

정적 받음각을 갖는 초공동화 수중체에 대한 실험적 연구

이준희^{1,†}·백부근¹·김경열¹·김민재²·김선홍²·이승재³
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
국방과학연구소²
대우조선해양³

Experimental Study on Supercavitated Body with Static Angle-of-attack

Jun-Hee Lee^{1,†}·Bu-Geun Paik¹·Kyoung-Youl Kim¹·Min-Jae Kim²·Seonhong Kim²·Seung-Jae Lee³
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO)¹
Agency for Defense Development²
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.²

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 the present study, we investigated planing forces of supercavitated bodies by using the supercavitation shape produced by the disk type cavitator. The cavity shapes are observed to find the immersion draft and planing angle when the stern of the supercavitated body is partially immersed in the water. To make the planing the angle-of-attack (AOA) of the supercavitated body is varied statically against the main flow and the planing tests are carried out for different body shapes that are changed systematically. The drag, lift and pitch moment acting on the body are measured to understand the relation between the planing force and the immersion draft of the supercavitated body. It is found that the planing force increased in general linearly with the immersion draft ratio and the planing angle is certainly not proportional to the immersion draft ratio.

Keywords : Supercavitated body(초공동화 수중체), Planing(활주), Ventilated supercavitation(환기 초공동), Immersion draft ratio(잠김 흘수비), Planing force ratio(활주력비), High-speed cavitation tunnel(고속 캐비테이션 터널)

1. 서론

수중운동체의 초공동(supercavitation)화 기술은 캐비테이터(cavitator)에서 발생하는 공동이 수중운동체 전체를 덮어 유체 마찰저항을 크게 감소시킴으로써 수중에서 50노트 이상의 고속 주행을 가능하게 하는 기술이다. 초공동 수중운동체의 성능을 실제 척도에서 검증하는 것은 쉽지 않기 때문에 초기 설계 단계에서 축소 모형에 대한 초공동 시험을 수행하여 그 성능을 확인하거나 설계안을 개선하는 것이 바람직하다. 국외에서는 대표적으로 미국 미네소타 대학교의 SAFL(Saint Anthony Falls Laboratory)이 초공동 시험을 다년간 수행하여 초공동 캐비테이터 설계(Sanabria, 2015; Kawakami & Arndt, 2011; Escobar et al., 2014)뿐만 아니라 초공동 운동체에 대한 유도제어기술을 개발하여 초공동 분야에 있어서 앞선 기술을 보유하고 있다.

국내에서도 모형시험이나 수치해석을 이용하여 초공동화 운동체의 캐비테이터와 몸체 설계뿐 만 아니라 유도 제어를 위한 기초 기술의 개발이 진행되고 있으며 수중운동체 또는 캐비테이터의 크기 변화에 따른 척도 효과(Park et al., 2016; Park et al., 2018; Kim et al., 2018)에 대한 연구도 진행하고 있다. 그러나 초공동화 수중운동체의 자세 제어에 대한 국내 연구는 실험적으로 거의 이루어진 바가 없다. 국외에서는 Kiceniuk(1954)이 원판 및 원추형 캐비테이터에 대한 받음각 실험을 수행하여 항력 및 양력 계측 결과를 보고하였고 Waid(1957a)는 디스크 캐비테이터에 대한 실험을 수행하여 공동 형상 변수들에 대한 경험식을 도출하기도 하였으며 2차원 공동에 대한 활주(planing) 실험(Waid, 1957b)을 수행하여 기초적인 결과들을 보고하였다. 수중운동체의 자세 제어를 위한 기초연구로서 공동의 형상 변화에 영향을 주는 캐비테이터 받음각 또는 몸체 받음각

음각 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다(Hjartarson, 2012; Sanabria, 2015; Kochin et al., 2015).

