



# 대형 캐비테이션터널에서 몰수체 저항시험 및 해석 기법 연구

안중우<sup>†</sup>·설한신·이영연·박영하  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## Study of the Self-Propulsion Test and Analysis for the Submerged Body in LCT

Jong-Woo Ahn<sup>†</sup>·Han-Shin Seol·Young-Yeon Lee·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 in Large Cavitation Tunnel (LCT), DARPA Suboff, a submarine model publicly available was manufactured. The resistance results of DARPA Suboff was acquired from the LCT tests and compared with those of DTRC. After the wall blockage correction, the resistance results of LCT were in good agreement with those of DTRC. On the basis of the resistance results of LCT, the self-propulsion tests were conducted in LCT. The test objective was to get the full-scale propeller operating conditions for the propeller cavitation and noise tests. The test results of DARPA Suboff were analyzed in a way similar to the analysis techniques of those of the Towing Tank (TT). Another submerged body, for which self-propulsion tests were conducted in TT, was selected for results verification. The results of LCT were in good agreement with those of TT. On the basis of the present study, it is thought that the operating conditions for the full-scale submerged body can be drawn through LCT tests.

**Keywords** : Submerged body(몰수체), Self-propulsion test(자항시험), Wall blockage correction(벽면효과 수정), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형캐비테이션터널)

### 1. 서론

수중 몰수체의 저항 및 자항 추진성능시험은 일반적으로 예인 수조에서 수행되어 왔다. 수중 몰수체의 경우 수면과의 영향을 받지 않기 때문에 대형캐비테이션터널에서 저항 및 자항 추진성능시험이 가능하지만 제한 수로에 의한 벽면 위벽효과(wall blockage effect)가 나타나 예인수조 결과와는 차이가 있다. 따라서, 벽면 위벽효과 문제를 해결하기 위하여 미국 해군연구소(DTRC)에서 공개한 DARPA Suboff 잠수함(Grove et al., 1989)을 검증 대상으로 대형캐비테이션터널에서 저항시험을 수행한 바 있으며, 벽면위벽효과를 수정한 후에 미 해군연구소에서 제시한 저항시험 결과와 비교하여 유사한 결과를 얻은 바 있다(Ahn et al., 2020). 본 연구에서는 대형캐비테이션터널 실험으로부터 얻은 저항시험 결과를 기반으로 DARPA Suboff 잠수함의 자항시험을 수행하였으며 실선

성능을 추정하였다. 실선성능 추정의 목적은 프로펠러 캐비테이션 및 소음 시험을 위한 선속별 운항조건을 도출하는 것이다. 자항시험을 위하여 사용된 프로펠러는 INSEAN에서 설계하고 공개한 E1619이다(Di Felice et al., 2009).

예인수조에서 수행되는 저항 및 자항성능 추진시험은 Froude 수 상사법칙에 맞추어 수행하게 되는데, 약 5m 길이의 모형 몰수체를 고려할 때 3.0m/s 이하로 예인하여 예인력을 계측하는 방식으로 시험이 진행된다. 대형 캐비테이션터널(LCT)에서 수행되는 수중 몰수체의 소음 및 캐비테이션 시험 유속은 약 10.0m/s 근처이다. 상선 반류의 경우 유속이 높아질수록 경계층 두께 감소로 프로펠러 중심축 및 중심면을 향하여 반류분포가 수축되면서 실선 반류분포로 접근하게 된다(Ahn et al., 2017). 따라서, 높은 유속에서의 저·자항 계수 및 선체-부가물-추진기 유동 상호작용에 의한 반류 분포 등도 낮은 유속에서 얻은 결과와 차이가 있을 수 있

다. 본 연구에서는 10.0m/s 이상의 높은 유속에서도 수중 물수체 저항 및 저항시험이 가능한 대형캐비테이션터널 (Ahn et al., 2015)에서 모형시험을 수행하여 높은 유속에서 도출된 저·자항 계수 특성을 조사하고 낮은 유속의 결과와 비교해 보고자 한다.

현재 대형 캐비테이션 터널에서 수행되는 프로펠러 및 부가물 등의 캐비테이션 및 소음 시험의 시험 조건은 예인수조에서 수행된 저·자항시험 결과를 이용하여 도출하고 있다. 그러나 예인수조에서 저·자항시험을 수행하려면 수중 물수체 모형을 별도로 제작하여야 하며, 시험을 위한 사전 준비가 장시간 요구되어 수상선박 시험에 비하여 상대적으로 시험 수행이 어렵다. 대형 캐비테이션터널에서 수중 물수체의 저·자항시험 수행하여 실선성능 해석이 가능하다면, 선형 및 추진기 개발 단계에서 예인수조에서 수행하는 시험 수행 횟수를 감소시킬 수 있으며, 설치 후 관련 모형시험이 연속적으로 수행됨에 따라 추진기 캐비테이션 및 소음 등의 시험이 효과적으로 수행될 수 있다.

대형 캐비테이션터널에서 수행된 저항시험의 유속범위는 2.0 ~ 11.0m/s 이며, 1.0m/s 간격으로 시험을 수행하였다. DARPA Suboff 잠수함은 실선이 존재하지 않는 연구용 모형이므로 실선 성능 해석을 위하여 기존에 수행된 물수체 자료 등을 기반으로 축적비를 15.0으로 가정하였다. 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. 대형캐비테이션터널에서 저항 시험 해석은 2차원 해석법을 적용하였으며, 선속별 실선 저항점은 표면마찰보정( $F_D$ )과 부력을 함께 고려하여 결정하였다. 유효반류비는 추력일치법(thrust identity)으로 프로펠러 단독시험 결과로부터 전진계수를 구하여 산정하였다. 실선성능은 ITTC 1978 해석 기법에 따라 추정되었으며, 2차원 해석방법을 적용하였다. 마찰저항계수( $C_f$ )는 물수체의 저항특성을 고려하여 ATTC 곡선으로 산정하였다.

