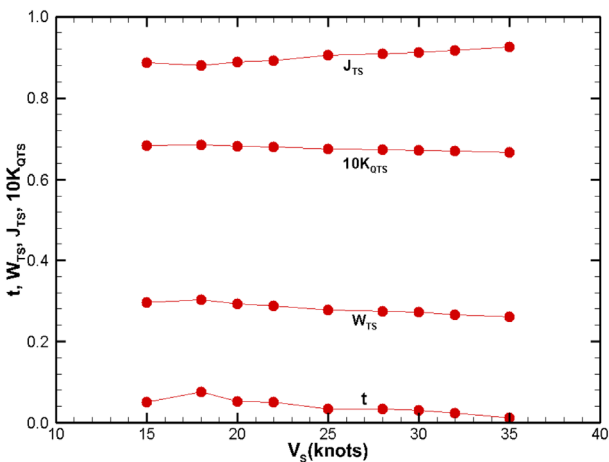


Fig. 17 Self-propulsion coefficients of full-scale ship

실선 추진기 회전수는 Fig. 18에 나타나 있는데, 다음과 같이 산정된다.

$$N_s = \frac{(1 - W_{TS}) V_s}{J_{TS} D_{RS}} \times 60 \quad (3)$$

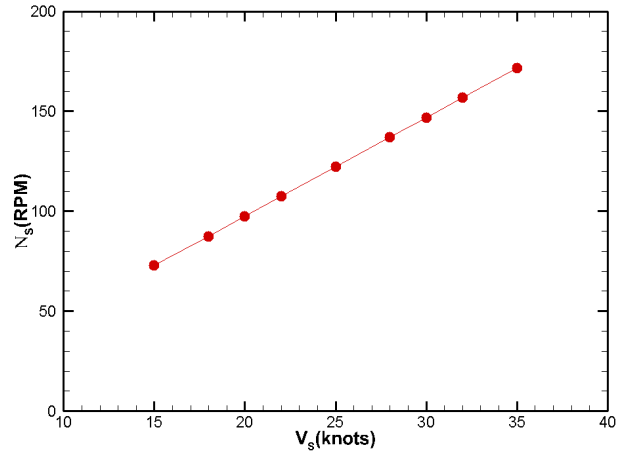


Fig. 18 Rotor rotational speed of full-scale ship

Fig. 19에 나타난 실선 전달마력은 다음과 같이 산정된다.

$$P_D (kW) = 2\pi \times \rho_s D_{RS}^5 N_s^3 \frac{K_{QTS}}{\eta_R} \times 10^{-3} \quad (4)$$

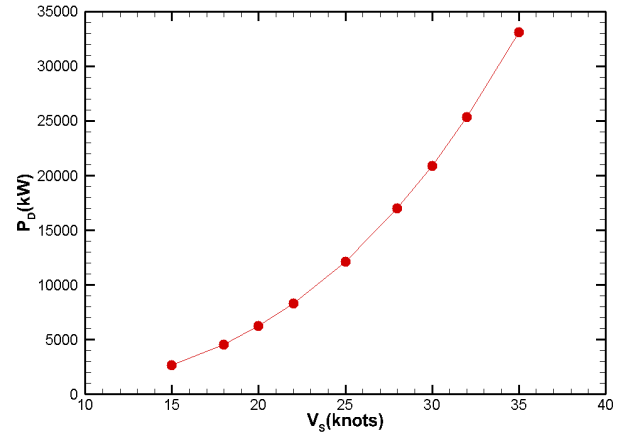


Fig. 19 Delivered power of full-scale ship

Fig. 20에 나타난 준추진효율은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\eta_D = \eta_H \eta_o \eta_R \quad (5)$$

여기서,  $\eta_H$ 는 선각효율,  $\eta_o$ 는 펌프젯 단독효율,  $\eta_R$ 는 상대회전효율이다.

대형 캐비테이션터널에서 자항시험을 수행하고 실선성능을 추정하는 목적은 캐비테이션 시험 조건 도출을 위한 실선 운항 조건을 산정하는 것이다. 프로펠러 캐비테이션 시험을 수행하려면 해당선속에서 추력계수와 캐비테이션 수 정보가 요구된다. 해당 선속의 추력계수는 제시된 실선 추력 계산식으로 산정할 수 있