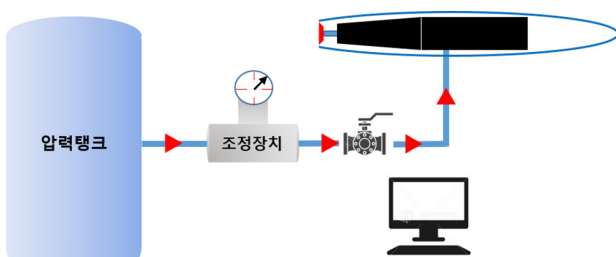
본 연구에서는 초공동 형상 및 유체력에 영향을 주는 캐비테이터의 받음각 변화 및 초공동화 수중체의 받음각 변화에 대해서 국내 최초로 실험적인 접근을 시도하였으며 받음각 변화에 따른 공동 활주 특성 및 유체력을 계측하였다. 관련 실험들은 Fig. 1에 서 보는 바와 같이 선박해양플랜트연구소의 초공동 시험용 고속 캐비테이션 터널(High-speed Cavitation Tunnel, HCT)에서 비교적 큰 직경의 캐비테이터를 사용하여 넓은 범위의 받음각 변화에 대한 실험을 수행하였고 그 결과들을 분석하였다.



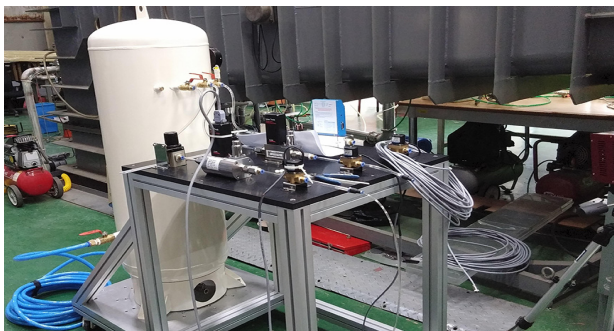
Fig. 1 High-speed cavitation tunnel (HCT) in KRISO

2. 실험방법 및 실험장치

Fig. 1에 나타난 HCT의 시험부 길이는 3m, 단면적 크기는 $0.3 \times 0.3\text{m}^2$ 이다. 실제 HCT 시험부에서 형성된 유체 유동의 균일도는 1% 내외이며 난류강도는 0.4% 내외이다. 또한 시험부에서 최대 유속은 20.4m/s이다. 환기 초공동의 경우 시험부에서



(a) Conceptual diagram



(b) Prototype

Fig. 2 Air flow-rate control system for air injection

공기를 계속 주입하게 되므로 주입된 공기가 터널을 돌아서 시험부로 재유입하는 것을 최소화하기 위하여 기포 포집이 중요하게 된다. HCT는 직경 600 μm 이상의 기포를 모두 포집할 수 있는 장치를 보유하고 있다. 본 연구에서 환기 초공동 실험을 수행하기 위한 공기유량제어시스템은 300L/min까지 $\pm 2\%$ 이내의 오차범위에서 공기유량을 일정하게 제어할 수 있다. 공기유량제어시스템은 Fig. 2에서는 보는 바와 같이 공기의 압력을 일정하게 유지하는 압력탱크와 조정장치(regulator), 유량제어밸브 및 on-off 밸브로 구성되어 있다(Paik et al., 2017).

2.1 캐비테이터 받음각에 대한 설계

캐비테이터 받음각(Angle-Of-Attack, AOA) 변화 실험을 수행하기 위해서 샤프트(shaft)의 중심축을 시험부의 유동 방향과 일치시킨 상태에서 캐비테이터의 피치각을 조절하면서 캐비테이터에 작용하는 힘을 계측하는 장치를 Fig. 3~5와 같이 설계, 제작하였다. 캐비테이터 피치각 조절장치는 톱니바퀴 방식으로 설계하였으며 톱니 1개당 5°씩 회전한다. 캐비테이터 받음각 조절장치는 캐비테이터와 수중체의 몸통에서 쉽게 탈착이 가능하며 전체 길이는 20mm이다. 이 장치를 이용하면 캐비테이터 피치각을 조절할 수 있다. 캐비테이터 후방의 샤프트 내에 3분력계를 설치하여, 캐비테이터에 작용하는 X방향 항력(drag), Z방향 양력(lift) 그리고 Y방향 헤드 업(head-up) 모멘트를 계측하였다(Fig. 4 참조). 센서를 경계로 내·외부의 압력 평형을 얻을 수 있도록 빔(beam)방식(Paik et al., 2018)의 3분력계를 캐비테이터 바로 뒤에 설치하였다. 3분력계는 원방포스텍에서 제작하였으며 항력, 양력, 피치모멘트를 각각 100N, 70N, 5Nm까지 측정할 수 있고 -0.22%의 선형성 및 -0.03%의 부하이력과 0.03%의 재현성을 갖는다.