본 연구의 목적은 대형캐비테이션터널의 저·자항시험을 통하여 캐비테이션 시험 조건 도출을 위한 선속별 실선 운항 조건을 추정하는 것이다. DARPA Suboff 잠수함을 대상으로 예인수조에서 수행하는 물수체 저·자항시험 해석기법에 따라 실선성능을 추정하여 캐비테이션 시험 조건을 도출하였으나, 대상선은 예인수조에서 저항시험이 수행되지 않았으므로 결과에 대한 검증이 요구되었다. 따라서 기존에 예인수조에서 저·자항시험과 실선성능 추정이 수행된 유사 물수체를 대상으로 대형캐비테이션터널에서 저·자항시험을 수행하였으며, 앞서 언급된 해석방법에 따라 실선 성능을 추정하여 실선 운항조건을 도출하였으며 예인수조 결과로부터 도출된 실선 운항조건과 비교하였다.

## 2. 수중 물수체 시험 모형 및 장치

대형 캐비테이션터널에서 수중 물수체 저항시험 기법을 개발

하기 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, 저항시험을 위한 프로펠러가 설치되어 있다. 저항시험을 수행하려면 물수체 저항을 계측할 수 있는 저항동력계와 프로펠러 추력 및 토크를 계측할 수 있는 프로펠러 동력계가 Fig. 2와 같이 설치되어야 한다. 저항동력계 사양은 기존 논문 (Ahn et al., 2020)에서 언급한 바 있으며, 프로펠러 동력계 사양은 Table 1에 나타나 있다. 본 연구에서 사용한 프로펠러 동력계는 마찰에 의한 소음 발생을 억제하고자 무선 방식(telemetry system)으로 계측 신호를 전달하는 방식을 채택하고 있다. 회전하는 프로펠러의 추력 및 토크 신호를 전달하는 기존 방식은 슬립링 시스템인데, 슬립링과 브러쉬 간에 마찰에 의한 소음 발생 문제가 있었다. 따라서 슬립링 방식은 추진기 소음 실험 시 유동 소음 등의 계측을 어렵게 하는 원인이 되기도 하였다. 일반적으로 잠수함 등의 수중 물수체 개발시 은밀성이 강조됨에 따라 소음 관련 연구가 반드시 요구되는 바, 무선으로 신호를 전달할 수 있는 프로펠러 동력계가 필수적으로 요구된다.

대형 캐비테이션터널 시험부에 설치된 수중 물수체는 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 4는 저항시험을 수행하기 위하여 선미에 프로펠러가 설치된 상태를 보여준다. 저항시험 수행을 위하여 선정한 프로펠러는 DARPA Suboff 잠수함을 대상으로 INSEAN에서 설계한 E1619이다. E1619는 기본 제원 및 3차원 모델링 자료가 공개되어 있어 그 자료를 바탕으로 KP1424 프로펠러를 제작하였다. KP1424 프로펠러는 소음 연구를 위하여 프로펠러 자체에서 발생하는 singing 현상을 감쇄시키고자 황동으로 제작하였으며 주요 제원은 Table 2에 나타나 있다 (Seol et al., 2015).

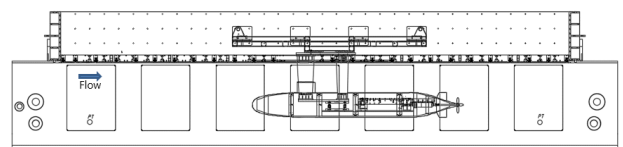


Fig. 1 The submerged body installed in LCT test section

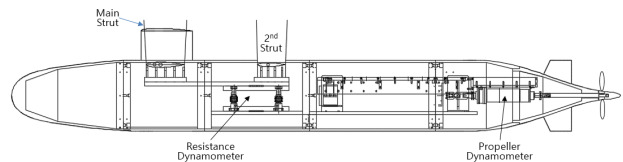


Fig. 2 The insides of the submerged body

Table 1 Specification of propeller dynamometer

Item		Value
Rated capacity	Thrust (N)	±2,200
	Torque (N-m)	±120
	Revolution(rpm)	±3,500
Non-linearity (% of F.S.)		±0.3
Hysteresis (% of F.S.)		±0.3
Repeatability (% of F.S.)		±0.2
Allowable overload (% of F.S.)		±150

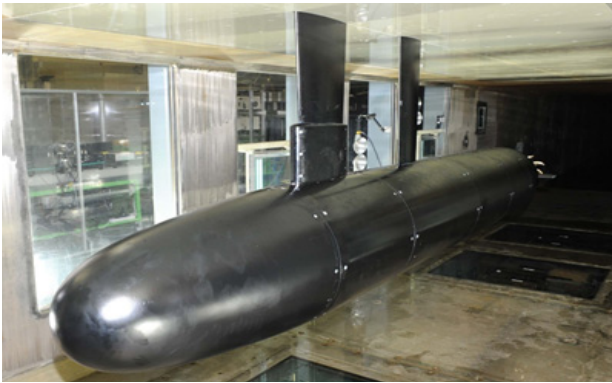


Fig. 3 The photograph of the submerged body

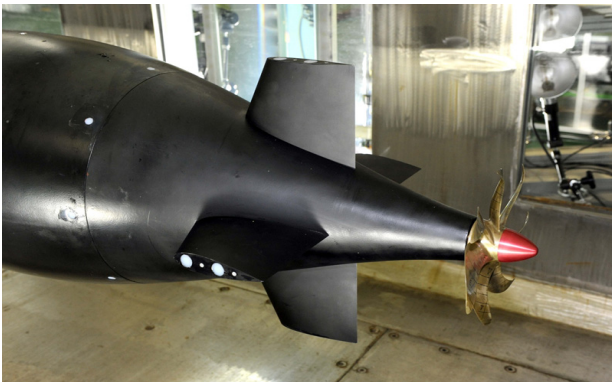


Fig. 4 Installation for the self-propulsion test

Table 2 Main particulars of KP1424 Propeller

Description	Symbol	Magnitude
Propeller diameter	DPM	0.262m
Number of blades	Z	7
Expanded area ratio	AE/Ao	0.608
Hub/Diameter ratio	DH/DPM	0.226
Pitch/Diameter ratio at 0.7R	P0.7R/DPM	1.15