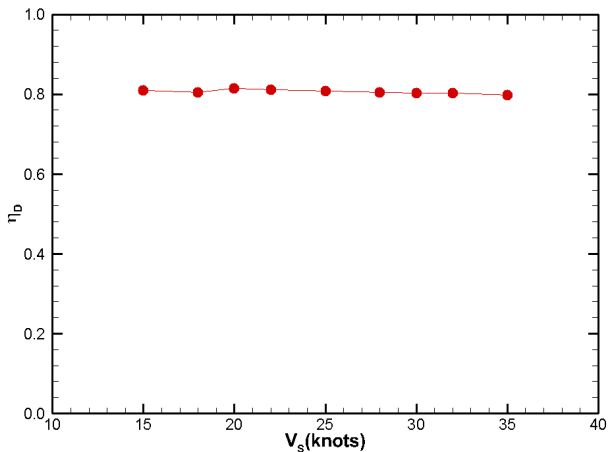


Fig. 20 Quasi-propulsive efficiency

다. 캐비테이션 수는 로터 회전수를 이용하여 산정할 수 있는데, 프로펠러 중심에서의 회전수 기반 캐비테이션 수( $\sigma_{N,center}$ )는 다음과 같다.

$$\sigma_{N,center} = \frac{P_a + \rho_s g H - P_v}{\frac{1}{2} \rho_s (N_s/60)^2 D_{RS}^2} \quad (6)$$

여기서  $P_a$ 와  $P_v$ 는 대기압과 증기압을 나타내며,  $g$ 는 중력가속도,  $H$ 는 프로펠러 중심에서의 수심이다.

Fig. 21은 실선의 선속별 작동 조건을 보여준다. 추력계수와 캐비테이션 수와의 관계를 보여주는데, 선속별 조건에 따라 캐비테이션 관찰 및 소음 실험을 수행한다.

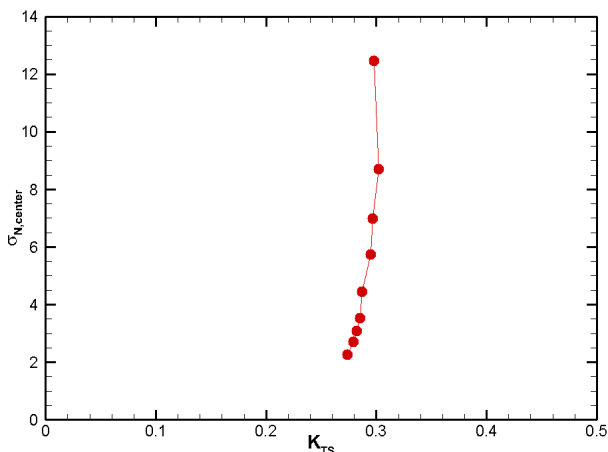


Fig. 21 Operating profiles of full-scale ship

## 6. 펌프젯과 기준 프로펠러 성능 비교

대형 캐비테이션터널에서 물수체 저항시험을 수행하는 목적이 캐비테이션 및 소음 시험 조건 도출이지만 저항성능 해석 과

정에서 성능 평가 결과를 도출할 수 있다. 정도 높은 성능 평가는 예인수조에서 수행하여야 하지만 상대적 평가는 가능하다. 기준 프로펠러와 펌프젯 성능을 비교하기 위하여 축적비 및 선속범위에 맞추어 기준 프로펠러 E1619를 장착하여 저항시험을 수행하고 실선성능을 추정하였다. E1619는 DARPA Suboff 잠수함을 대상으로 INSEAN에서 설계한 프로펠러이다. E1619는 기본 제원 및 3차원 모델링 자료가 공개되어 있어 그 자료를 바탕으로 모형 프로펠러를 제작하였다. 모형 프로펠러는 소음 연구를 위하여 프로펠러 자체에서 발생하는 singing 현상을 감쇄시키고자 황동으로 제작하였다 (Ahn et al. 2021).

Fig. 22는 E1619 프로펠러와 펌프젯 로터의 회전수를 보여준다. 펌프젯 로터 회전수가 E1619보다 약 18~22 % 회전수가 증가하였다. 기준 프로펠러와 펌프젯 로터 직경 차이로 회전수 차이가 발생한 것으로 사료된다.