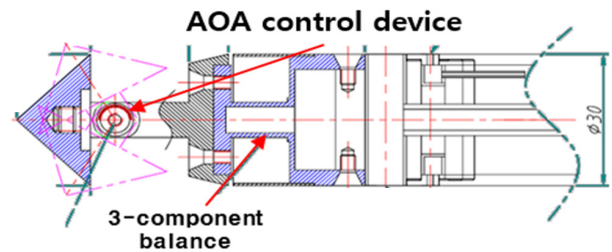


Fig. 3 Three-component balance for force measurement

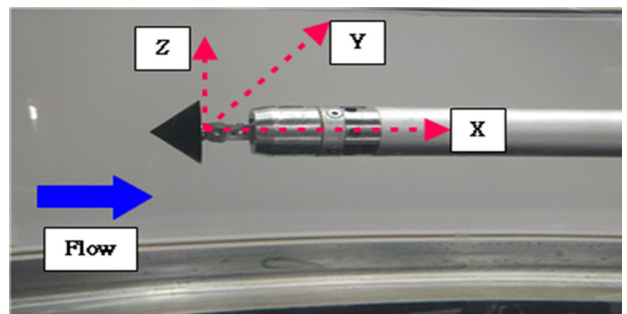


Fig. 4 Coordinate of forces ventilated supercavitation experiments

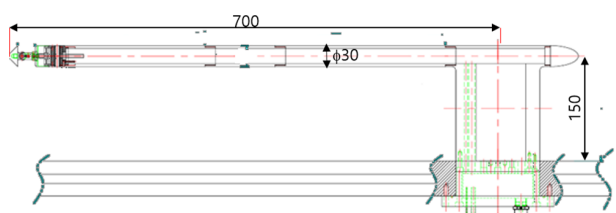


Fig. 5 System set-up for ventilated supercavitation experiments

2.2 초공동화 수중체 받음각에 대한 실험

초공동화 수중체에 대한 몸체 받음각 실험을 준비하기 위해서는 HCT 시험부에서 형성된 초공동 내에 수중체가 위치하도록 설계하는 작업이 필요하다. Fig. 6을 보면 그림자 기법(Paik et al., 2018)에 의해 도출된 검은색의 초공동 윤곽을 확인할 수 있는데 이 초공동 내에 수중체를 위치시키고자 적색으로 표시된 수중체의 몸통을 설계하였다. 이 때 수중체의 초공동화를 위한 캐비테이터 직경 d_c 는 36mm이며 최소공동수($=0.24$)에서 예상되는 공동의 직경은 105mm, 공동의 길이는 약 600mm이었다. 몸통 평행부의 직경은 80mm, 길이 229.02mm이며 평행부 앞단에는 경사각(slant 또는 shoulder angle)을 갖는 선수부가 있으며 그 길이는 경사각에 의해 결정되고 평행부 후단에는 길이 50mm의 선미부가 위치하여 수중체 총 길이는 캐비테이터의 앞단부터 475mm이다.

수중체 받음각 실험을 수행하기 위한 스팅(sting)형 수중체 실험장치 단면도를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 초공동화 수중체에 대한 힘의 좌표계는 Fig. 4와 마찬가지로이다. 수중체에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하기 위하여 3분력계(원방포스택)를 수중체 내에 설치하였으며 이 센서는 항력 및 양력과 피치모멘트를 각각 1200N, 1200N, 120Nm까지 측정할 수 있고 -0.18% 의 선형성 및 -0.07% 의 부하이력과 0.09% 의 재현성을 보여준다. 활주(planing)현상이 발생할 때 수중체에 가해지는 상대적으로 큰 유체력 측정하기 위해 안전계수를 고려하여 분력계를 설계하였다. Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이 수중체와 스팅을 지지하기

