



선미 부가물 수정에 따른 프로펠러 캐비테이션 성능 향상 연구

안중우^{1,†} · 박영하¹ · 김건도¹ · 백부근¹ · 설한신¹ · 박일룡²

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

²동의대학교 조선해양공학과

Study of the Propeller Cavitation Performance Improvement Through the Stern Appendage Modification

Jong-Woo Ahn^{1,†} · Young-Ha Park¹ · Gun-Do Kim¹ · Bu-Geun Paik¹ · Han-Shin Seol¹ · Il-Ryong Park²

¹Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

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 performance composed of Cavitation Inception Speed (CIS), cavitation extent and pressure fluctuation, it needs to improve the wake distribution that flows into the propeller. The warship propeller cavitation is strongly influenced by the wake created at the V-strut of various appendages. The inflow characteristics of the V-strut were investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD) and the twisted angles of the V-strut were aligned with upstream flow. The resistance and self-propulsion tests for the model ship with the existing and modified V-struts were conducted in Towing Tank (TT), and wake distribution, CIS, cavitation observation and pressure fluctuation tests were conducted in Large Cavitation Tunnel (LCT). The propeller behind the modified V-strut showed better cavitation characteristics than that behind the existing V-strut. Another model test was conducted to investigate rudder cavitation performance by the change of the V-strut. The rudder cavitation characteristics were not improved by the change of the operating conditions. On the basis of the present study, it is thought that the stern appendages for better propeller cavitation performance would be developed.

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

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. 선속이 증가함에 따라 프로펠러 캐비테이션 발생량이 증가하면서 캐비테이션에 의한 소음 수준은 다른 소음원보다 월등하게 증가하게 된다. 따라서 함의 캐비테이션이 처음 발생하는 선속인 CIS(Cavitation Inception Speed) 성능은 함정 설계에 매우 중요한 요소이다.

최근 함정 프로펠러 CIS 성능을 향상시키고자 기본 설계 단계부터 목표치/기준치 설정을 위한 설계 및 모형시험이 수행되며, 상세설계 단계에서 목표치/기준치를 만족시키고자 다수의 프로펠러 설계가 수행된다. 그러나 프로펠러 설계 개선을 통하여 CIS 성능을 향상시키는 데에는 한계가 있다. 함정 프로펠러는 선미에 위치함에 따라 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. 프로펠러 설계 개선을 통한 캐비테이션 성능 향상의 한계를 극복하기 위하여 프로펠러 유입되는 반류 특성의 개선이 요구된다.

함정 프로펠러로 유입되는 반류는 선체보다는 선체 외부로 노출된 경사축 및 경사축을 지지하는 I-strut과 V-strut 등에서 주로 영향을 받는다. Sleeve 등도 세심하게 설계되지 않는 경우 반류에 악영향을 끼쳐 캐비테이션 성능을 저감시킬 수 있다. Sleeve 형상 등에 문제가 없다고 하면, 반류에 가장 큰 영향을 미치는 부가물은 프로펠러에 근접한 V-strut이다. V-strut의 경우 기본설계 단계에서 선체 저항과 자항추진 관점에서 설계된다. 즉 예인수조 시험시 선체와 상호작용을 고려하여 V-strut 안쪽 및 바깥쪽 날개의 최적의 비틀림 각이 결정된다. 그러나 이러한 결정 방법이 캐비테이션 성능 관점에서는 최적일 수 없다. 따라서 캐비테이션 성능 향상을 위한 부가물 수정은 상하류에 설치된 V-strut 날개들의 기하학적 비틀림 각만 변경한다.

캐비테이션 성능 관점에서 최적의 비틀림 각을 갖는 V-strut을 설계하기 위하여 모든 부가물을 포함하는 모형선이 대형캐비테이션터널에 설치된 상태를 모사하여 유동장 계산을 수행하였다. 본 연구에서 채택한 대상선 축계는 2종의 상하류 V-strut으로 지지되는 바, 각각의 스트럿 날개들에 유입되는 유동 각도 및 날개들의 비틀림 각으로부터 받음각을 도출하였다. 반류 관점에서는 유동각도와 비틀림 각이 일치하여 받음각이 0°가 되는 것이 최적이지만 날개 스패น 위치별 받음각이 차이가 있어 모든 위치에서 만족할 수는 없다. 날개별 비틀림 각은 고정 각도인데, 유동에 최대한 정렬하기 위하여 수정된다. 수정된 비틀림 각으로 설계된 V-strut들로 유동장을 계산한 후 날개 면에 압력분포 등의 개선 사항을 검토하여 최적의 V-strut 날개들의 비틀림 각을 결정하였다.

기존(old) 스트럿과 수정(new) 스트럿을 장착한 모형선은 예인수조 및 대형캐비테이션터널에서 성능시험을 수행하였다. 우선 대형캐비테이션터널에서 부가물 수정 전·후에 프로펠러로 유입되는 반류분포를 조사하였으며, 또한 프로펠러를 장착하여 운항조건을 중심으로 추진 특성 변화를 조사하였다. 대형캐비테이션터널 예비시험 후 예인수조 자항시험을 수행하여 선미 부가물 수정 전·후 선속별 운항조건을 도출하였다. 도출된 운항조건에서 부가물 수정 전·후 캐비테이션 발생량, 변동압력 및 CIS 시험으로 구성되는 프로펠러 캐비테이션 성능시험이 수행되었다. 최종적으로 부가물 수정이 방향타 캐비테이션에 미치는 영향을 검토하고자 부가물 수정 전·후에 방향타 캐비테이션을 타각별로 조사하였다,