### 3. 저항시험 및 실선성능 해석

벽면이 존재하는 대형 캐비테이션터널에서 타당한 저항시험 결과를 얻기 위하여는 저항시험을 수행한 후 부력효과 (buoyancy effect), 물체위벽효과(solid blockage effect) 및 반류위벽효과(wake blockage effect)를 수정하여야 한다 (Rae & Pope, 1984). 부력 효과는 대형 캐비테이션터널 벽면에 경계층이 생성됨으로서 하류로 갈수록 유속이 증가되고 압력이 감소되면서 수중 물수체의 저항이 증가되는 현상인데, 압력 구배를 산정할 수 있는 2가지 방법이 제시된 바 있다. Prandtl이 제안한 power-law 식으로 배제두께(displacement thickness,  $\delta^*$ )를 구하여 압력구배를 산정하거나 (White, 1974), 대형캐비테이션터널 시험부 상류와 하류에서 압력을 측정하여 산정하는 방법이다. 2가지 방법 모두 전저항계수( $C_T$ )에서 차이가 없었으나, 잉여저항계수( $C_R$ )에서 차이를 보여주었다. 잉여저항계수( $C_R$ )를 산정

하는 마찰저항계수( $C_F$ )는 ATTC 곡선으로부터 구하는 것이 미국 해군연구소(DTRC)의 실험결과에 좀 더 접근하였다 (Ahn et al., 2020). 따라서, 본 연구에서 저항성능 해석은 배제두께(displacement thickness,  $\delta^*$ )로부터 부력을 산정하는 방법과 ATTC 곡선으로부터 산정된 마찰저항계수를 이용하여 수행된다. 대형캐비테이션 터널(LCT)의 최종 저항( $R_{TM}$ )결과는 부력( $\Delta D_B$ )을 수정한 후 물체위벽효과 및 반류위벽효과를 고려하여 약 5.3%의 유속을 수정하여 구하였다 (Ahn et al., 2020).

Fig. 5는 대형캐비테이션 터널(LCT)과 미국 해군연구소(DTRC) 고속 예인수조 모형시험으로부터 얻은 전저항계수( $C_{TM}$ ) 및 잉여저항계수( $C_{RM}$ )의 비교를 보여준다. 잉여저항계수의 차이는 전저항계수에서 나타난 경향이 비교적 반영된 것으로 사료된다. 그런데, 전저항계수 차이가 큰 저속구간(3.0m/s 이하)에서는 잉여저항계수가 비교적 일치하는 경향을 보여준다. DTRC 보고서에는 수온 등의 정보가 없어 본 연구에서 제시한 마찰저항계수 산정 방법을 적용할 수 없었다. 따라서, DTRC의 잉여저항계수와 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있는 수온을 찾아서 ATTC 곡선을 이용한 잉여저항계수를 산정한 바 있는데, 전저항계수와 유사한 경향을 보여준다. 즉 저속에서 잉여저항계수가 현재의 결과보다 증가된다. DTRC는 ATTC 곡선 등을 이용하여 마찰저항계수를 구하지 않은 것으로 사료되며, 그 방법이 언급된 참고자료를 찾기는 어려운 상황이다. 마찰저항계수를 얻는 방법에 차이도 잉여저항계수에 차이를 줄 수 있다고 사료된다.

Fig. 6은 실선의 축적비( $\lambda$ )를 15.0으로 가정하여 얻은 전저항계수( $C_{TS}$ )이며, 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$C_{TS} = C_{FS} + C_A + C_{RS} \tag{1}$$

여기서, 실선 유속은 Froude 수로부터 구할 수 있으며,  $C_{FS}$ 와  $C_{RS}$ 는 실선 마찰저항계수와 잉여저항계수이다. 실선 마찰저항계수는 ATTC 곡선 수식으로 구할 수 있으며, 잉여저항계수는 Fig. 6의 모형에서 구한 값을 사용한다.

$$C_{RM} = C_{RS} \tag{2}$$

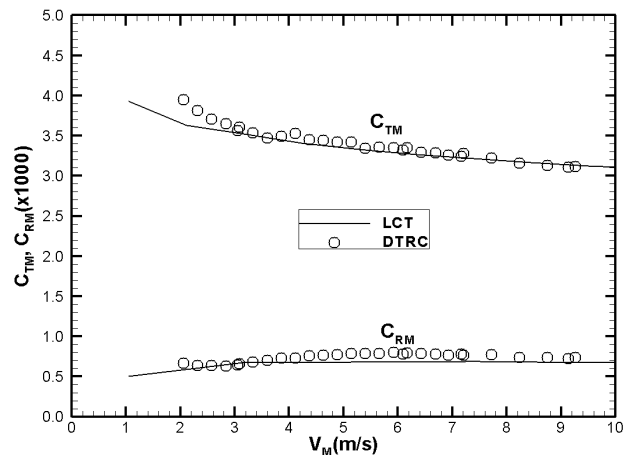


Fig. 5 Comparison of total resistance coefficient and residuary resistance coefficient (model)

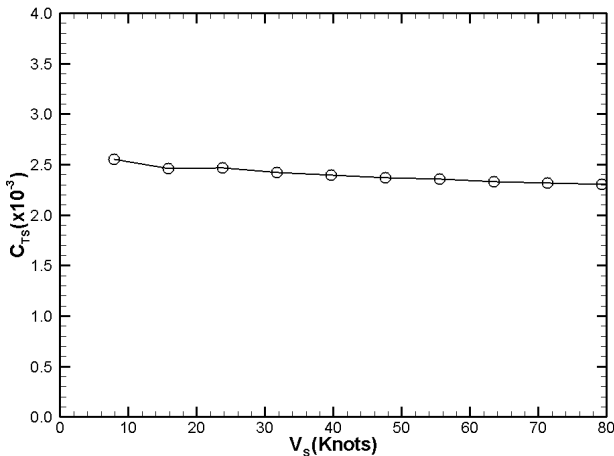


Fig. 6 Total resistance coefficient (full-scale)