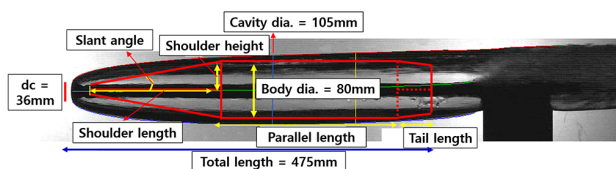


Fig. 6 Cavity shape without underwater body and body shape design

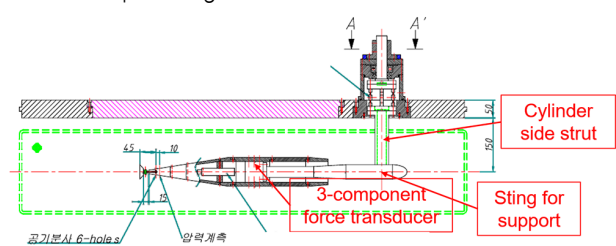


Fig. 7 Drawing of the sting-type body model(top view)

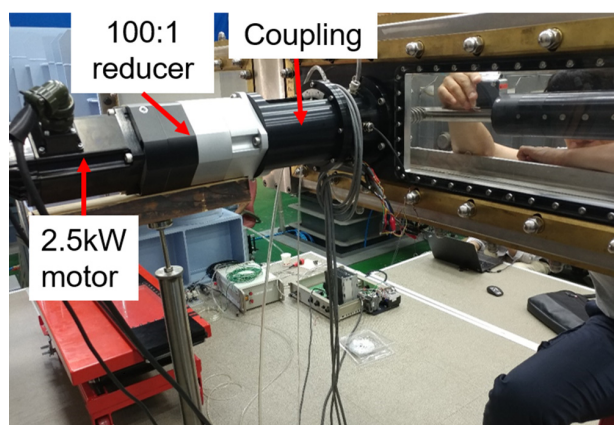
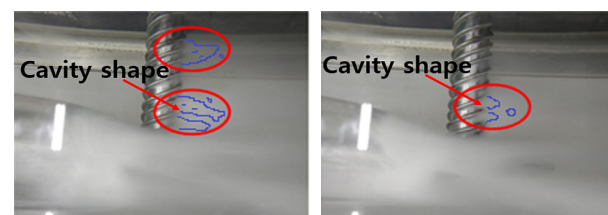


Fig. 8 Motor section of experimental set-up

위하여 실린더 형상의 스트럿(strut)을 설계, 제작하였다. 수중체 종동요의 구동을 위한 터널 외부의 하드웨어는 2.5kW 서보(servo)모터와 100:1의 감속기, 터널 내부의 strut과 연결해주는 커플링(coupling)이 있으며 프로그램을 이용하여 제어하도록 구성하였다. 여기서 커플링은 서보모터에 직접 연결되어 수중체에 가해지는 유체력을 견디면서도 분력계에 전기적 노이즈(noise)가 유발되지 않도록 절연되어야 한다.

Strut이 실린더 형상이므로 strut에 의한 와유기진동(Vortex Induced Vibration, VIV)을 억제하기 위하여 균일류 실린더에 대한 실험 및 경험 자료(Weaver, 1962; Zdravkovich, 1981)를 바탕으로 실린더 표면에 원주 90° 간격으로 직경 2.8mm 와이어(wire)를 strut 직경의 8배가 되는 길이로 부착하였다. 그러나 Fig. 9에서 보는 바와 같이 시험부 유속 9m/s에선 벽(wall)과 수중체의 영향으로 strut 뒤에서 불균일한 후류 캐비티(wake cavity)가 약 1.5Hz정도로 발생하였고 초공동의 끝단이 strut에



