

프로펠러 설계 및 선미 부가물 수정에 따른 캐비테이션 초기발생 선속(CIS) 성능 향상 연구

안종우[†]·김건도·백부근·박영하·설한신
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Study of the Cavitation Inception Speed (CIS) Improvement Through the Propeller Design and the Stern Appendage Modification

Jong-Woo Ahn[†]·Gun-Do Kim·Bu-Geun Paik·Young-Ha Park·Han-Shin Seol
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 improve the propeller Cavitation Inception Speed (CIS) performance, it needs to modify the propeller geometry and the wake distribution that flows into the propeller. In the previous study, the twisted angles of the V-strut were modified to improve propeller CIS, cavitation behavior and pressure fluctuation performances. Then the propeller behind the modified V-strut (New strut) showed better cavitation characteristics than that behind the existing V-strut (Old strut). However, the CIS of Suction Side Tip Vortex (SSTV) and Pressure Side Tip Vortex (PSTV) showed a big difference at behind each V-strut. In this study, the balance design is conducted to minimize the difference between SSTV CIS and PSTV CIS at behind each V-strut. To improve the propeller CIS performance, 1 propeller is designed at behind the old strut and 3 propellers are designed at behind the new strut. The propeller CIS is increased through the balance design and the stern appendage modification. The final propeller CIS is increased about 5.3 knots higher than that of the existing propeller at behind the old strut. On the basis of the present study, it is thought that the better improvement method for the propeller CIS would be suggested.

Keywords : Cavitation Inception Speed(CIS, 캐비테이션 초기발생 선속), Propeller design(프로펠러 설계), Appendage modification(부가물 수정), Propeller cavitation(프로펠러 캐비테이션), V-Strut(V-스트럿), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형캐비테이션터널)

1. 서론

함정의 소음 수준은 함의 전투력 향상 및 생존성 확보에 매우 중요한 요소이다. 함정에서의 소음원은 크게 3종류로 선체 외부면 유동에 의한 유체 소음, 선체 내부의 추진 기계류 및 보기류에 의한 소음 및 프로펠러 캐비테이션 발생으로 인한 소음으로 분류된다. 저속에서는 유동 및 추진 기계류 등에 의한 소음이 지배적이지만 선속이 증가함에 따라 프로펠러 캐비테이션 발생량이 증가하면서 캐비테이션에 의한 소음 수준이 다른 소음원보다 월등하게 증가하게 된다. 따라서, 함의 캐비테이션이 처음 발생하는 선속인 CIS(Cavitation Inception Speed) 성능은 함정 소음 성능 설계에 중요한 요소이다.

최근에 건조되는 함정 프로펠러의 경우에는 CIS 성능을 향상

시키고자 기본 설계 단계부터 목표치/기준치 설정을 위한 설계 및 모형시험이 수행되며, 상세설계 단계에서 목표치/기준치를 만족시키고자 다수의 프로펠러 설계가 수행된다. 그러나, 대형 캐비테이션터널에서 캐비테이션 성능 시험이 수행되지 못한 예전의 함정 프로펠러의 경우에는 CIS 성능을 고려하지 않고 설계됨에 따라 개선이 요구될 수 있다. 일반적으로 CIS는 함정 프로펠러 흡입면 또는 압력면의 날개끝 보오텍스 캐비테이션(Tip Vortex Cavitation, TVC)이 처음 발생하는 선속으로 결정된다. 날개끝 보오텍스 캐비테이션(TVC)의 CIS 성능을 개선하려면 프로펠러 날개끝을 중심으로 전반적인 형상을 변경하는 설계가 수행되어야 한다. 날개끝 보오텍스 캐비테이션은 CFD(Computational Fluid Dynamics) 등과 같은 수치해석 방법으로 예측하는데 한계가 있기 때문에 대형캐비테이션터널에서 모형선 및 부가물이 모두 설치된 상태로 캐비테이션 초기발생 성능 시험을 수행하고 이

를 기반으로 개선 설계가 수행되는 것이 가장 좋은 방법이다. 최근 TVC 수치적 연구는 프로펠러보다는 3차원 고정 날개를 대상으로 연구가 수행되고 있다 (Park et al., 2021).

최근 함정 프로펠러 설계는 함정 요구 성능에 맞추어 초기설계를 수행한 후 모형을 제작하여 성능을 검증하고 개선을 수행하는 방식으로 수행된다. 성능 검증 시험은 예인수조 및 대형캐비테이션 터널에서 수행되는데, 우선 예인수조에서 저항 및 저항능시험을 수행한 후 선속별 운항조건을 도출한다. 대형캐비테이션 터널에 예인수조 성능시험을 수행한 모형을 설치한 후 선속별 운항 조건을 중심으로 프로펠러에서 발생할 수 있는 모든 종류의 캐비테이션 초기발생 성능시험을 수행한다. TVC에 대해서는 McCormick이 제시한 방식에 따라 실선에서의 초기발생 캐비테이션 수를 추정하고 (McCormick, 1962), 선속별 운항 조건을 함께 도시하여 캐비테이션 종류별 CIS를 얻을 수 있다. TVC 외에 다른 캐비테이션은 모형과 실선의 초기발생 선속이 동일하다고 가정함에 따라 TVC가 가장 낮은 선속에서 초기발생하게 된다. 일반적으로 초기 설계 프로펠러의 경우 흡입면과 압력면의 TVC 초기발생이 각각 다른 선속에서 발생함에 따라 이들이 거의 유사한 선속에서 발생하도록 날개끝 하중을 조절하여 CIS를 높일 수 있는 균형 설계가 요구된다. 균형 설계는 캐비테이션 초기발생 성능시험 결과를 기반으로 수행하는 것이 효과적이다. CIS 성능을 고려하지 않고 설계된 기존 함정 프로펠러도 상기 언급된 방법으로 성능 개선이 가능하다.