2. 선미 부가물 수정

함정 축계는 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 것과 같이 상당한 부분이 선저에 돌출된 상태로 설치된다. 선미 부가물은 이와 같이 돌출된 축계를 지지하거나 연결하기 위하여 설치된다. I-strut 및 V-strut 등이 선체에 부착되며 회전하는 축의 베어링 설치 등을 위하여 설치되는 barrel과 연결되어 회전축을 지지하게 된다. 회전축 연결부에는 sleeve가 설치된다. 프로펠러로 유입되는 반류는 프로펠러 상류에 설치된 이와 같은 부가물에 의하여 형성된다. Barrel 및 sleeve에서 프로펠러에 캐비테이션 생성에 영향을 주는 반류가 형성될 수도 있지만 유동장에 맞추어 전·후부 형상을 매끄럽게 설계하는 경우 큰 문제가 발생하지는 않는다. 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 결정되는데, 캐비테이션 성능 관점에서는 문제가 될 수 있다. 본 연구의 대상선에는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 축계 지지를 위하여 2개의 V-strut이 설치된다. 따라서 부가물 수정 대상은 상하류 V-strut이며, 프로펠러 캐비테이션 성능을 향상시키기 위하여 스트럿 날개들의 비틀림 각을 조절하여 유동장과의 받음각을 최적화하고자 한다.

대형캐비테이션터널(LCT)에서 프로펠러 캐비테이션 시험을 수행하기 위한 모형선 설치 상태는 Fig. 1에 나타나 있으며, 대상선의 선미 부가물 설치 상태는 Fig. 2에 나타나 있다. V-strut 2개의 날개들의 받음각 최적화를 위하여 스트럿 주위 유동장은 CFD (Computational Fluid Dynamics)로 수치해석을 수행한다. 수치해석은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 대형캐비테이션터널에 모형선이 설치된 상태로 수행된다. 여기서, 프로펠러의 영향은 고려하지 않고 선체-부가물 상호작용 유동 해석을 수행한다. 수치해석을 위한 범용 소프트웨어는 STAR-CCM+이다 (Siemens, 2018). 함정 및 프로펠러 주위 유동은 비압축성 난류유동으로 가정하고 유동의 지배방정식은 연속방정식과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다. 지배방정식의 해는 비정렬 격자계를 기반으로 2차 정확도의 이산화기법인 유한체적법으로 구하며, 비압축성 유동해석시 요구되는 속도-압력을 연성

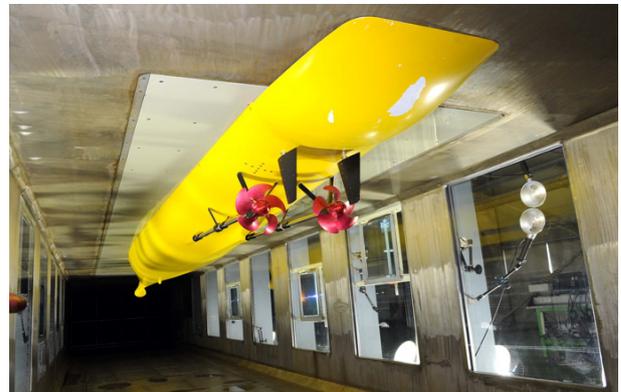


Fig. 1 The model ship installed in LCT



Fig. 2 The stern appendages installed on the model ship

하는 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. 함정의 선체-부가물 상호작용 유동의 수치 해석에 대한 보다 상세한 결과는 본 연구에 앞서 수행한 Park et al. (2016)의 논문을 참조할 수 있다.

기존(old) V-strut들이 설치된 상태에서 수치해석을 수행한 후 스트럿 날개 표면에 압력분포는 Fig. 3에 나타나 있다. 상류쪽 V-strut의 경우 안쪽(inboard) 및 바깥쪽(outboard) 날개 안쪽면(inner) 뿌리 쪽에 낮은 음압이 분포된다. 기하학적 비틀림 각과 받음각은 V-strut을 상부에서 바라봤을 때 시계방향으로 회전된 각도를 양(+)의 각도로, 시계 반대방향으로 회전한 각도를 음(-)의 각도로 정의한다. 상류쪽 V-strut의 표면압력 분포를 살펴보면 안쪽 날개는 양(+)의 받음각이 나타나고 있으며, 바깥쪽 날개는 음(-)의 받음각이 나타난다. 하류쪽 V-strut의 안쪽 날개는 안쪽면 뿌리 쪽에 낮은 음압이 나타나고 있으며, 바깥쪽 날개는 바깥쪽면의 뿌리 쪽에 낮은 음압이 나타나고 있다. 따라서 안쪽 및 바깥쪽 날개 모두 양(+)의 받음각이 나타나고 있다. 받음각을 최소화하여 낮은 음압을 개선하려면 상류쪽 V-strut의 안쪽 날개는 비틀림 각을 음의 방향으로, 바깥쪽 날개는 양의 방향으로 변경시켜야 한다. 하류쪽 V-strut의 안쪽 및 바깥쪽 날개는 비틀림 각을 음의 방향으로 변경시켜야 한다. 비틀림 각을 변경하여 몇 번의 수치계산을 수행하여 Table 1과 같은 변경된 비틀림 각을 얻을 수 있었다. 최종 수정된(new) V-strut을 적용하여 얻은 표면압력