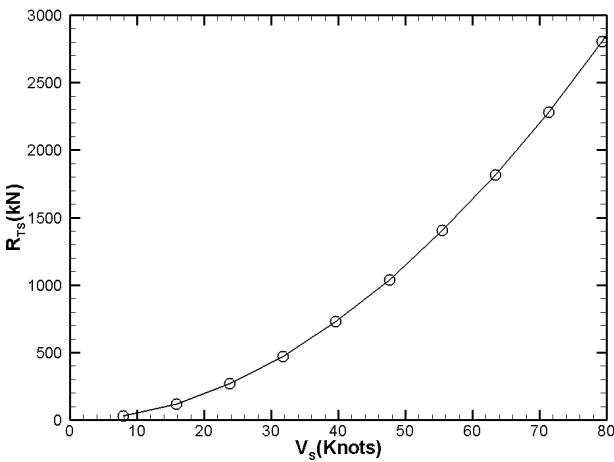


Fig. 7 Total resistance (full-scale)

$C_A$ 는 선형의 표면 거칠기에 따른 마찰저항 수정계수로서 본 연구와 같이 2차원 해석법을 적용하는 경우에는 모형선-실선 상관계수로 표현되는데, 기관 고유의 값을 사용한다. 실선 전저항계수를 구할 때 공기저항계수( $C_{AA}$ )를 고려하여야 하나 본 연구에서는 물수체가 수중에서만 작동하는 조건에서 해석을 수행하므로 고려하지 않았다.

Fig. 7은 Fig. 6의 전저항 계수로부터 계산된 실선 전저항 ( $R_{TS}$ )을 보여준다. Froude 수 기반으로 실선 선속을 산정하면서 매우 높은 선속에서의 저항이 도출되고 있다. 20knots 이상의 선속에서 전저항계수가 선형적으로 점차 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 7로부터 실선 유효마력( $P_E$ )을 산정할 수 있다.

#### 4. 모형 자항시험 및 해석

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.

$$F_D = \frac{\rho_M V_M^2}{2} S_M [C_{FM} - (C_{FS} + C_A)] \quad (3)$$

여기서  $\rho_M$ 은 대형캐비테이션터널의 물의 밀도,  $V_M$ 은 시험부의 수정 유속,  $S_M$ 은 물수체 모형의 침수 표면적이다.

에인수조 시험에서는 표면마찰보정 만을 고려하여 자항점을 결정하면 되지만, 대형캐비테이션터널 시험에서는 부력을 추가하여 보정하여야 한다. Fig. 8은 대형캐비테이션터널에서 자항점 결정을 위하여 수행된 실험결과를 보여준다. 각각의 시험선속에서 프로펠러 회전수를 변경하면서 저항동력계에서 계측된 물수체 저항( $F_x$ )과의 관계를 보여준다. 각각의 선속에서 자항점은 표면마찰보정과 부력을 합친 값을 고려해주면 된다. Fig. 8은 자항점에서의 프로펠러 회전수( $n_m$ )를 얻을 수 있도록 각각의 선속에서 표면마찰보정과 부력을 합친 값을 표시하였다. 이때 각각의 선속은 물체 및 반류 위벽효과를 수정한 값이다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각의 선속에서 프로펠러 동력계에서 계측된 추력( $T_m$ ) 및 토크( $Q_m$ )를 보여준다. Fig. 9에서 얻은 자항점에서의 프로펠러 회전수를 이용하여 Fig. 9와 Fig. 10으로부터

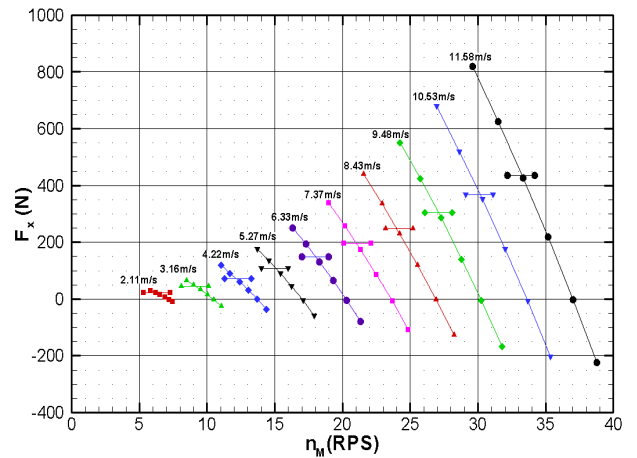


Fig. 8 Self-propulsion point at each speed

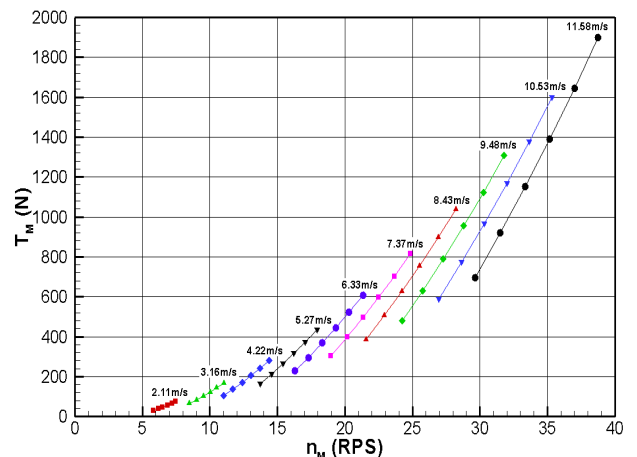


Fig. 9 Propeller thrust at each speed

프로펠러 추력 및 토오크를 구할 수 있다. 추력, 토오크 및 회전수로 모형의 추력계수  $K_{TM}$ 과 토오크계수  $10K_{QTM}$ 을 얻을 수 있다.