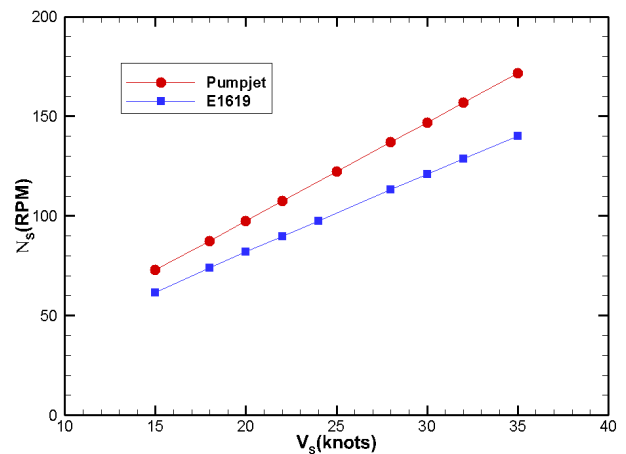


Fig. 22 Comparison of rotational speed for full-scale ship

Fig. 23은 전달동력의 차이를 보여준다. 펌프젯의 전달동력은 E1619와 비교하여 약 4~8 % 증가하였다. Fig. 24는 단독효율( $\eta_D$ ), 선각효율( $\eta_H$ ), 상대회전 효율( $\eta_R$ ) 및 준추진효율( $\eta_D$ )의 비교를 보여준다. 준추진 효율은 E1619가 펌프젯보다 약 1.6~5.1 % 증가하였다. 상대회전 효율( $\eta_R$ )은 유사하게 도출되었지만, 펌프젯 선각효율( $\eta_H$ )은 1.044~1.084배 증가하였고, 단독효율( $\eta_D$ )은 0.902 ~0.918배 감소하여 준추진효율( $\eta_D$ )이 감소하는 현상이 나타났다. 펌프젯은 작은 하중 영역(높은 전진계수)에서는 프로펠러보다 단독효율이 감소하고, 큰 하중 영역(낮은 전진계수)에서는 증가한다고 제시된 바 있다 (Aidan, 2018). 현재의 펌프젯은 높은 전진계수 영역에서 작동함으로써 단독효율이 기준 프로펠러보다 감소하는데 Aidan이 제시한 경향과 일치한다 (Aidan, 2018). 펌프젯 단독효율을 개선하게 되면 준추진효율도 전반적으로 증가하리라 사료된다. 지금까지는 펌프젯 성능 추정 실험기법이 정립되지 않으면서 성능 파악이 어려울 수 있었다. 본 연구에서 개발한 실험 및 해석 기법을 활용하게 되면 펌프젯 성능 파악이 가능하며, 파악된 결과를 기반으로 최적

설계가 가능할 것으로 사료된다. Fig. 25는 펌프젯과 E1619의 운항 조건을 보여준다. 운항조건에서 추력계수의 차이가 크게 나타나는데, 이는 추력차이도 있지만 프로펠러와 로터 직경에 차이에 의한 회전수 차이가 주요 원인이다.