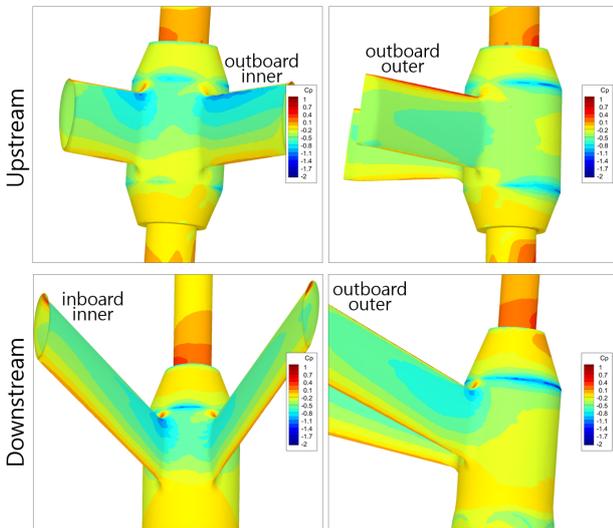


Fig. 3 Surface pressure distribution of the old V-struts

Table 1 Twist angles before & after V-strut modification

V-strut		Twisted 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

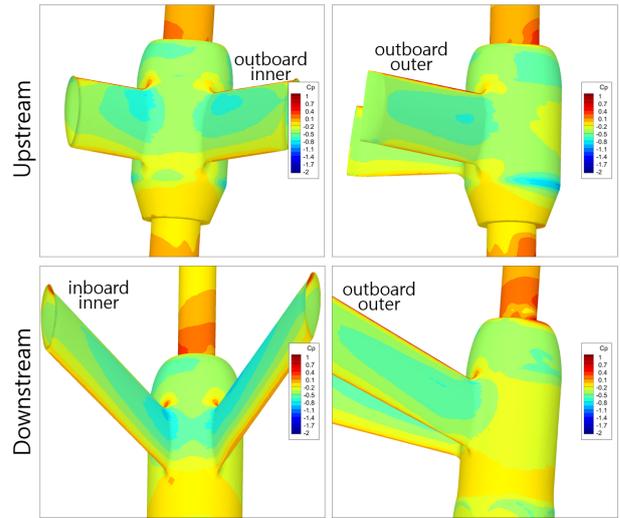


Fig. 4 Surface pressure distribution of the new V-struts

분포는 Fig. 4에 나타나 있다. 기존 스트럿에서 보였던 낮은 음압은 나타나지 않아 프로펠러로 유입되는 반류의 개선이 기대된다.

3. 부가물 수정 전·후 반류 및 운항조건

수정된(new) 부가물인 상·하류 V-strut들을 제작하여 Fig. 2와 같이 설치한 후 프로펠러를 제거한 상태에서 LDV를 이용하여 우현 프로펠러 면에서 반류분포를 계속하였다(Paik et al., 2017). 계속된 결과는 Fig. 5에서 기존(old) V-strut 장착 반류 결과와 비교된다. 수정 V-strut 장착 반류가 기존보다 350°를 중심으로 감소된다. 350° 부근에서의 반류는 캐비테이션 초기 발생선속(Cavitation Inception Speed, CIS) 성능에 큰 영향을 미치는 흡입면 날개끝 보조텍스(Suction Side Tip Vortex, SSTV) 캐비테이션과 흡입면 앞날 부근에 캐비테이션 생성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 수정 스트럿 장착시 흡입면에서의 캐비테이션 성능 개선을 기대할 수 있다.

부가물 수정으로 반류가 변경됨으로서 운항조건이 변경될 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. 운항점 근처에 전진계수(J_0)를 중심으로 몇가지 전진 계수에서 프로펠러의 추력 및 토크 계수 분포를 얻게 되는데, 운항점 등의 변경여부를 판정할 수 있다. Fig. 6은 V-strut의 수정 전·후에 PBW 시험 결과를 보여준다. 추력계수 차이만을 표시하였는데, 토크도 같은 경향을 보여준다. 수정된 V-strut들을 장착한 모형선(new strut)의 추력계수가 기존 V-strut 장착 모형선(old strut)보다 모든 전진계수에서 감소했음을 볼 수 있다. 반류의 차이로 나타난 경향인데, 프로펠러 피치가 감소한 것과 같은 경향을 보여준다. 운항조건이 변경되었을 것으로 판단되어 예인수조에서 부가물 수정 전·후의 저항 및 자항 시험이 수행되었다.

예인 수조 시험 후 실선성능 해석을 거쳐 도출된 선속별 운항 조건은 Fig. 7에 나타난다. 수정된 V-strut(New strut)들을 장착한 모형선의 전진계수(J_A)가 기존(old strut)보다 증가하고 캐비테이션 수는 감소하는 경향을 보여준다. PBW 시험에서도 유사한 경향을 볼 수 있다. 전반적으로 수정된 V-strut 장착 시 추력