Fig. 11는 예인수조에서 수행된 KP1424 프로펠러의 단독시험 결과를 보여준다. 저항점에서의 추력계수( $K_{TM}$ )를 이용하여 추력일치법(Thrust identity)으로 동일추력점에서 모형 전진계수( $J_{TM}$ )와 프로펠러 단독상태에서의 토오크계수( $10K_{QTM}$ )를 얻을 수 있다.

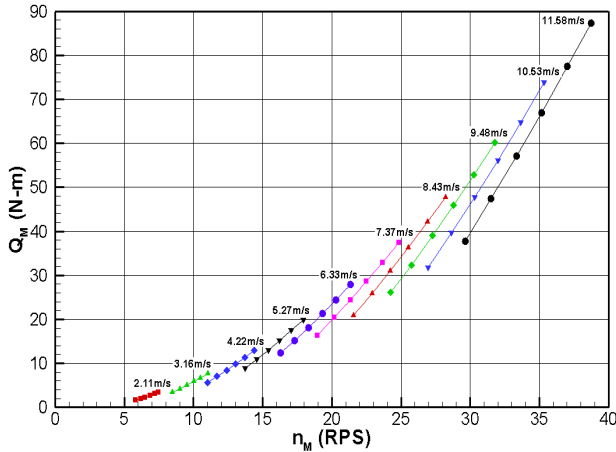


Fig. 10 Propeller torque at each speed

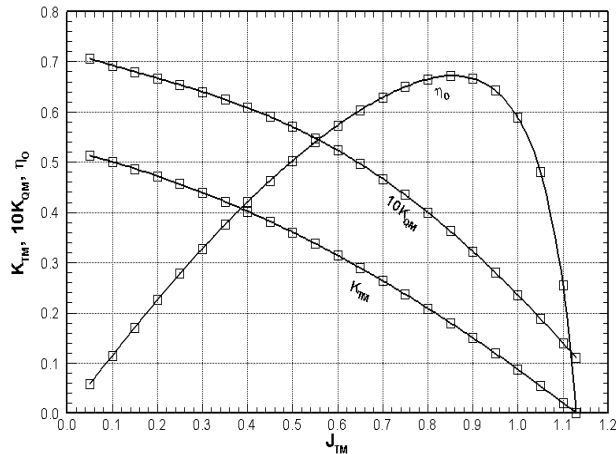


Fig. 11 POW results of KP1424 propeller

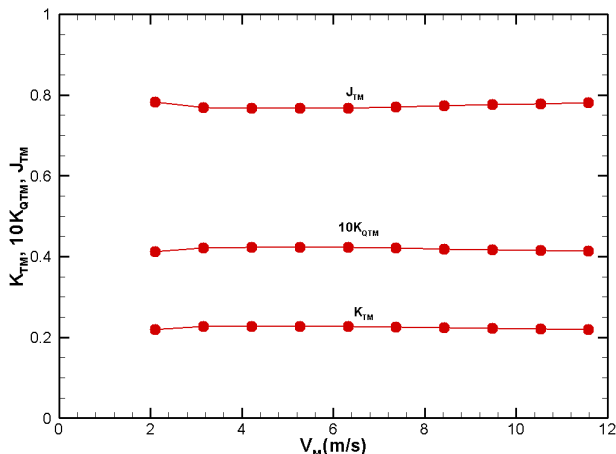


Fig. 12  $J_{TM}$  &  $10K_{QTM}$  acquired from POW results

Fig. 12는 프로펠러 단독시험 결과로부터 동일 추력점에서 얻어진 모형 전진계수( $J_{TM}$ )와 토오크계수( $10K_{QTM}$ ) 분포를 보여준다.

Fig. 13은 모형시험 결과로부터 얻은 저항계수 분포를 보여준다. 모형선 반류비  $W_{TM}$ 은 다음과 같다.

$$W_{TM} = 1 - \frac{J_{TM} D_{PM}^n}{V_M} \quad (4)$$

다음 식을 이용하여 상대회전효율( $\eta_R$ )을 구할 수 있다.

$$\eta_R = \frac{K_{QM}}{K_{QTM}} \quad (5)$$

추력감소비( $t$ )는 다음 식으로 얻는다.

$$t = \frac{T_M + F_D - R_{TM}}{T_M} \quad (6)$$

모형저항( $R_{TM}$ )은 저항시험과 저항시험 간에 온도차를 보정한 값을 사용하였다. 각각의 모형 저항계수는 저속 및 고속에서 차이가 거의 없는 것으로 나타난다.

예인수조에서 수행된 기존에 잠수함과 같은 수중물수체 모형시험 결과를 검토해 보면 선형과 추진기 특성에 따라 차이가 있지만 추력감소계수는 0.15~0.2, 모형 반류비는 0.3~0.4, 상대회전효율은 0.97~1.0 범위에서 도출된다. 또한 고속영역으로 갈수록 저항계수들이 일정하거나 미소하게 증가하는 경향을 보인다. 본 논문의 대상선은 기존에 잠수함 형상과는 차이가 있지만 저항요소들은 유사한 범위에서 도출된 것으로 사료되며, 유속 변화에 따른 저항요소의 특성이 예인수조의 통상적인 결과와 유사한 것으로 나타났다.

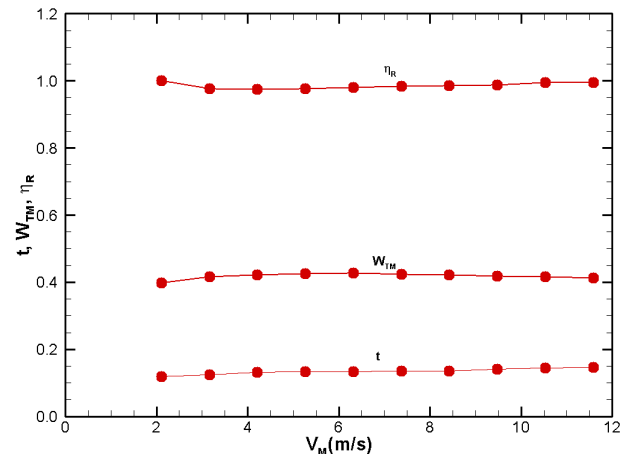


Fig. 13 Self-propulsion coefficients of model scale

## 5. 실선 성능 추정

실선성능 추정은 ITTC에서 제시한 표준 성능 추정법에 따라 수행된다 (Kim et al., 2009). 실선의 반류는 모형선 반류  $W_{TM}$