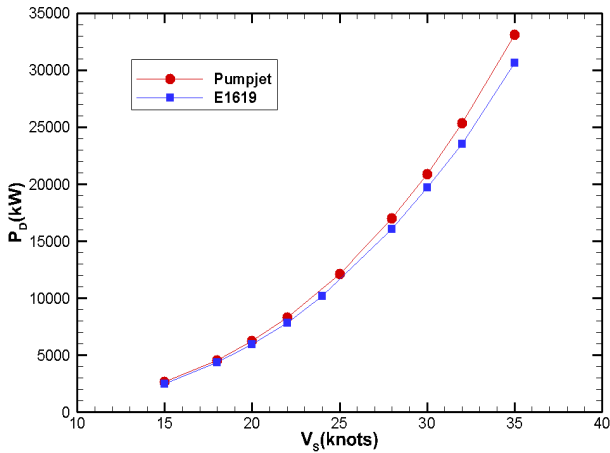


Fig. 23 Comparison of delivered power for full-scale ship

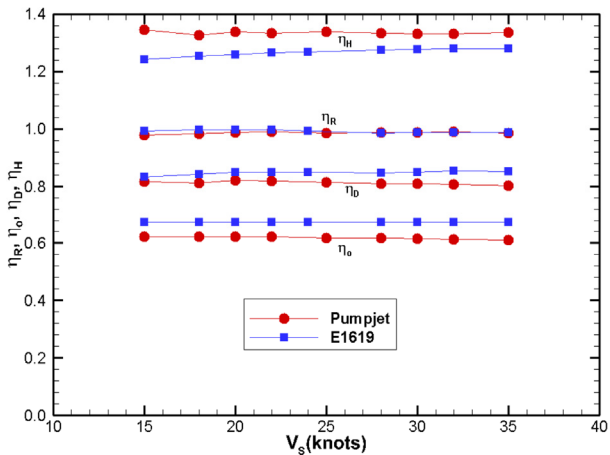


Fig. 24 Comparison of efficiencies for full-scale ship

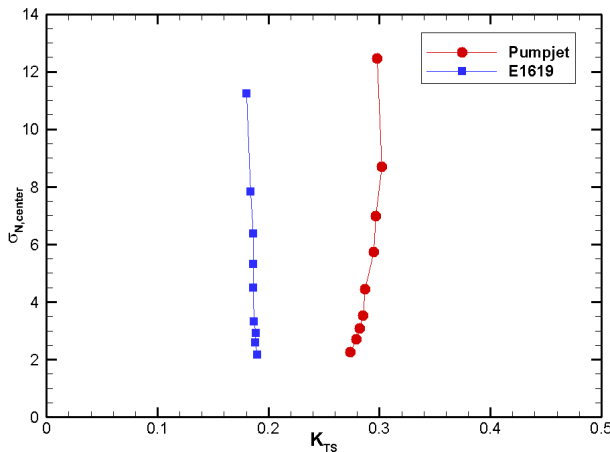


Fig. 25 Comparison of operating profile for full-scale ship

## 7. 결론

본 연구에서 펌프젯의 실선성능 추정을 위한 저항 및 자항성능시험을 수행하였다. 펌프젯 단독성능 시험시 추진장치별 상호작용이 크게 나타나면서 펌프젯 자체를 추진기로 간주해야 한다는 결론을 도출한 바 있다. 자항추진시험도 펌프젯 자체를 추진기로 간주하여 로터, 덕트 및 스테이터에서 발생하는 추력(항력)을 합산한 총추력으로 성능해석을 수행함으로써 실선 성능 추정은 기존 프로펠러와 같은 방법으로 수행하는 것이 가능하였다. 대형 캐비테이션터널에서 물수체 저항 및 자항시험을 수행하는 목적은 추진장치 캐비테이션 및 소음시험 조건을 도출하는 것으로 일련의 해석 과정을 거쳐 펌프젯 추진시 선속별 실선 운항 조건을 도출할 수 있었다.

대상 물수체 기준 프로펠러 자항추진 시험을 펌프젯과 동일한 축작비 및 선속범위에서 수행한 후 펌프젯 추진 성능과 비교하였다. 펌프젯 로터 및 기준 프로펠러 직경이 약 24 % 차이로 로터 회전수는 기준프로펠러에 비하여 18~22 % 증가하였다. 전달마력은 펌프젯이 4.0~8.0 % 증가하고 준추진효율은 1.6~5.1 % 감소하였다. 높은 전진계수 영역에서 펌프젯이 프로펠러 추진보다 단독효율이 감소한다고 제시된 바 있는데, 제시된 경향과 동일한 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서 시험법 개발을 위하여 채택한 펌프젯은 기존 자료를 거의 참고할 수 없는 상황에서 최초로 설계된 것으로 최적화 설계가 이루어졌다고 볼 수 없다. 그동안 펌프젯 개발이 제한적으로 이루어지면서 성능평가 기법도 체계적으로 개발되지 못하였다. 본 연구를 통하여 펌프젯 실선 성능 해석 기법이 개발되면서 설계된 펌프젯의 성능평가를 수행할 수 있는 기반이 마련되었다. 앞으로 본 연구에서 제시한 성능평가 방법을 활용하여 펌프젯 최적화 설계가 가능하리라 사료된다.

## 후기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원한 특화연구실 사업 ‘미래 잠수함 추진기 소음 모형시험법 개발 및 D/B 구축연구’ 과제(PGS4262)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Ahn, J.W., Seol, H.S., Jung, H.S. and Park, Y.H., 2022. Study of the open-water test and analysis for a pumpjet propulsor in LCT. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 59(3), pp.149-156.
- Ahn, J.W., Seol, H.S., Lee, Y.Y. and Park, Y.H., 2021. Study of the self-propulsion test and analysis for the submerged body in LCT. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 58(2), pp.58-65.



Ahn, J.W., Seol, H.S., Park, Y.H. and Kim, K.S., 2020. Study of the resistance test and wall blockage correction method for the submerged body in LCT. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 57(3), pp.133–139.

Aidan, M., 2018. *A Comparison of pumpjets and propellers for non-nuclear submarine propulsion*, Trendlock Consulting.

Crook, B., 1990. *Resistance for DARPA suboff as represented by model 5470*, David Talor Research Center Report, Report No DTRC/SHD-1298-07.

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.

Renilson, R., 2015. *Submarine Hydrodynamics*, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology.

The Ship Hydrodynamics Research Committee, 2009. *Ship Resistance and Propulsion*, Society of Naval Architects of Korea.