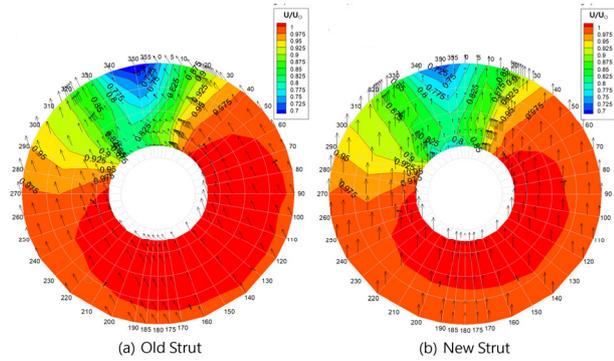


Fig. 5 Wake distributions before & after V-strut modification

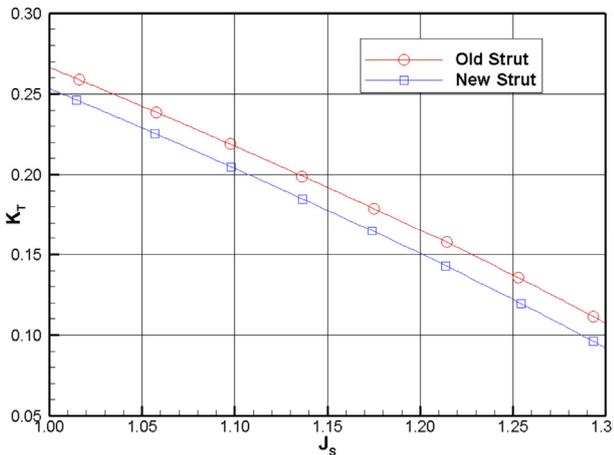


Fig. 6 PBW test results before & after V-strut modification

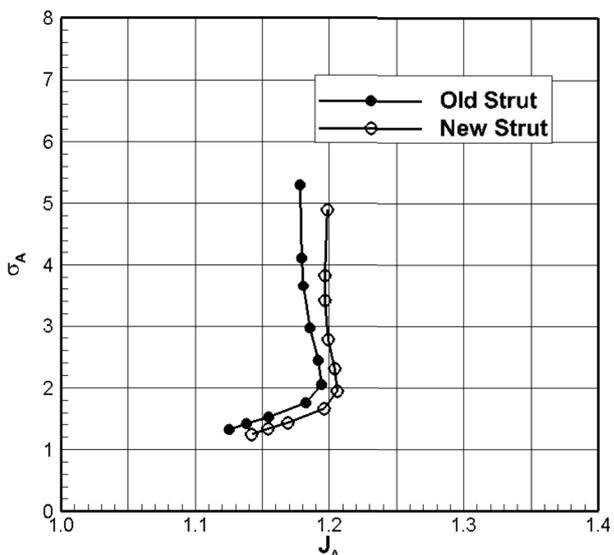


Fig. 7 Operating profiles before & after V-strut modification

계수가 감소되므로 동일 선속에서 동일 추력을 발생시키기 위하여 프로펠러 회전수가 증가되어야 한다. 프로펠러 회전수가 증가됨에 따라 캐비테이션 수는 낮아지게 된다. 수정된 V-strut 장착 시 회전수 증가가 있지만 반류비가 더 크게 감소하면서 전진계수는 기존보다 증가하게 된다.

4. 프로펠러 캐비테이션

함정 프로펠러 캐비테이션 시험은 최고 선속 조건에서 수행된 캐비테이션 관찰, 변동압력 및 캐비테이션 초기발생선속 (Cavitation Inception Speed, CIS) 시험으로 구성된다. 대상선 최고 선속에서의 시험조건은 기존 스트럿(old strut) 및 수정 스트럿(New strut) 장착 각각에 대하여 Table 2에 나타나 있다. 수정 스트럿 장착시 추력계수(K_T) 및 프로펠러 중심 수심에서의 캐비테이션 수(σ_{A_center})가 기존보다 감소한 값으로 나타나며, 전진계수는 증가한 것으로 나타난다. 캐비테이션 관찰시험 시 각도 변화에 따른 캐비테이션 발생 거동은 CCD(Charged Coupled

Table 2 Test conditions at maximum ship speed

Item	Old strut	New strut
Thrust coefficient, K_T	0.2042	0.1962
Cavitation number, σ_{A_center}	1.4210	1.3326
Advanced coefficient, J_A	1.1384	1.1542
Model propeller RPS	29.61	29.67
Flow velocity, m/s	9.0	9.0