과 추력감소계수  $t$ 를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$W_{TS} = (t + 0.04) + (W_{TM} - t - 0.04) \frac{C_{FS} + C_A}{C_{FM}} \quad (7)$$

Fig. 14는 Fig. 11에 프로펠러 단독시험 결과를 ITTC '78 방법에 따라 실선으로 추정한 결과를 보여준다. 실선에서의 전진계수( $J_{TS}$ )와 토오크계수( $10K_{QTS}$ )는 Fig. 14로부터 구할 수 있는데,  $x$ -축의  $K_T/J^2$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S_S}{2D_{PS}^2} \times \frac{C_{TS}}{(1-t)(1-W_{TS})^2} \quad (8)$$

여기서  $S_S$ 는 실선 침수표면적이며,  $D_{PS}$ 는 실선 프로펠러 직경이다.  $C_{TS}$ 는 Fig. 7에 나타나 있다. 전진계수와 토오크계수는 해당 선속에서 계산된  $K_T/J^2$ 에서 값을 읽으면 된다. 실선 추정된 추진계수들의 선속별 분포는 Fig. 15에 나타나 있다. Fig. 15에 나타난 추진계수들을 이용하여 실선에서의 물리량을 산정할 수 있다. 실선 추진계수들도 저속과 고속에서 큰 차이는 없으므로 나타났다. 실선 반류비는 기존 예인수조 실험에서 0.28~0.35 사이에서 도출된 바 있는데, 현재의 대상선도 그 범위 안에서 도출되었다.

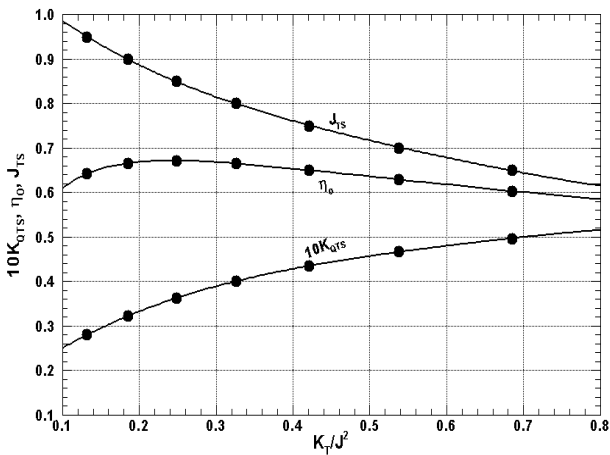


Fig. 14 Full-scale results of POW model test

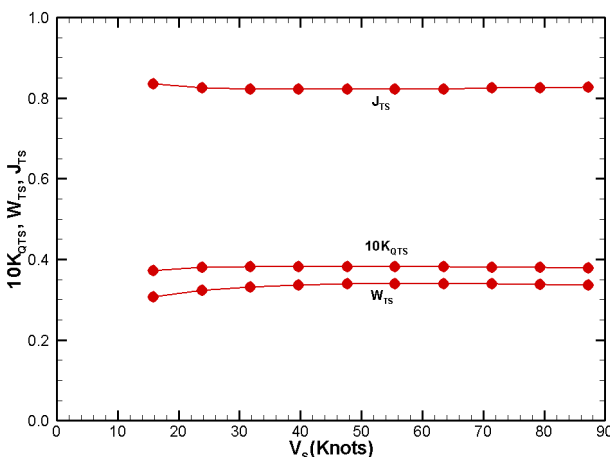


Fig. 15 Propulsion coefficients of full-scale ship

실선 추진기 회전수는 Fig. 16에 나타나 있는데, 다음과 같이 산정된다.

$$N_S = \frac{(1 - W_{TS}) V_S}{J_{TS} D_{PS}} \times 60 \quad (9)$$

Fig. 17의 나타난 실선 전달마력은 다음과 같이 산정된다.

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

준추진효율은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \quad (11)$$

유효마력은 Fig. 8에 해당선속과 실선저항으로 산정한다.

실선 프로펠러 추력은 Fig. 18에 나타나 있는데, 다음과 같이 산정된다.

$$T_S = \frac{K_T}{J^2} J_{TS}^2 \rho_s D_{PS}^4 N_S^2 \times 10^{-3} \quad (12)$$