(a) 9m/s (b) 7m/s

Fig. 9 Wake cavity generated in side strut

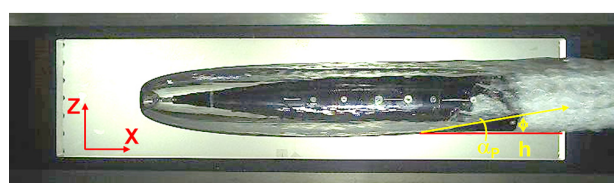
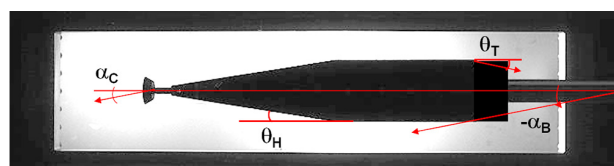


Fig. 10 The parameters used in the planing test

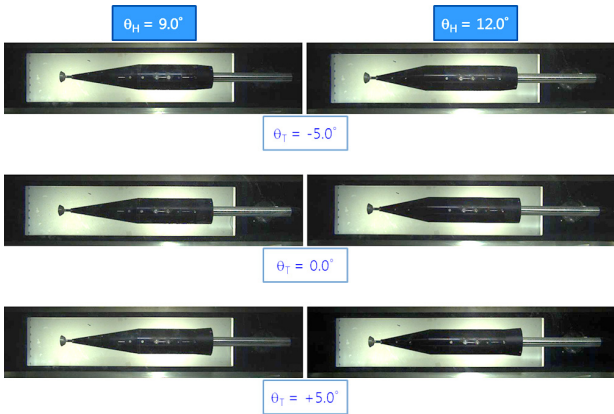


Fig. 11 Body shapes with the variation of θ_H and θ_T

충돌하거나 근접하면 초공동과 와방출(vortex shedding) 간에 상호작용으로 인해 비슷한 패턴의 초공동 현상이 발생하지 않는다. 또한 strut 후류 캐비티가 크게 나타날 때 수중체 후미에 예기치 않는 패턴의 활주 현상이 발생하였다. 한편, 시험부 유속 7m/s에서는 strut 후류 캐비티가 약 0.2Hz로 발생하고 그 크기가 대폭 감소하여 이 속도를 본 연구의 시험부 유속으로 채택하여 수중체 받음각 실험을 수행하기로 결정하였다.

수중체의 일부가 초공동으로 덮여 있고 수중체 후미가 초공동 밖으로 뚫고 나와 물과 접하는 것을 활주(planing)현상이며 활주현상으로 수중체에 상대적으로 큰 유체력이 작용하게 되며 이를 활주력(planing force)라고 한다. 활주현상이 발생하면 수중체 자세에 매우 불안정성을 초래한다. 그러므로 활주 실험 결과는 초공동화 수중체 자세 제어 대한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 활주력을 지배하는 변수는 후미가 물에 잠긴 깊이 h , 활주(입사)각 α_p 이며, 초공동 형상을 지배하는 변수는 캐비테이터 받음각 α_c , 수중체 받음각 α_b , 선수부 경사각 θ_H , 선미부 경사각 θ_T 로 구성되며, 이 변수들의 정의는 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 캐비테이터는 수중체에 부착되어 있으므로 캐비테이터 받음각과 수중체 받음각이 동일하다. 그리고 수중체가 받음각을 갖는 경우를 고려하여 수중체의 평행부 연장선과 후미부 끝단의 교차점을 기준으로 수직거리를 잠긴 깊이, 평행부 연장선으로부터 후미부가 물에 노출된 영역을 활주각으로 정의하였다. 실험 대상 수중체는 직경이 36mm인 동일한 원판 캐비테이터를 머리에 부착하였지만, Fig. 11에 보인 것 같이, θ_H 가 9°, 12°이고 θ_T 는 0°, ±5°로서, 총 6가지 형상변화를 주었으며, 각기 다른 형상의 수중체에 대해서 받음각을 변화시키면서 활주력 계측 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

Fig. 10을 보면 캐비테이터는 중심축을 일치시켜 몸통에 고정되어 있는 상태이므로 몸체가 받음각을 갖는 경우 캐비테이터도 또한 동일한 받음각을 갖는다. 따라서 몸통의 영향을 최소화한 조건에서 캐비테이터에 작용하는 힘을 계측하고 이를 활

용하여 활주시 초공동화 수중체의 후미에 작용하는 순수한 활주력을 도출하기 위하여 캐비테이터 받음각에 대한 실험을 먼저 수행하게 되었다.