프로펠러 CIS 및 캐비테이션 성능을 개선하는 또 다른 방법은 프로펠러로 유입되는 반류를 개선하는 것이다. 함정 프로펠러는 선저에 위치하므로 선체, 경사축 및 각종 부가물(strut, sleeve, barrel 등) 등의 상호작용으로 인하여 복잡한 불균일 유동장에서 작동하게 된다. 복잡한 유동장에서 발생한 반류가 프로펠러로 유입되면서 불균일 캐비테이션이 발생하게 된다. 기존 연구에서 프로펠러에 유입되는 반류를 개선하고자 선미 부가물 수정은 상하류 V-strut 날개들의 비틀림각 수정으로 한정된 바 있으며, 수정 후 프로펠러 캐비테이션 발생량, 변동압력 및 CIS 성능 모두를 개선하는 결과를 도출한 바 있다 (Ahn et al., 2023). 이때 대상 선 축계는 2종의 상·하류 V-strut으로 지지되는 바, CFD 기법을 활용하여 각각의 스트럿 날개들에 유입되는 유동 각도를 고려하여 받음각을 도출하였다. V-strut들의 날개별 기하학적 비틀림각은 고정 각도인데, 유동의 유입각도와 유사하게 정렬하기 위하여 수정된다. 수정된 비틀림각으로 설계된 V-strut들을 장착한 유동장을 수치해석하고 날개면에 입력분포 등의 개선 사항을 검토하여 최적의 V-strut 날개들의 비틀림각을 결정하는 바 있다 (Ahn et al., 2023).

본 연구에서는 기존(old) 스트럿과 수정(new) 스트럿을 모형선에 설치한 후, 각각의 설치 상태에서 프로펠러 CIS 성능을 최대로 개선하기 위하여 프로펠러 형상 수정을 통한 균형 설계를 수행해 보고자 한다. 우선 기존(old) 스트럿 장착 상태에서 모형시험 결과를 기반으로 프로펠러 CIS 개선을 위한 균형설계를 수행하였으며, 대형캐비테이션터널에서 성능을 검증하였다. 수정 스트럿 장착 상태에서 기존 2종의 프로펠러 CIS 성능을 검증하고 2

종의 프로펠러를 추가로 설계하여 CIS 성능을 검증하였다. 수정 스트럿 장착 반류 상태를 고려하여 설계된 2종의 설계 프로펠러 CIS 특성을 분석한 후 최종 프로펠러 1종을 추가로 설계하여 기존 프로펠러 및 V-strut 상태보다 CIS 성능이 매우 향상된 프로펠러를 개발하였다.

대형캐비테이션터널에서 CIS 성능 시험을 수행하기 전에 선속별 운항점 도출을 위하여 예인수조에서 기존(old) 및 수정(new) V-strut들을 설치하고 기존 및 설계 프로펠러 장착 후 저항추진 시험을 수행하였다. 도출된 운항조건은 캐비테이션 초기발생 결과와 함께 도시하여 CIS를 판단하는데 활용된다.

2. 기존 부가물 장착 CIS 성능 향상

기존 부가물이 장착되어 대형캐비테이션 터널에 설치된 함정 모형선은 Fig. 1에 나타나 있다. 함정의 선미판(Transom)은 수직에 가까운 경사면을 유지한다. 선미판은 선저와 바로 연결되면서 자유수면을 갖는 실해역 및 예인수조에서 운항 및 예인시 선저 형상을 따라서 하류로 유동이 빠져나기면서 선미판에 물이 거의 올라오지 않는 Dry transom 상태가 된다. 그러나, 자유 수면이 존재하지 않는 대형캐비테이션터널에서는 물이 가득 채워짐으로서 Dry transom 상태가 아닌 계단 유동(step flow) 현상이 나타나 유동 박리(separation) 및 회전 유동(circulation)으로 인한 함정 소음 및 진동 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하고자 선미판 후류에 dry transom과 같은 유동을 재현하기 위하여 Fig. 1과 같이 Dummy body를 설치하게 된다 (Ahn et al., 2022).

프로펠러 CIS 시험은 대형캐비테이션터널 시험부 유속을 고정시킨 후, 시험부 압력을 변경시키면서 (Ahn et al., 2015). 즉 캐비테이션 수를 변경시키면서 프로펠러의 각 부위에 발생하는 캐비테이션의 초기발생 조건을 결정한다. 상기의 과정은 다수의 전진계수(advance coefficient)에 대하여 반복 수행하게 되며, 모든 캐비테이션의 초기발생 조건은 육안 관측으로 결정된다. 모형시험에서 모든 종류의 캐비테이션 초기발생 조건은 예인수조에서 수행된 저항시험 결과로부터 도출된 선속별 운항조건(operation

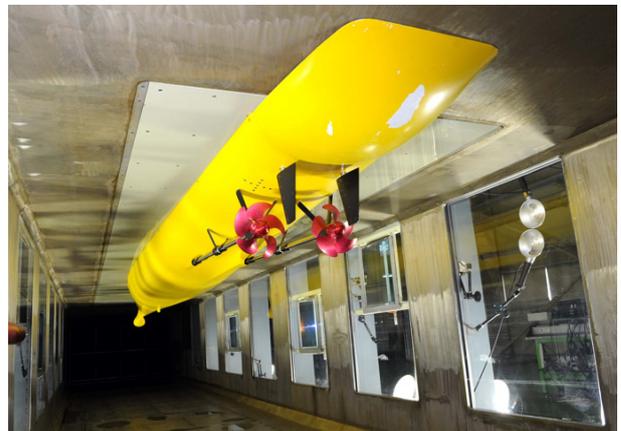


Fig. 1 The model ship installed in LCT

profile)을 함께 도시함으로써 캐비테이션 종류에 따른 초기발생 속도를 예측할 수 있다. 본 연구에서 적용된 프로펠러 전진계수 (J_A)와 캐비테이션 수(σ_A)는 다음과 같다.

$$J_A = \frac{V_A}{nD} \quad (1)$$

$$\sigma_A = \frac{P_s - P_v}{0.5\rho V_A^2} \quad (2)$$

여기서 n 은 프로펠러 회전수, D 는 프로펠러 직경, P_s 는 프로펠러 위치에서의 기준 압력, P_v 는 증기압, ρ 는 유체 밀도, V_A 는 전진속도이다.

모형에서 예측된 캐비테이션 초기발생 속도를 실선 환경으로 환산하여 예측하는 경우 통상적으로 날개끝 보오텍스 캐비테이션(TVC)에 대해서만 레이놀즈수 차이에 따른 점성효과가 적용된다고 알려져 있다 (McCormick, 1962). 따라서 TVC를 제외한 다른 형태의 캐비테이션(sheet cavitation, root cavitation 등)에 대하여는 모형과 실선에서의 초기발생 속도가 동일하다고 가정하였으며, TVC에 대해서는 McCormick이 제시한 식에 의하여 실선에서의 초기발생 속도를 예측하게 되는데, 실선에측 방법은 기존 논문에서 정리되어 있다 (Ahn et al., 2023).