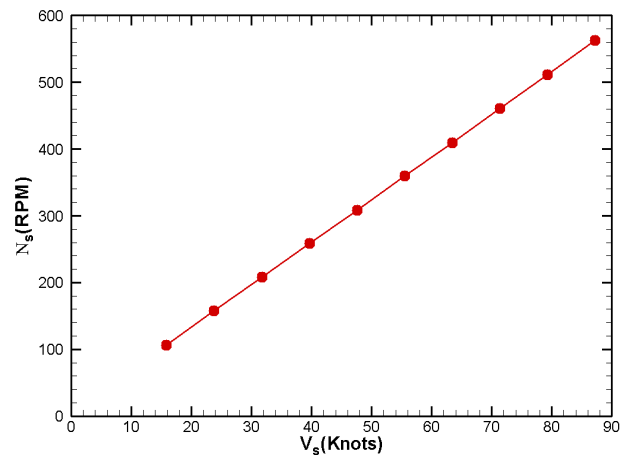


Fig. 16 Propeller rotational speed of full-scale ship

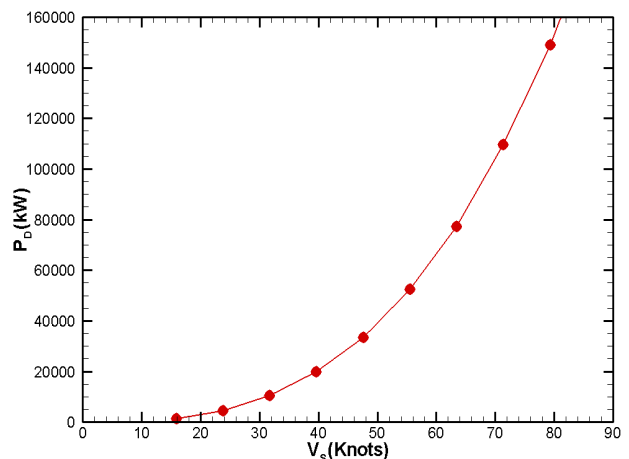


Fig. 17 Delivered power of full-scale ship

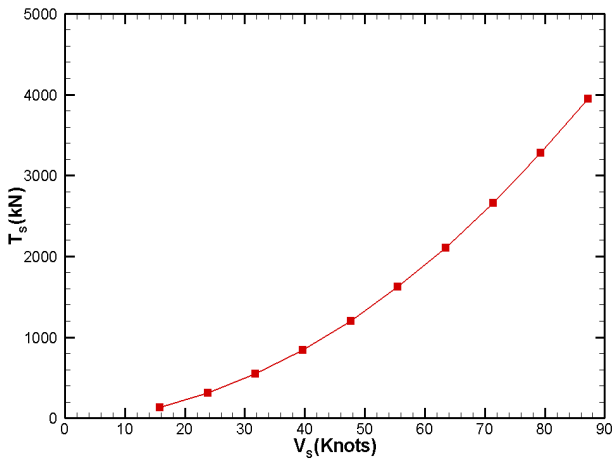


Fig. 18 Thrust of full-scale ship

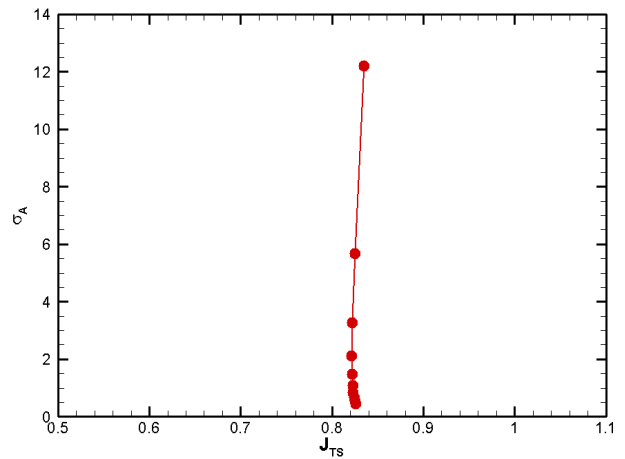


Fig. 19 Operating profiles of full-scale ship

### 6. 실선 운항조건 도출 및 결과 검증

대형캐비테이션터널에서 저항시험을 수행하고 실선성을 추정할 한 목적은 캐비테이션 시험 조건 도출을 위한 실선 운항 조건을 산정하는 것이다. 프로펠러 캐비테이션 시험을 수행하려면 해당 선속에서 추력계수와 캐비테이션 수 정보가 요구된다. 해당 선속의 추력계수는 Fig. 18로부터 산정할 수 있다. 캐비테이션 수는 회전수 기반( $\sigma_n$ )과 전진속도 기반( $\sigma_A$ )으로 산정할 수 있는데, 프로펠러 중심에서의 회전수 기반 캐비테이션 수는 다음과 같다.

$$\sigma_n = \frac{P_a + \rho_s g H - P_v}{\frac{1}{2} \rho_s (N_s/60)^2 D_{PM}^2} \quad (13)$$

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

프로펠러 중심에서의 전진속도 기반 캐비테이션 수는 다음과 같이 산정된다.

$$\sigma_A = \frac{\sigma_n}{J_{TS}^2} \quad (14)$$

Fig. 19는 실선의 선속별 작동 조건을 보여준다. 전진계수와 캐비테이션 수와의 관계를 보여주는데, 선속별 조건에 따라 캐비테이션 관찰 및 소음 실험을 수행한다. 또한 CIS(Cavitation Inception Speed) 시험시 캐비테이션 종류별로 전진계수를 고정하고 대형캐비테이션터널 시험부 압력을 변경시키면서 캐비테이션이 초기 발생하는 캐비테이션 수를 찾아서 전진계수별 분포를 Fig. 19에 표기하면, 캐비테이션 종류별 초기 발생 선속(CIS)을 찾을 수 있다. 따라서 소음 및 캐비테이션시험을 수행하는데 있어서 선속별 시험조건을 정도 높게 도출하는 것이 중요하다.

DARPA Suboff 잠수함을 대상으로 저항 및 저항시험을 수행하여 실선 운항조건을 도출하였다. 저항시험은 기존 예인수조 시험 결과가 있어 결과 검증이 가능했지만, 저항시험은 예인

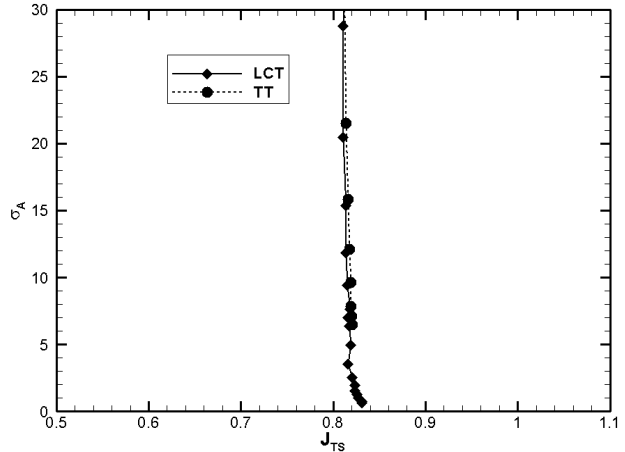


Fig. 20 Comparison of operating profiles between LCT & TT

수조 결과가 없어 실선 추정 결과 검증을 할 수가 없었다. 따라서 대형캐비테이션터널에서 수행된 저항시험 결과를 검증하기 위하여 예인수조에서 저항시험을 수행한 바 있는 유사 물수체를 대상으로 대형캐비테이션터널에서 저항 및 저항시험을 수행하였다. 시험결과는 앞서 언급된 해석 기법을 이용하여 성능을 추정하였으며, 선속별 실선 운항 조건도 도출하였다. 지금까지 캐비테이션 시험 조건 도출을 위한 실선 운항조건 산정은 예인수조 저항 해석 결과를 이용하여 수행되었다. Fig. 20은 예인수조(TT)와 대형캐비테이션터널(LCT)에서 수행된 저항 및 저항시험을 결과를 이용해서 추정된 실선 운항조건의 비교를 보여준다. 두 결과는 약간의 차이가 있지만 캐비테이션 및 소음 시험 수행을 위한 시험 조건으로 사용하는데 문제가 없을 것으로 사료된다. 따라서, 물수체 프로펠러 및 부가물 개발 단계에서 현재의 실선 추정방법은 충분히 활용 가능하리라 사료된다.