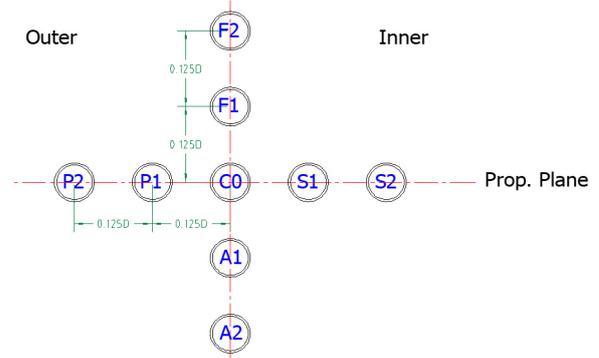


Fig. 8 Position of pressure sensors

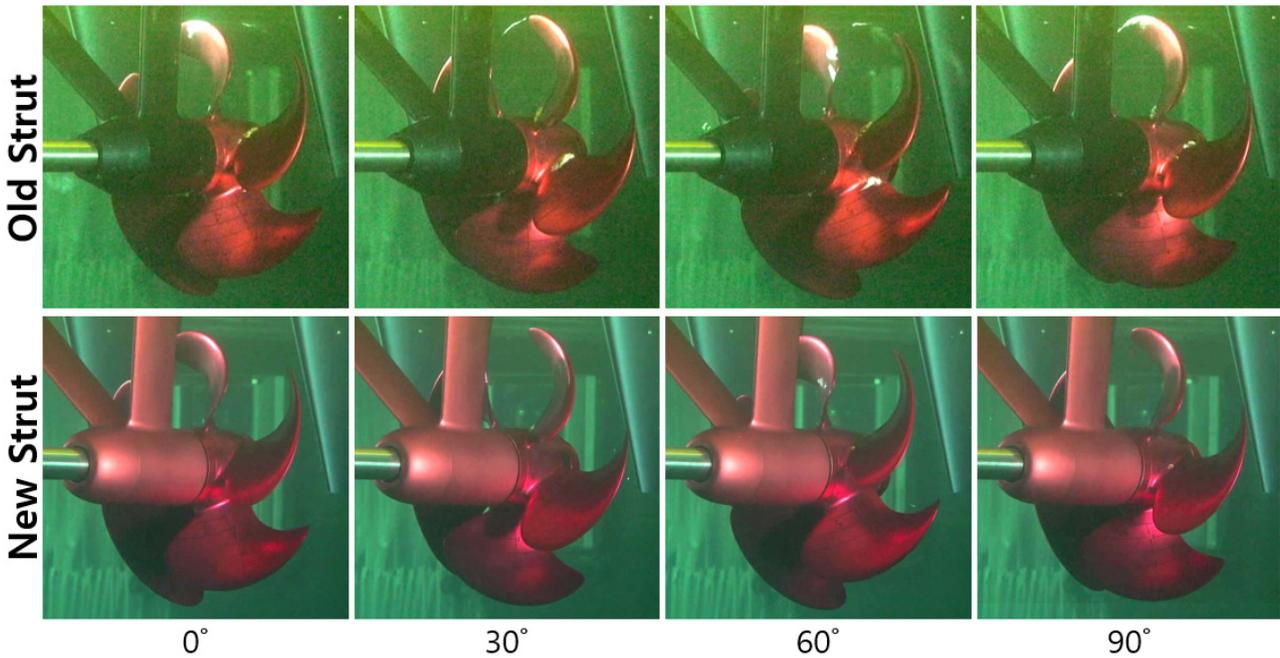


Fig. 9 Comparison of propeller cavitation extent at maximum ship speed condition

Device) 카메라와 스트로보스코프를 이용하여 촬영되었다. 프로펠러 캐비테이션에 의하여 유기된 선체 변동압력을 계측하기 위하여 프로펠러 직상방 주위 9개 지점에 Fig. 8과 같이 변동압력 센서를 설치하였다. 변동압력 센서는 Kulite사의 XTM-190 모델이며, 계측부의 직경은 3.7 mm이다.

Fig. 9는 최고 속도 조건에서 프로펠러 흡입면에 발생한 캐비테이션 관찰시험 결과를 보여준다. 기존 및 수정된 스트럿 설치 상태에서의 각도별 캐비테이션 발생 거동의 차이를 보여주고 있다. 각도는 프로펠러 기준선(generating line)이 연직 상방을 향할 때를 0°로 정의하며, 회전 방향으로 증가된다. 기존 스트럿들의 설치 상태(old strut)에서는 0° 위치에서 날개 앞날(L.E.)로부터 생성된 캐비테이션이 관찰되며, 30° 위치에서 강력한 흡입면 날개끝 보오텍스 캐비테이션(SSTV)이 발생한다. SSTV는 60° 위치에서 날개끝에서 떨어져 나간 형태로 관찰된다. 60°에서 -72° (348°) 이전 위치에 있는 날개를 보면 앞날 부근 전체로부터 발생하는 캐비테이션이 관찰되는데, Fig. 5에 반류분포와 연관된 결과를 보여준다. 흡입면 뿌리 캐비테이션(SSR)은 0°에서도 발생이 되는데, 90°에서도 계속 발생되고 있다. 다른 날개를 참고로 살펴보면 132°에서도 상당한 양이 나타나고 있다. 수정 스트럿들의 설치 상태(new strut)에서는 기존보다 모든 종류의 캐비테이션이 현저히 감소되었음을 볼 수 있다. 기준날개가 60° 위치 시 -72° (348°) 이전 위치에 있는 날개를 보면 앞날 부근 일부에서 발생한 약간의 캐비테이션이 관찰된다. 흡입면 날개끝 보오텍스 캐비테이션(SSTV)이 발생되었는데, 캐비테이션 초기발생 조건이 최고 선속 조건과 큰 차이가 없어 간헐적으로 나타났다. 흡입면 뿌리 캐비테이션(SSR)도 0°~90° 영역에서 발생한 하나 기존 스트럿보다는 현저히 감소하였다.

프로펠러 캐비테이션에 의해 유기된 변동압력 계측시험은 캐비테이션 관찰 시험과 동시에 수행되었다. Fig. 10과 Fig. 11은

기존 및 수정 스트럿들이 설치된 상태에서 Fig. 8에 나타난 9개 지 날개 통과 주파수(Blade Passage Frequency, BPF)에서 계측된 변동압력은 변동압력계수(K_p)로의 무차원화를 통하여 실선 값 센서 위치에서 계측된 변동압력 결과를 보여준다. 1차부터 6차까지로 환산하였다. Fig. 9에 관찰 결과에서 나타났듯이 캐비테이션이 감소한 수정 스트럿(new strut)에서 계측된 변동압력이 기존에 비해 전반적으로 감소하였으며, S1 위치 1차 BPF에서 기존보다 약 12% 정도 감소되었다. 캐비테이션 감소량에 비하여 변동압력 수준 차이는 크지 않는데, 이는 프로펠러 캐비테이션이 날개 끝부분에 발생됨으로서 발생 체적이 작아 나타난 현상이라 사료된다. 변동압력은 실선에서 100 Hz 미만의 저주파에서 발생하는 진동 수준을 표시하는데, 프로펠러 하중 및 캐비테이션에