Fig. 2는 기존 부가물(old strut) 설치 상태에서 기존 프로펠러(DP0)의 TVC의 초기발생 특성을 보여준다. 프로펠러 캐비테이션 초기발생 시험은 흡입면과 압력면에서 발생하는 모든 종류의 캐비테이션(tip vortex, L.E., root, hub, etc.)을 관찰하지만 실선 스케일링이 되는 흡입면 날개끝 보오텍스(Suction Side Tip Vortex: SSTV)와 압력면 날개끝 보오텍스(Pressure Side Tip Vortex: PSTV) 캐비테이션이 거의 모든 경우에 캐비테이션 초기발생 선속을 결정하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 모형 및 실선의 날개끝 보오텍스 캐비테이션(TVC) 초기발생 특성만을 언급한다. Fig. 2에서 예측된 실선 SSTV(SSTV scaled)와 실선 PSTV

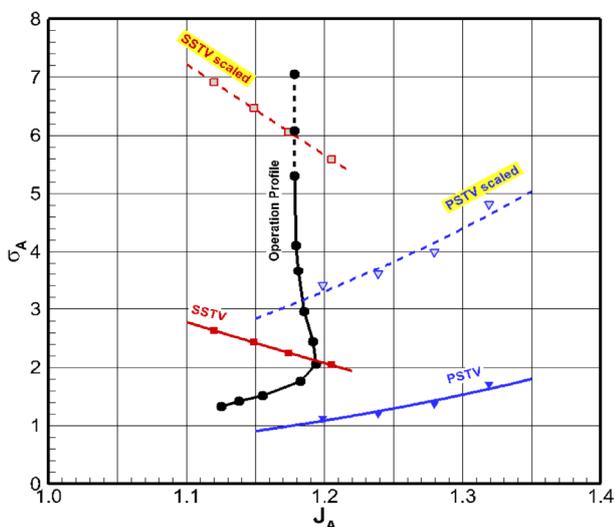


Fig. 2 CIS results for DP0 propeller at behind old strut

(PSTV scaled) 캐비테이션 초기발생 선속은 약 5.3 knots 차이가 발생하며, PSTV 대비 SSTV 캐비테이션이 낮은 선속에서 먼저 발생함에 따라 설계 수정을 통하여 프로펠러 CIS를 높일 가능성이 있음을 확인하였다.

기존 프로펠러(DP0)의 설계 개선을 통하여 최적의 CIS 성능을 도출하려면 SSTV와 PSTV 캐비테이션 초기발생 선속이 운항 곡선(operating profiles)에서 거의 일치하여야 한다. Fig. 2에서 살펴보면 SSTV가 PSTV 대비 낮은 초기발생 선속이 나타났으며, 운항곡선에서 SSTV와 PSTV의 초기발생 선속이 거의 일치하는 균형설계(balance design)가 필요함을 알 수 있다. 설계 변경은 함 운항곡선(선속에 따른 자항점)을 되도록 유지하면서 CIS가 최대화 되어야 하므로 반경별 피치, 캠버 하중 및 코오드 분포를 조절하면서 수행되었다. 이런 방식으로 설계된 1차 설계 프로펠러(DP1)의 주요 제원을 Table 1에 기존 프로펠러(DP0)와 함께 정리하였다. 설계 변경 프로펠러는 기존에 비해 전체적으로 피치가 감소하였으며, 특히 날개끝에서의 하중 감소를 위하여 약 26%의 피치 감소가 있었다. 또한 전체적인 캐비테이션 발생량을 감소하기 위하여 확장면적비는 증가하였고, 기존 프로펠러 대비 0.9R부터 날개끝 부분을 제외한 영역에서 캠버는 증가하였다.

CIS를 높이기 위한 프로펠러가 설계됨으로서 기존 프로펠러와 운항조건의 차이가 발생할 수 있다. 모든 부가물이 부착된 모형선을 대형캐비테이션터널에 Fig. 1과 같이 설치한 후 PBW (Propeller Behind Wake) 시험을 우선 수행하였다. PBW는 POW와 유사한 방법으로 수행되는데, POW가 균일류 하에서 수행되는 것과 달리 PBW는 모형선 반류 하에서 수행된다. 운항

Table 1 Principal particulars of DP0 and DP1 propellers

Item	DP0	DP1
Mean pitch ratio, (P/D)mean	1.3646	1.3043
Expanded area ratio, AE/AO	0.7649	0.7898
Pitch ratio at 0.7R, (P/D)0.7R	1.5506	1.5085
Chord ratio at 0.7R, (C/D)0.7R	0.4250	0.4378
Chamber ratio at 0.7R, (fo/D)0.7R	0.0187	0.0246

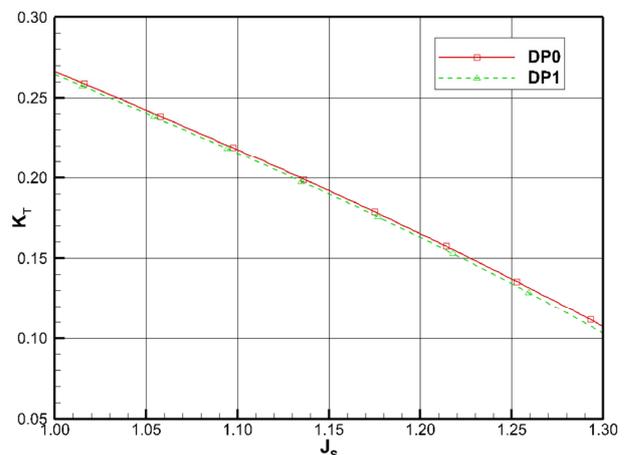


Fig. 3 PBW test results at behind old strut

점 근처에 시험부 유속 기반 전진계수(J_s)를 중심으로 일정 범위의 전진 계수에서 프로펠러의 추력 및 토오크 계수 분포를 얻게 되는데, 운항점 등의 변경여부를 판정할 수 있다. Fig. 3은 기존 프로펠러(DP0)와 1차 설계 프로펠러(DP1)의 PBW 시험 결과를 보여준다. 추력계수 차이가 크지 않아 운항곡선이 유사할 것으로 판단된다.

에인수조에서 저항 및 자항시험 후 실선성능 해석을 거쳐 도출된 선속별 운항 조건은 Fig. 4에 나타난다. DP0는 자항시험이 수행되었으며, DP1은 DP0 자항시험 결과에 단독시험(POW) 결과를 대체하는 방식으로 운항조건을 도출하였다. 운항조건이 유사하게 도출될 수 있도록 설계가 수행됨으로서 거의 유사한 운항 조건을 보여주고 있다.