### 7. 결론

대형 캐비테이션터널에서 DARPA Suboff 잠수함을 대상으로 수중 물수체의 저항시험을 수행한 바 있으며, 3종의 위벽효과(부력효과, 물체위벽효과, 반류위벽효과)의 수정을 통하여

미 해군연구소(DTRC) 저항시험 결과와 비교하여 거의 근접된 결과를 얻은 바 있다. 본 연구에서는 대형캐비테이션터널에서 수행된 저항시험 결과를 기반으로 저항시험을 수행하였으며, 당초 예인수조에서 채택한 ITTC 1978 해석기법을 이용하여 실선 성능을 추정하였다. 본 연구의 목적은 프로펠러 캐비테이션 및 소음 시험을 위한 시험 조건을 도출하는 것으로 일련의 해석 과정을 거쳐 대형캐비테이션 터널에서 수행된 저항 및 저항시험 결과로부터 선속별 실선 운항 조건을 도출할 수 있었다.

대형캐비테이션터널에서 소음 및 캐비테이션 시험이 수행되는 고속 영역까지 저항시험을 수행하여 예인수조 시험 유속인 저속 영역의 저항추진계수와와의 관계를 검토하였다. 저속과 고속 영역에서 반류 등의 변화로 인한 저·저항 계수 등에 차이가 있을 수 있다고 사료되었으나, 20knots 이상의 실선 선속에서는 거의 차이가 없는 수렴된 결과를 보여주었다. 예인수조에서 3.0 m/s 이하의 낮은 Reynolds 수에서 시험이 진행되지만 제한된 실선 속도범위에서는 신뢰할 수 있는 실선 추진성능 추정결과를 제공할 수 있다고 사료된다.

DARPA Suboff 잠수함 모형은 예인수조용 모형이 제작되지 않아 예인수조 저항시험이 수행되지 않았다. 따라서, 결과를 검증할 수 없는 바, 예인수조에 저항시험이 수행되었던 유사 물수체를 대상으로 대형캐비테이션터널에서 저항 및 저항 시험을 수행하였다. DARPA Suboff 잠수함 실선성능 해석 기법과 동일한 방법으로 실선 성능이 추정되었으며, 예인수조 결과로부터 추정된 실선 운항조건과 비교하였다. 추정 결과에 차이가 거의 없어 대형캐비테이션터널 저항 및 저항시험을 통하여 도출된 운항조건은 캐비테이션 및 소음 시험을 위한 시험 조건으로 사용하는데 문제가 없으리라 사료되었다. 따라서, 대형캐비테이션터널 저항 및 저항시험 결과를 활용하여 캐비테이션 및 소음 시험 조건 도출이 가능함을 알 수 있었다.

수중 물수체에 대한 정도 높은 저항 및 저항시험은 예인수조에서 수행하여야 하지만 개발단계에서 대형캐비테이션터널 시험 결과를 활용하여 운항조건을 도출할 수 있다면 시간 및 비용 면에서 상당한 장점이 있다. 물수체 부가물 및 추진기 형상 변경시마다 예인수조 저항시험이 요구된다면 개발에 필요한 캐비테이션 및 소음 시험을 원활하게 진행하는데 어려움이 있다. 대형캐비테이션터널에서 저항 및 저항시험을 수행하여 캐비테이션 및 소음 시험 조건을 도출하게 됨으로서 수중 물수체 추진기 관련 일련의 모형시험이 대형캐비테이션터널에서 수행될 수 있는 기반이 마련되었다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방연구소가 지원한 특화연구실 사업 '미래 잠수함 추진기 소음 모형시험법 개발 및 D/B 구축연구' 과제(PGS4262)와 주요사업 '고효율/저소음 선박을 위한 추진기소음 원천기술 개발 및 실선적용 연구' 과제(PES3890)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

Ahn, J.W., Kim G.D., Kim, K.S. & Park Y.H., 2015. Performance trial-test of the full-scale driving pump for the Large Cavitation Tunnel(LCT). *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.428-434.

Ahn, J.W., et al., 2017. Performance improvement study of propeller propulsion efficiency and cavitation for the 8800 class container. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 54(6), pp.453-460.

Ahn, J.W., Seol, H.S., Park, Y.H. & 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.

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

Di Felice, F., Felli, M., Liefvendahl, M, & Svennberg, U., 2009. Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller. *First International Symposium on Marine Propulsors smp'09*, Trondheim, Norway.

Groves, N., Huang, T. & Chang, M., 1989. *Geometric characteristics of DARPA Suboff models David Taylor research center report*, Report No DTRC/SHD-1298-01.

Kim, H.C. et. al., 2009. Ship resistance and propulsion. *The Society of Naval Architects of Korea*.

Rae, W.H. & Pope, A., 1984. *Low-speed wind tunnel testing - 2<sup>nd</sup> Ed*, John Wiley & Sons.

Seol, H. S. et. al., 2015. Propeller cavitation noise model test in KRISO large cavitation tunnel and its comparison with full-scale results. *4th International conference on advanced model measurement technology for the maritime industry (AMT'15)*.

White, F.M., 1974, *Viscous fluid flow*, McGraw-Hill Book company.