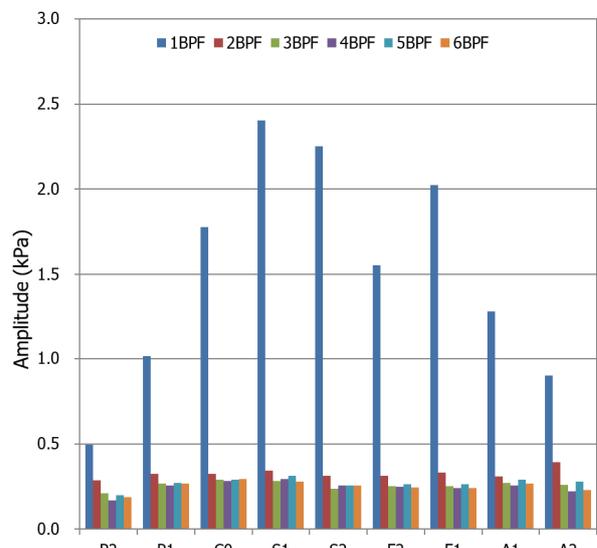


Fig. 10 Pressure fluctuation levels at behind old strut

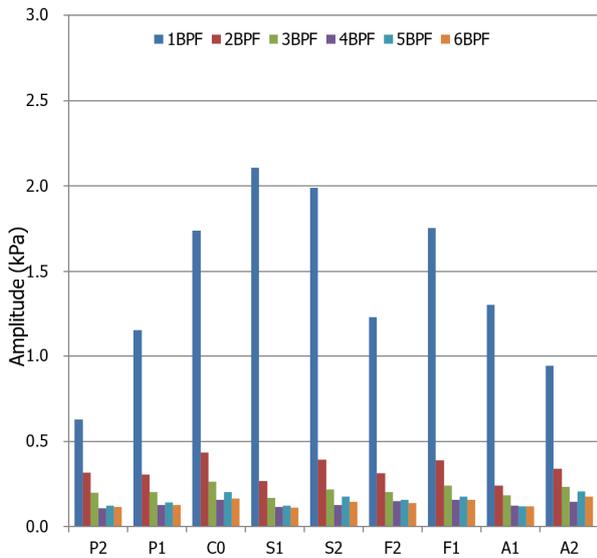


Fig. 11 Pressure fluctuation levels at behind new strut

의하여 진폭에 차이가 있다. 현재의 변동압력은 프로펠러 하중에 의한 변동압력이 지배적이라 사료된다

프로펠러 캐비테이션 초기발생 속도(CIS) 시험은 대형 캐비테이션터널 시험부 유속을 고정시킨 후, 시험부 압력과 프로펠러 회전수를 조절하면서 캐비테이션 수와 전진계수를 변경시켜 프로펠러의 각 부위에 발생하는 캐비테이션의 초기발생 조건을 결정한다. 상기의 과정은 다수의 전진계수(advanced coefficient)에 대하여 반복 수행하게 되며, 모든 캐비테이션의 초기발생 조건은 육안 관측으로 결정된다. 모형 스케일에서의 초기발생 조건은 예인수조에서 수행된 자항시험 결과로부터 도출된 선속별 운항조건(operation profile)을 함께 도시함으로써 캐비테이션 종류에 따른 초기발생 속도를 예측할 수 있다. 본 연구에서 적용된 프로펠러 전진계수와 캐비테이션 수는 다음과 같다.

$$J_A = \frac{V_A}{nD} \tag{1}$$

$$\sigma_A = \frac{P_s - P_v}{0.5\rho V_A} \tag{2}$$

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

모형에서 예측된 캐비테이션 초기발생 속도를 실선으로 예측하는 경우 통상적으로 날개끝 보오텍스(tip vortex) 캐비테이션에 대해서만 레이놀즈수 차이에 따른 점성효과가 적용된다고 알려져 있다. 따라서 날개끝 보오텍스 캐비테이션을 제외한 다른 형태의 캐비테이션(sheet cavitation, root cavitation 등)에 대하여는 모형과 실선에서의 초기발생 속도가 동일하다고 가정하였으며, 날개끝 보오텍스 캐비테이션에 대해서는 McCormick이 제시한 아래의 식에 의하여 실선에서의 초기발생 속도를 예측하게 된다 (McCormick, 1962).

Sheet cavitation & Root cavitation

$$(\sigma_A)_M = (\sigma_A)_S \tag{3}$$

Tip vortex cavitation

$$\frac{(\sigma_i)_S}{(\sigma_i)_M} = \left[\frac{(Re)_S}{(Re)_M} \right]^m \tag{4}$$

$$Re = \frac{V_A D}{\nu} \tag{5}$$

여기서 σ_i 는 초기발생 캐비테이션 수, m 은 실선과 모형선 상관관계에 따라 결정되는 지수, ν 는 동점성계수이며, 첨자 M 과 S 는 각각 모형과 실선 스케일을 의미한다.

Fig. 12와 Fig. 13은 부가물 수정 전·후 날개끝 보오텍스(tip vortex) 캐비테이션의 초기발생 특성을 보여준다. 프로펠러 캐비테이션 초기발생 시험은 흡입면과 압력면에서 발생하는 모든 종류의 캐비테이션(tip vortex, L.E., Root, Hub 등)을 관찰하지만 실선 스케일링이 되는 날개끝 보오텍스(tip vortex) 캐비테이션이 거의 모든 경우에 캐비테이션 초기발생 선속(CIS)을 결정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 흡입면 및 압력면 날개끝 보오텍스(SSTV & PSTV) 초기발생 캐비테이션의 모형 및 실선 특성만을 언급한다. Fig. 12와 Fig. 13에서는 Fig. 7에 나타난 부가물 수정 전·후 운항조건이 각각 표기된다. 운항조건을 중심으로 모형에서 결정된 초기발생 캐비테이션 수는 식 (4)를 이용하여 실선으로 추정된다. 모형선-실선 상관관계를 결정짓는 지수 m (exponent factor)의 결정에 있어 수치해석 발전에도 이론 및 수치적으로 지수를 결정하는 것은 어려운 문제이며, 기존 실선 계측치와의 상관관계를 고려하여 결정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 함정에서 일반적으로 사용되는 $m=0.4$ 를 적용하여 추정하였다. 추정된 실선 초기발생 캐비테이션 수는 모형과 큰 차이가 발생된다. Fig. 12에서 SSTV의 경우 실선 추정 결과(SSTV scaled)가 자항시험 결과로부터 얻은 운항 조건을 벗어남에 따라 외삽법