DP1의 캐비테이션 초기발생 선속시험은 대형캐비테이션터널에서 수행되었으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. SSTV

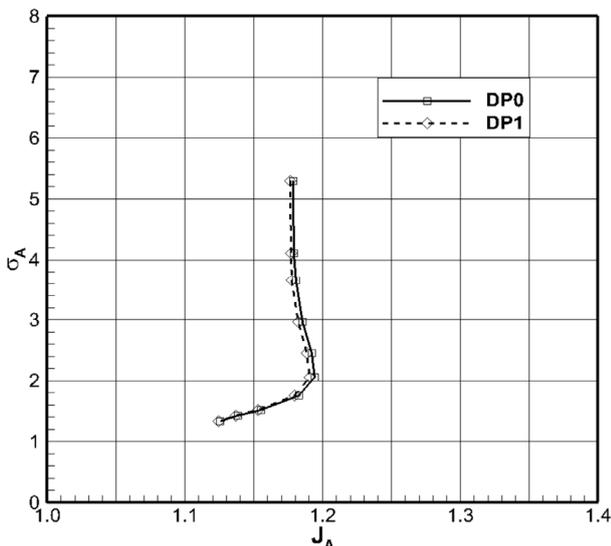


Fig. 4 Operating profiles at behind old strut

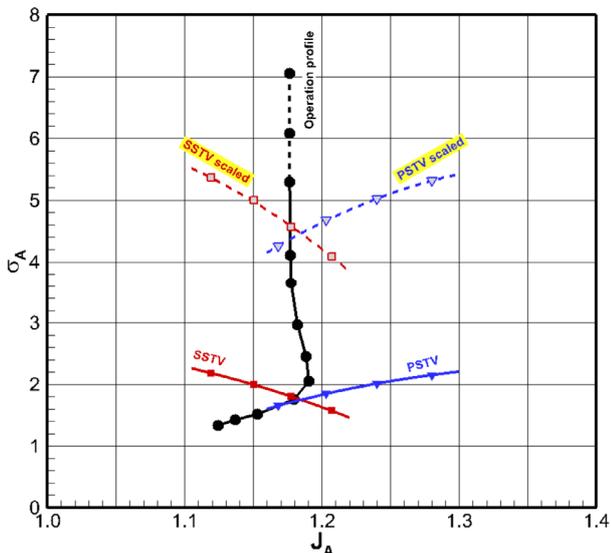


Fig. 5 CIS results for DP1 propeller located behind old strut

CIS는 약 2.0 knots 높아졌으며, PSTV CIS는 약 3.0 knots 감소하면서 거의 유사한 초기발생 선속을 보여준다. 날개끝에서 피치 등이 감소하면서 하중이 감소하였고 캐비테이션이 가장 먼저 발생한 SSTV의 초기발생 선속이 약 2.0 knots 증가하였으므로 프로펠러 CIS는 약 2.0 knots 증가하였다. 기존 부가물이 설치된 상태에서 캐비테이션 초기발생선속 시험이 수행된 DP0의 SSTV CIS를 SCIS0, PSTV CIS를 PCIS0로 정의하여 설계 프로펠러들의 초기발생 선속 비교를 위한 기준으로 사용하고자 한다. 또한 DP0의 CIS 값은 CIS0로 정의한다. 기존 프로펠러의 SSTV가 가장 낮은 선속에서 발생함에 따라 CIS0는 SCIS0와 동일하다.

3. 선미 부가물 수정

함정 축계는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 선저에 돌출된 상태로 설치된다. 선미 부가물은 돌출된 축계를 지지하기 위하여 설치된다. I-strut 및 V-strut 등이 선체에 부착되며 회전축을 지지하게 된다. 회전축 연결부에는 sleeve가 설치된다. 프로펠러로 유입되는 반류는 이와 같은 부가물에 의하여 형성된다. 반류 형성에 주로 기여하는 부가물은 V-strut인데, 특히 2개의 날개와 유동장이 형성하는 받음각(angle of attack)이 문제가 될 수 있다. 스트럿 날개의 기하학적 비틀림 각(twisted angle)은 기본설계 단계에서 선체 저항 및 추진성능 관점에서 최적 설계를 수행하는데, 프로펠러 캐비테이션 관점에서는 최적이지 아닐 수 있다. 본 연구의 대상 선에는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 축계 지지를 위하여 2개의 V-strut이 설치되며, 수정 대상은 상하류 V-strut이다. 프로펠러에 유입되는 반류를 개선하여 캐비테이션 성능을 향상시키기 위하여 스트럿 날개 비틀림 각을 조절하여 유동장과의 받음각을 최소화 하였다. 선미 부가물의 수정 과정은 기존 논문에서 자세히 언급했으므로 (Ahn et al., 2023) 본 논문에서는 간략히 언급한다.

캐비테이션 성능 관점에서 V-strut 날개들의 받음각 최적화를 위하여 스트럿 주위 유동장은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 대형캐비테이션터널 시험부에 모형선이 설치된 상태로 CFD로 수치해



Fig. 6 The stern appendages installed on the model ship

석을 수행한다 (Park et al., 2016). 시험부 유속은 약 9.0 m/s이며, 모형선 수선간장(Lpp) 기준 레이놀즈수(Rn)는 6.2×10^7 이다. 수치해석을 위한 범용 소프트웨어는 STAR-CCM+ 이다 (Simense, 2018). 함정 및 프로펠러 주위 유동은 비압축성 난류유동으로 가정하고 유동의 지배방정식은 연속방정식과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다. 지배방정식의 해는 비정렬격자계를 기반으로 2차 정확도의 이산화기법인 유한체적법으로 구하며, 비압축성 유동해석시 요구되는 속도-압력을 연성하는 방법으로 SIMPLE(Semi-implicit Method for Pressure-linked Equation) 방법을 이용하였다. 유동은 완전히 발달된 난류로 가정하고 해석을 위해 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 모델을 사용하였다. 수치해석 결과의 주요 관점은 V-strut 날개들의 표면압력 분포이므로 기존(old) V-strut 날개 표면 압력분포를 검토한 후 수정방안을 도출하였다. 비틀림각 수정은 유동장과 형성되는 받음각(angle of attack)이 증가되어 낮은 음압이 나타나는 부분을 개선하는 방법으로 수행된다. V-strut 날개들의 비틀림각을 몇 번 수정하여 CFD 수치해석을 수행한 바 최종적으로 얻은 수정 결과는 Table 2에 나타나 있다. 수정 스트럿 장착시 CFD 수치해석에서는 기존 스트럿에서 보였던 낮은 음압은 나타나지 않아 프로펠러로 유입되는 반류가 개선되었다.