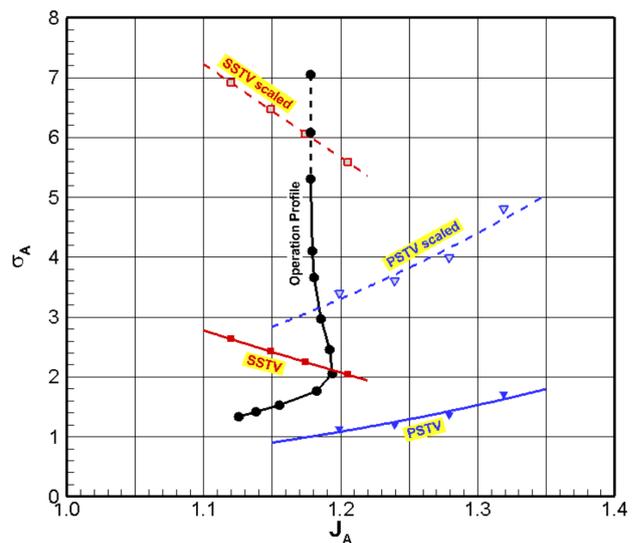


Fig. 12 Cavitation inception diagram at behind old strut

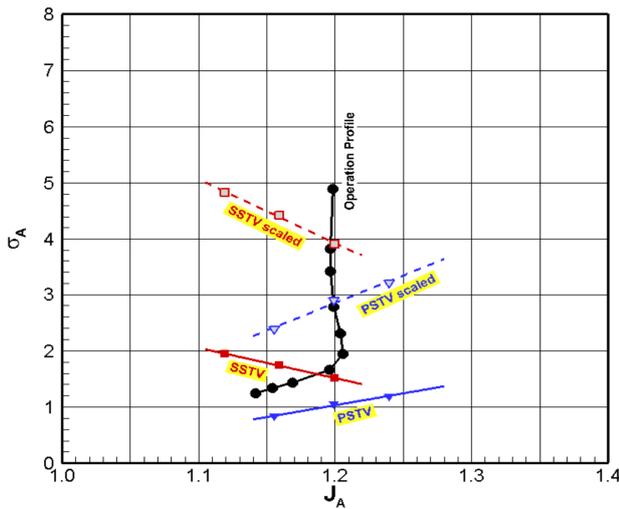


Fig. 13 Cavitation inception diagram at behind new strut

(extrapolation)으로 낮은 선속 영역을 추정하였고, 점선으로 표기하였다. 일반적으로 SSTV는 20°~40° 부근에서, PSTV는 300°~320° 부근에서 처음 발생한다. SSTV는 350° 부근에 발생한 반류가 주요 원인이며, PSTV는 반류의 영향도 있지만 축경사로 발생하는 상방향 유속(V_{upward})에 의한 프로펠러 유입 입사각 감소가 원인이다 (Ahn et al., 2019). 부가물 수정 전후 실선 추정된 SSTV의 캐비테이션 초기발생 선속(CIS)은 흡입면 반류 차이로 약 2.6knots 차이가 나타난다. 압력면 날개끝 보오텍스(PSTV) 캐비테이션의 경우 부가물 수정 후 회전수 증가 및 유입 유속 감소로 약 0.5knots 정도 향상된다. 실선 추정된 SSTV 캐비테이션이 가장 낮은 선속에서 발생함에 따라 SSTV의 초기발생 선속이 프로펠러 CIS로 결정된다. 따라서, CIS는 부가물 수정 후 약 2.6knots 향상된 것으로 나타났다.

5. 방향타 캐비테이션

함정용 방향타는 프로펠러 하류에 위치함에 따라 선체와 프로펠러 외에 경사축 및 각종 부가물 등의 상호작용으로 인하여 복잡한 불균일 유동장에서 작동하게 된다. 부가물 중 2개의 V-strut이 수정됨에 따라 수정 전후 방향타 캐비테이션 변화를 조사하고자 한다. Fig. 14는 Table 2에 제시된 시험 조건에서 수행된 부가물 수정 전후 타각별 방향타 캐비테이션 발생량의 비교를 보여준다. 좌현 방향타를 기준으로 캐비테이션이 관찰되었으며, 타를 위에서 바라보았을 때 시계방향으로 회전하면 양의(+) 타각, 반시계방향으로 회전할 때 음의(-) 타각이라고 정의한다. 반시계방향으로 타각을 증가시키에 따라 좌현 방향타 바깥쪽(outboard)과 우현 방향타 안쪽(inboard)에서 발생한 캐비테이션 관찰이 가능하다. 방향타 타각은 0.01° 간격으로 조절될 수 있는 방향타 동력계를 이용하여 수행되었다 (Ahn et al., 2021). 방향타에 발생한 캐비테이션은 변동이 매우 심하게 나타나므로 캐비테이션 발생량을 정량적으로 평가하려면 특별한 기법이 요구된다. 최근 고속카메라로 촬영한 영상을 분석하



Fig. 14 Rudder cavitation at behind old & new struts

여 캐비테이션 발생량의 정량적 분석을 수행한 바 있는데, 이때 촬영 속도는 10000 fps(frame per second)이다 (Paik et al., 2021). Fig. 14는 30 fps(frame per second)로 촬영되는 캠코더를 이용하여 얻은 영상 중에서 되도록 캐비테이션이 최대로 발생하는 영상을 캡처(capture)하였다. 따라서 본 연구에서는 타각별로 캡처된 영상을 이용하여 정성적 평가만을 수행한다.

Fig. 14의 영상에서 부가물 수정 전후 좌현 방향타 바깥쪽(outboard)에 발생하는 캐비테이션 발생량은 거의 유사하거나, 수정 후(new strut)가 수정 전(old strut)보다 약간 증가한 것처럼 보인다. 타각(δ_R) -12°와 -16°에서 우현 방향타 안쪽(inboard)에서 발생한 캐비테이션은 수정 후에 감소된 것을 볼 수 있다. 평판타의 경우 좌우현 프로펠러가 바깥쪽으로 회전함에 따라 Fig. 15와 같이 타각 0°에서도 바깥쪽으로 향하는 유동 입사각(α)이 존재한다. 유동입사각에 따른 받음각(angle of attack)이 타각 0°부터 존재함에 따라 반시계 방향으로 타각이 변경되었을 경우(음의 타각) 좌현 방향타의 받음각은 타각과 함께 증가하게 되며, 우현방향타는 받음각이 감소했다가 증가하는 현상이 나타난다. 비틀림타의 경우 유동 입사각과 앞날(L.E.)의 비틀림각을 유사하게 설계하여 타각 0°에서 받음각이 0°에 근접하게 된다. 따라서 음의 타각 증가와 함께 평판타에

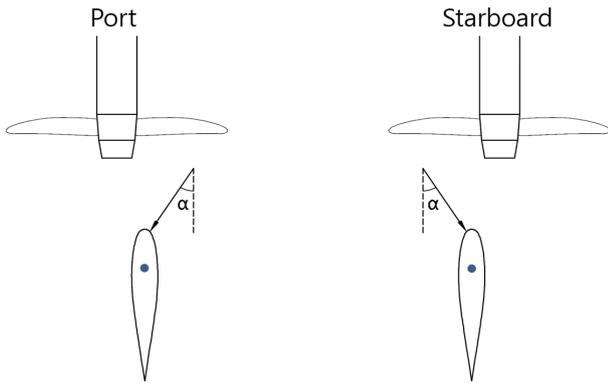


Fig. 15 Flow angle of incidence of the rudders

비하여 좌현 방향타 바깥쪽에 발생하는 캐비테이션은 감소되고, 우현 방향타 안쪽에서 발생한 캐비테이션은 증가하는 현상이 나타난다 (Ahn et al., 2021). 이런 이유로 부가물 수정 후 유동입사각이 증가했다고 사료된다. 부가물 수정 후 실선에서 동일 선속을 달성하려면 동일 프로펠러 추력이 발생되어야 하며, 이를 위하여 프로펠러 회전수를 증가시켜야 한다. 프로펠러 회전수 증가가 방향타에 유입되는 유동입사각을 증가시켜 좌현 방향타 바깥쪽 캐비테이션을 약간 증가시키고, 우현 방향타 안쪽 캐비테이션을 감소시킨 것으로 사료되지만 복잡한 유동장이라 단순히 설명하기는 어렵다. 추후 CFD 계산을 통한 유동장 분석을 통하여 결과를 분석해 보고자 한다. 부가물 개선을 통하여 프로펠러 캐비테이션 성능은 향상시켰지만 방향타 캐비테이션은 약간 증가하는 현상이 나타났다. 부가물 개선에 따른 방향타 캐비테이션 성능을 향상시키려면 설계시 방향타 입사각을 감소시키는 등의 고려가 있어야 할 것으로 사료된다.

6. 결론

합정 프로펠러 캐비테이션 성능을 향상시키기 위하여 프로펠러 상류의 설치된 부가물을 수정하였다. 부가물 수정은 프로펠러로 유입되는 반류가 개선되는 방향으로 수정된 바, 부가물 중에서 2개의 V-strut 날개들의 기하학적 비틀림 각을 CFD 수치 해석 기법을 활용하여 수정하였다. 수정된 부가물들을 제작 설치하여 대형캐비테이션 터널에서 반류분포 계측 및 PBW 계측을 수행한 바, 높은 반류 영역이 개선되는 효과가 나타났으며 운항조건이 변경되었음을 파악할 수 있었다, 따라서 수정된 부가물을 설치하여 예인수조에서 저항 및 자항시험을 수행한 후 운항조건을 도출하여 대형캐비테이션 터널에서 캐비테이션 시험을 수행하였다.

캐비테이션 관찰, 변동압력 및 캐비테이션 초기발생 선속(CIS)으로 구성되는 프로펠러 캐비테이션 시험은 부가물 수정 전후 모두 수행되었다. 최고선속 조건에서 수행된 캐비테이션 관찰 시험 결과 모든 종류의 캐비테이션(프로펠러 면, 날개끝 보오텍스, 뿌리 등)이 부가물 수정 후에 수정 전보다 현저하게 감소하였다. 캐비테이션 관찰시험과 동시에 수행된 변동압력은 부가물 수정

후에 수정 전보다 전반적으로 감소하였는데, 최대 변동압력은 약 12% 감소하였다. 부가물 수정 전 캐비테이션이 날개 끝부분에서 비교적 얇게 발생하면서 변동압력 수준에 큰 영향을 주지 못한 것으로 사료된다. CIS는 흡입면 날개끝 보오텍스 캐비테이션 (SSTV)이 부가물 수정 전후 모두 가장 낮은 선속에서 발생됨에 따라 SSTV 발생 선속으로 결정되었다. 부가물 수정 후 CIS는 수정 전보다 약 2.6 knots 향상되었는데, 프로펠러 설계 개선으로 향상시킬 수 있는 선속보다 개선 효과가 크다. 본 연구에서는 프로펠러 설계 개선이 수행되지 않았는데 SSTV와 PSTV가 운항조건 곡선에서 매칭(matching)되는 설계가 수행되면 CIS 개선 효과가 더 크게 나타날 것이다.

방향타 캐비테이션 시험은 최고 선속 조건에서 수행되었는데, 캐비테이션이 약간 증가하는 현상을 보여준다. 반류가 변경되면서 운항조건이 변경된 것이 방향타 유입유동의 입사 각도를 증가시킨 것으로 사료되는데, 추후에 CFD 등의 검증을 통하여 자세한 원인을 조사하고자 한다. 방향타 캐비테이션을 향상시키려면 방향타 입사유동을 조절하여 유입각도를 감소시키는 방향으로 부가물이 수정되어야 할 것으로 사료된다.

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. Paik, B.G., Park, Y.H. and Seol, H.S., 2021. Experimental study of the flat & twisted rudder characteristics using rudder dynamometer in LCT. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 58(6), pp.391-399.
- Ahn, J.W., Park, I.R., Park, Y.H., Kim, J.I., Seol, H.S. and Kim, K.S., 2019. Influence of thru holes near leading edge of a model propeller on cavitation behavior. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.281-289.
- 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., Jeong, H.S., Seol, H.S., Song, J.Y. and Ko, Y.H., 2021. An experimental study on the frequency characteristics of cloud cavitation occurring in navy ship's rudder. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 58(3), pp.167-174.
- 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.
Siemens, 2018. *STAR-CCM+ 11.04 User Guide*, URL: <https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/general/documentation.shtml> [Accessed 1 January 2018].