수정된(new) 부가물인 상·하류 V-strut들을 제작하여 Fig. 6과 같이 설치한 후 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 우현 프로펠러 면에서 반류분포를 계측하였다 (Paik et al., 2017). 계측된 결과는 Fig. 7에서 기존(old) V-strut 장착 반류 결과와 비교된다. 수정 V-strut 장착시 기존보다 350° 부근을 중심으로 반류가 감소된다. 반면 하부 영역에서는 반류가 증가되어 공칭반류계수(Wn)는 기존 및 수정 모두 0.036으로 일치하였

Table 2 Twisted angles before & after V-strut modification

Strut		Twist angle (°)	
		Inboard	Outboard
Upstream	Old	2.0	-1.5
	New	0.0	2.5
Downstream	Old	0.0	3.0
	New	-2.0	0.0

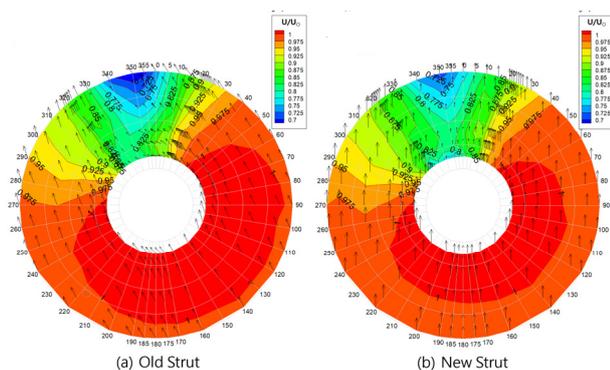


Fig. 7 Wake distributions before & after V-strut modification

다. 350° 부근에서의 반류는 캐비테이션 초기발생선속(Cavitation Inception Speed, CIS) 성능에 큰 영향을 미치는 흡입면 날개 끝 보텍스 캐비테이션과 흡입면 앞날 부근에 캐비테이션 생성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 수정 스트럿 장착시 흡입면에서의 캐비테이션 성능 개선을 기대할 수 있다.

4. 수정 부가물 장착 CIS 성능 향상

부가물 변경으로 프로펠러로 유입되는 반류가 변경됨으로서 DP0 및 DP1의 운항조건이 Fig. 8과 같이 변경되었다. Fig. 8은 예인수조에서 부가물 변경 전·후 기존 프로펠러(DP0)를 대상으로 저항 및 자항 시험을 수행한 후 도출한 운항 조건이다. 수정된 V-strut들을 장착한 모형선(new strut)에서는 2종의 프로펠러 모두 전진계수(J_A)가 기존(old strut)보다 증가하고 캐비테이션 수는 감소하는 경향을 보여준다. DP1의 운항 조건 도출은 기존 부가물 장착시 수행한 방법과 같이 DP0 자항시험 결과를 이용하여 수행되었다. 전반적으로 수정된 V-strut 장착시 프로펠러 반류면에서의 평균유속 증가로 동일 선속에서 동일 추력을 발생시키기 위하여 프로펠러 회전수가 증가되어야 한다. 수정된 V-strut 장착시 전진계수는 회전수 증가가 있지만 반류비가 더 크게 감소하면서 기존보다 증가하게 된다. 프로펠러 회전수와 전진속도(V_A)가 증가됨에 따라 캐비테이션 수는 낮아지게 된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 수정된 스트럿 상태에서 수행된 DP0와 DP1의 캐비테이션 초기발생선속 시험 결과를 보여준다. DP0는 수정된 스트럿 장착 상태에서 기존 스트럿 장착시보다 SSTV 및 PSTV 모두 증가된 캐비테이션 초기발생 선속을 보여준다. DP1은 SSTV 캐비테이션 초기발생 선속이 매우 증가하여 오히려 PSTV 캐비테이션이 가장 낮은 선속에서 발생하는 현상이 나타난다. 수정된 스트럿 반류 하에서 캐비테이션 초기발생 성능시

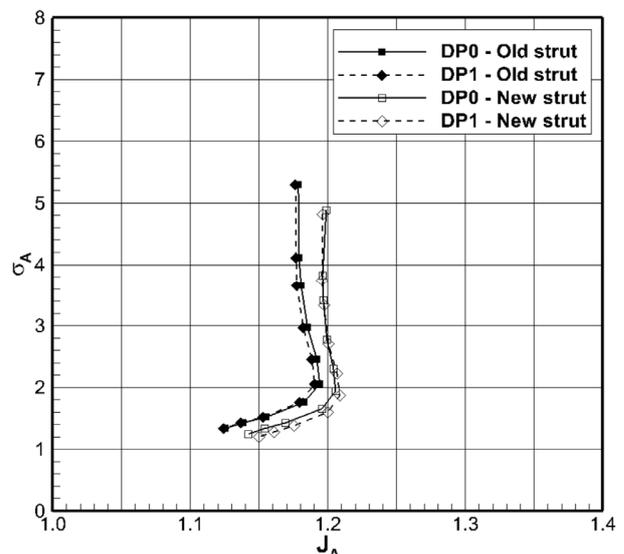


Fig. 8 Operating profiles at old and new strut

험이 수행되는 프로펠러들의 초기발생 선속 증감의 비교는 기존 스트럿 장착상태(old strut)에서 DP0에서 도출된 초기발생 선속 기준으로 수행된다. 앞서 언급했듯이 SSTV 초기발생 선속 기준값은 SCIS0, PSTV는 PCIS0, CIS는 CIS0로 정의한 바 있다. DP0와 DP1의 SSTV 및 PSTV 캐비테이션 초기발생선속 증감은 Table 3에 나타나 있다. DP0의 경우 SSTV의 캐비테이션 초기발생 선속은 2.6 knots, PSTV는 약 0.5 knots 증가했는데, SSTV가 제일 작은 선속에서 캐비테이션이 발생됨으로서 프로펠러CIS는 약 2.6knots 증가하였다. 기존 스트럿 장착 상태에서 균형설계가 이루어진 DP1은 부가물 변경에 의한 캐비테이션 초기발생선속 증가가 더 크게 나타났다. DP1의 SSTV 초기발생선속은 약 6.0knots 증가했으며, PSTV는 약 1.8knots 감소하였다. 따라서 PSTV가 더 작은 선속에서 발생하며, 프로펠러 CIS는 약

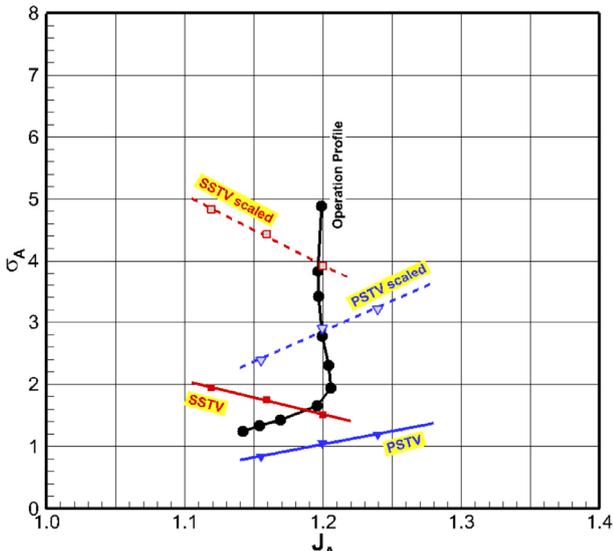


Fig. 9 CIS results for DP0 propeller located behind new strut

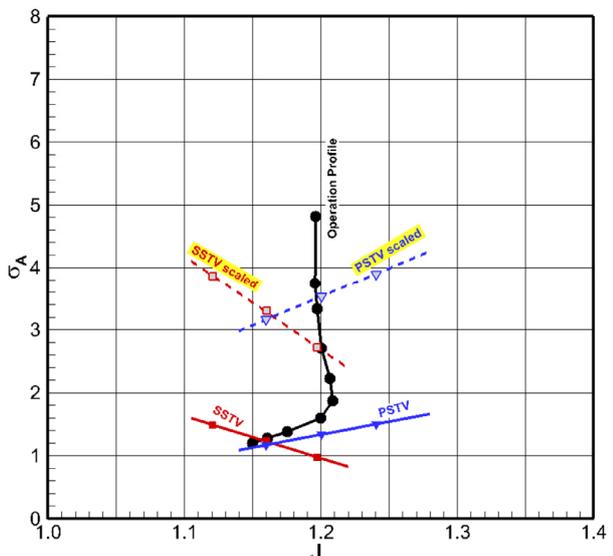


Fig. 10 CIS results for DP1 propeller located behind new strut

Table 3 CIS for DP0 & DP1 at behind new strut

Propeller	Cavitation inception speed (knots)		
	SSTV	PSTV	Propeller
DP0	SCIS0+2.6	PCIS0+0.5	CIS0+2.6
DP1	SCIS0+6.0	PCIS0-1.8	CIS0+3.5

3.5 knots 증가하였다. 그러나, 여전히 DP0와 DP1 모두 SSTV와 PSTV의 캐비테이션 초기발생 선속 차이가 크게 나타나서 균형 설계를 위한 형상 변경이 요구된다.

수정 부가물 장착 상태에서는 Fig. 7과 같이 반류가 변경됨에 따라 자항요소가 변경된다. 변경된 자항요소를 고려하면서 Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 SSTV와 PSTV 캐비테이션 초기발생 선속 차이를 최소화한 균형 설계가 요구된다. CIS의 최적화와 형상변수 변화별 CIS 특성 조사를 위하여 2종의 프로펠러(DP2, DP3)가 동시에 설계되었다. Table 4에 나타난 것과 같이 평균피치비는 DP0와 DP1 중간값 근방에서 설계 변경되며, 캠버는 날개끝 부분을 제외하고는 DP1과 유사하게 설계함으로서 전반적으로 하중이 증가된다. 캐비테이션 초기발생 선속의 균형 설계를 위하여 날개끝에서의 피치 및 캠버와 다른 형상변수에 미세한 변화를 주었다. 2차 설계 프로펠러(DP2)와 3차 설계 프로펠러(DP3) 모두 날개끝 부근에서의 피치는 DP1보다 증가되었다. 날개끝에서 캠버는 DP2의 경우 DP1과 유사하며, DP3의 경우 DP1과 차이가 있다.

DP2와 DP3 모형 제작 후 Fig. 11에서 보여지는 것과 같이 대형캐비테이션터널에서 PBW 시험을 수행하였다. 기존 스트럿

Table 4 Principal particulars of DP2, DP3 and DP4 propellers

Item	DP2	DP3	DP4
Mean pitch ratio, (P/D)mean	1.3409	1.3323	1.3368
Expanded area ratio, AE/AO	0.7898	0.7900	0.7904
Pitch ratio at 0.7R, (P/D)0.7R	1.5357	1.5361	1.5369
Chord ratio at 0.7R, (C/D)0.7R	0.4378	0.4378	0.4378
Chamber ratio at 0.7R, (fo/D)0.7R	0.0246	0.0251	0.0253

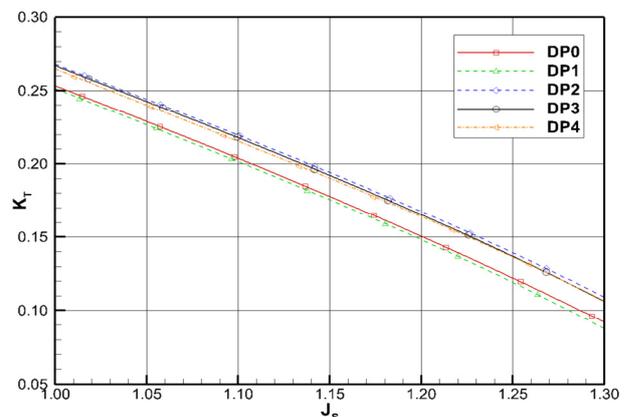


Fig. 11 PBW test results at behind new strut

(old strut) 반류하에서 설계된 DP0와 DP1 프로펠러는 동일 회전 수에서 추력이 감소하는 현상이 나타난다. DP2와 DP3의 경우 동일 회전수에서 DP0와 DP1보다 추력이 증가되며, 기존 스트럿 장착 상태에서의 DP0와 DP1과 유사한 추력을 보여준다. DP1보다 피치를 증가시킨 효과가 나타나고 있다.

예인수조에서 수정된 스트럿(new strut)으로 교체하고 수행된 저항 및 자항시험 후 실선성능 해석을 거쳐 도출된 선속별 운항 조건은 Fig. 12에 나타난다. DP0 및 DP2의 자항시험이 수행되었으며, DP1 및 DP3는 DP0 및 DP2 자항시험 결과에 단독시험(POW) 결과를 대체하는 방식으로 운항조건을 도출하였다. DP2 및 DP3는 거의 유사한 운항조건을 보여주고 있다.

Fig. 13와 Fig. 14는 수정된 스트럿 상태에서 수행된 DP2와 DP3의 캐비테이션 초기발생선속 시험 결과를 보여준다. DP2는

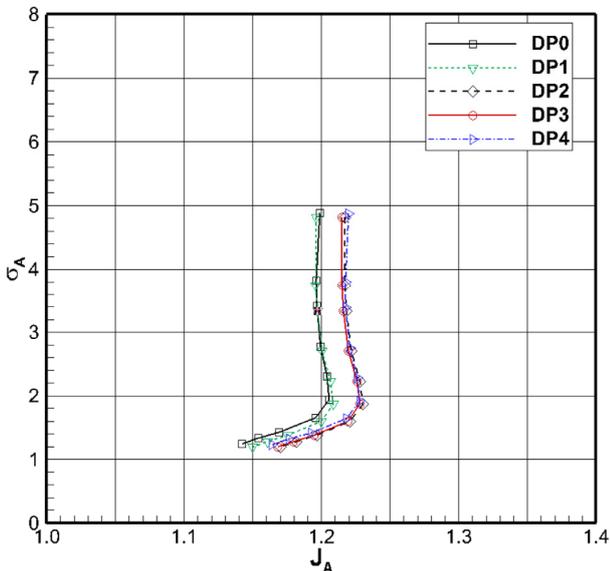


Fig. 12 Operating profiles at behind new strut

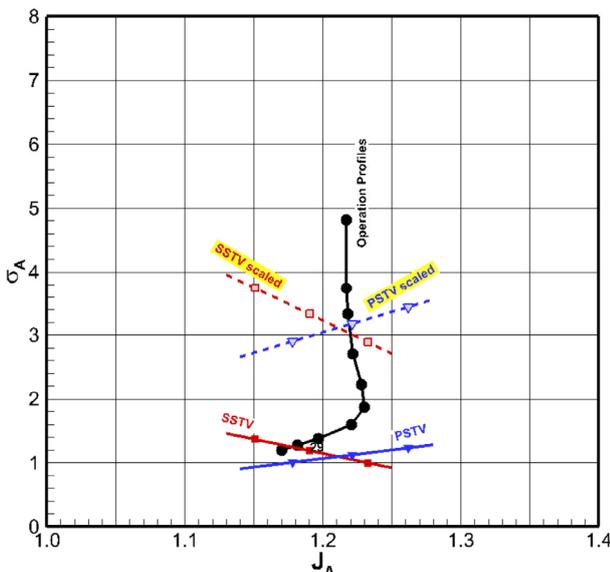


Fig. 13 CIS results for DP2 propeller located behind new strut

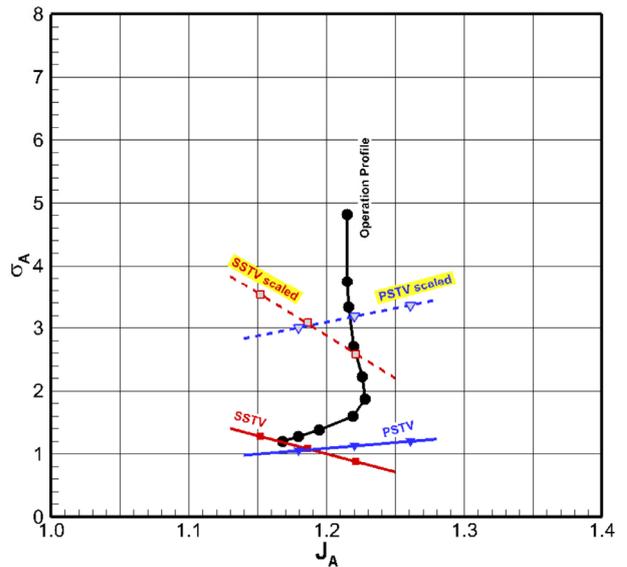


Fig. 14 CIS results for DP3 propeller located behind new strut

Table 5 CIS for DP2, DP3 & DP4 located behind new strut

Propeller	Cavitation Inception Speed (knots)		
	SSTV	PSTV	Propeller
DP2	SCIS0+4.8	PCIS0-0.9	CIS0+4.4
DP3	SCIS0+6.3	PCIS0-0.9	CIS0+4.4
DP4	SCIS0+5.7	PCIS0-0.0	CIS0+5.3

SSTV 및 PSTV의 초기발생 선속이 거의 유사한 균형 설계가 수행되었다. Table 5에 보여지는 것과 같이 SSTV는 캐비테이션 초기발생 선속 기준값(SCIS0)보다 약 4.8 knots 증가했으며, PSTV는 기준값(PCIS0)보다 약 0.9 knots 감소하면서 PSTV 캐비테이션이 제일 낮은 선속에서 발생한다. 따라서, DP2의 프로펠러 CIS는 기준값보다 약 4.4 knots 증가하였으며, 균형설계가 거의 수행됨으로서 개선의 여지는 없다. DP3는 날개끝 부분에서 피치 및 캠버가 DP2보다 감소함으로써 SSTV 초기발생 선속이 매우 증가된 결과를 보여준다. Table 5에 나타난 것과 같이 SSTV는 캐비테이션 초기발생 선속 기준값보다 약 6.3 knots 증가했으며, PSTV는 기준값보다 약 0.9 knots 감소하면서 PSTV 캐비테이션이 제일 낮은 선속에서 발생한다. 따라서, DP3의 CIS는 기준값보다 약 4.4 knots 증가하였는데, SSTV와 PSTV CIS 차이가 있어 균형설계를 위한 설계 개선이 요구된다.

DP2와 DP3의 설계 형상 및 CIS 실험 결과를 기반으로 CIS를 증가시키기 위한 설계 개선을 수행하였다. 날개끝 근처에서의 피치비는 DP2보다는 감소되고 DP3보다는 증가되도록 설계되었으며, 캠버는 DP3를 기반으로 미세 조정하였다. 이런 방식으로 SSTV와 PSTV 캐비테이션 초기발생 선속이 거의 일치할 수 있도록 4차 설계 프로펠러(DP4)가 설계되었다. DP4의 기본 제원은 Table 4에 나타나 있는데, 평균피치비는 DP2 및 DP3의 중간값 정도지만 날개끝 부분에서 캠버는 DP3보다 미세하게 감소방향으로 조절된다. 따라서, Fig. 11의 PBW 시험 결과에서

나타나는 추력 및 Fig. 12의 운항곡선 등이 DP2 및 DP3와 유사하다. DP4의 캐비테이션 초기발생 선속 시험 결과는 Fig. 15에 나타나 있다. SSTV와 PSTV의 캐비테이션 초기발생 선속이 거의 일치하는 균형 설계가 매우 잘 이루어져 있다. Table 5에 보여지는 것과 같이 DP4의 SSTV 캐비테이션 초기발생 선속은 기준값(SCIS0)보다 약 5.7 knots 증가되었으며, PSTV는 기준값(PCIS0)과 동일하였다. PSTV 캐비테이션이 제일 낮은 선속에서 발생하면서 CIS는 기준값보다 약 5.3 knots 증가하였다. 최종적으로 부가물 및 프로펠러 설계 변경으로 프로펠러 CIS는 5.3 knots 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

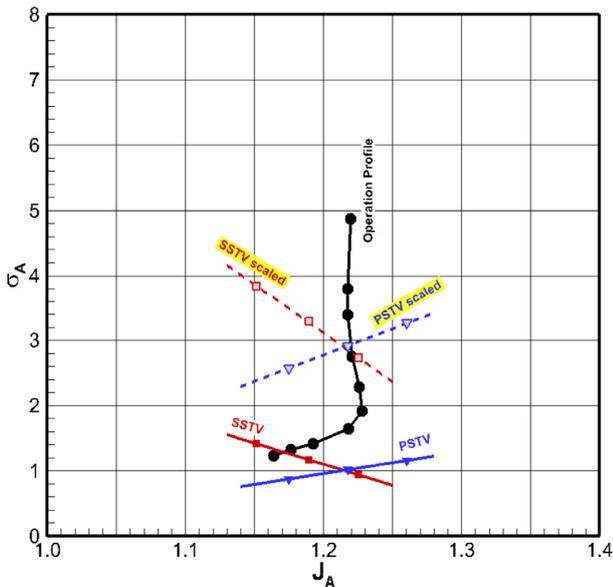


Fig. 15 CIS results for DP4 propeller located behind new strut

5. 결론

함정 프로펠러 캐비테이션 초기발생 선속(Propeller CIS) 성능을 향상시키기 위하여 SSTV CIS와 PSTV CIS 차이를 최소화하기 위한 프로펠러 균형 설계가 수행되고, 프로펠러 상류의 설치된 부가물을 수정하였다. 부가물 수정은 기존 연구에서 수행한 바 있어 본 연구에서는 기존 및 수정 스트럿 반류 하에서 프로펠러 CIS를 향상시키기 위한 SSTV 및 PSTV CIS 차이를 최소화한 균형 설계를 수행하였다. 기존 스트럿(old strut) 반류 상태에서는 1개의 프로펠러가 균형 설계되었으며, 수정 스트럿(new strut) 반류상태에서는 3개의 프로펠러가 균형 설계되었다. 기존 스트럿 반류 상태에서 균형 설계된 1차 프로펠러(DP1)는 기존 프로펠러(DP0)보다 약 2.0 knots의 프로펠러 CIS 증가가 있었다. DP1은 수정 스트럿 반류 상태에서 기존 스트럿 상태에서 시험된 기존 프로펠러보다 약 3.5 knots의 프로펠러 CIS 증가가 있었다. 그러나, 기존 스트럿 상태에서 균형 설계된 DP1은 수정 스트럿 상태에서는 SSTV 및 PSTV CIS 차이가 크게 나타났다. 따라서 수정 스트럿 상태에서 프로펠러 CIS를 증가시키기 위한 프로펠러 균

형 설계가 요구된다.

수정 스트럿 상태에서는 반류가 감소됨에 따라 DP0 및 DP1의 추력이 감소된 바 있다. 따라서 수정 스트럿 반류 상태에서의 프로펠러는 기존 스트럿 반류 상태의 추력을 유지하면서 프로펠러 CIS가 증가되도록 설계되었다. SSTV 및 PSTV CIS 차이를 최소화한 균형 설계가 요구됨에 따라 DP0 및 DP1의 형상을 분석한 후 2조의 프로펠러를 설계하였다. 2차 및 3차 프로펠러(DP2 & DP3) CIS는 기존 스트럿 상태에서 시험된 DP0보다 약 4.4 knots 증가되었다. 그러나, DP2는 균형설계가 이루어져 개선의 여지가 없지만 DP3는 SSTV 및 PSTV CIS 차이가 나타나 개선의 여지가 있었다. 따라서 DP2 및 DP3의 설계 형상 및 CIS 실험 결과를 기반으로 CIS를 증가시키기 위한 설계 개선을 수행하여 4차 프로펠러(DP4)를 설계하였다. DP4는 SSTV 및 PSTV CIS의 균형 설계가 이루어졌으며, 프로펠러 CIS는 약 5.3 knots 증가하였다. 즉 부가물 개선 및 균형 설계를 수행하여 기존 스트럿 상태에서 시험된 기존 프로펠러(DP0)보다 약 5.3 knots 증가된 프로펠러 CIS 결과를 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 산업통상자원부와 방위사업청이 지원하는 민군겸용 기술개발사업 19-CM-MU-10 (PNS4520, 3차원 곡면형 비틀림 방향타 기술)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.W. Kim G.D. Kim, K.S. and 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., Park, Y.H., Kim, G.D., Paik, B.G., Seol, H.S. and Park, I.R., 2023. Study of the propeller cavitation performance improvement through the stern appendage modification. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 60(1), pp.428-434.
- Ahn, J.W., Park, Y.H., Paik, B.G. and Seol, H.S., 2022. *Method for installing a dummy body that reproduces the stern flow of a model ship in a large cavitation tunnel*, Patent number 10-2393987.
- McCormick, B.W., 1962. On cavitation produced by a vortex trailing from a lifting surfaces. *Journal of Basic Engineering*, pp.369-379.
- Paik, B.G., Ahn, J.W., Seol, H.S., Park, Y.H., Kim, K.S. and Cheon, H.G., 2017. Development of LDV(Laser Doppler Velocimetry) for measuring three dimensional hull wake of ship model in large

cavitation tunnel, *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 54(6), pp.515–521.

Park, I.R., Kim, J.I., Kim, K.S., Ahn, J.W., Park, Y.H. and Kim, M.S., 2016, Numerical analysis of the wake of a surface ship model mounted in KRISO large cavitation tunnel, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(6), pp.494–502.

Park, I.R., Kim, J.I., Paik, B.G. and Seol, H.S., 2021. Numerical study on tip vortex cavitation inception on a foil, *Journal Applied Sciences*, 7332.

Siemens, 2018. *STAR-CCM+ 11.04 User Guide*, URL: <https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/general/documentation.shtml> [Accessed 1 January 2018].



안종우



김건도



백부근



박영하



설한신