3.1 캐비테이터 받음각에 대한 실험결과

캐비테이터 받음각 변화에 따른 항력실험은 앞서 보여준 Fig. 5에 보인 장치를 이용하여 수행하였으며 사용한 캐비테이터는 원판 형이며 직경은 36mm이다. 캐비테이터 받음각은 Fig. 12와 같이 캐비테이터의 유동박리면(forward facing)의 법선방향(normal direction)이 +Z 방향이면 양(+의) 받음각, -Z 방향이면 음(-의) 받음각으로 정의한다. 주어진 캐비테이터에 대해 받음각 회전 범위를 -30°, -20°, -10°, 0°, 10°, 20°, 30°로 선정하여 받음각 실험을 수행하였다.



Fig. 12 The Definition of angle-of-attack

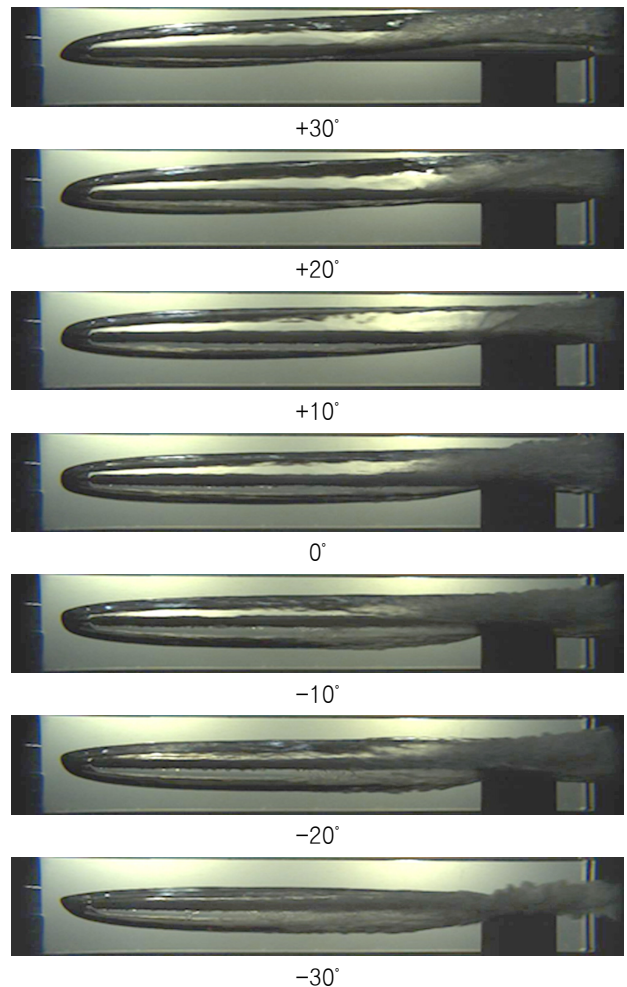


Fig. 13 The supercavitation images with the variation of cavitator AOA

캐비테이터 받음각 변화에 따라 고속카메라로 촬영한 초공동 영상을 Fig. 13에 나타내었다. 초공동 영상에서 보는 바와 같이 양의 받음각에서는 경사된 캐비테이터 앞면을 따라서 가속된 유동이 upper edge에서 박리하면서 공동 표면이 윗 방향으로 형성되고 종력 효과, 즉 부력에 의한 공동 후미의 상승이 이에 더해진 결과이며 반대로 음의 받음각으로 경사된 캐비테이터 lower edge에서 박리하면서 공동 표면이 아랫방향으로 형성되고 부력에 의한 공동 후미의 상승과 상쇄되면서 나타난 결과로 볼 수 있다. 즉, 음의 받음각에서는 수평으로 나란한 공동 형상이 주로 발생하고 있다. 받음각 변화 시 환기초공동수(σ_c)에 대한 공기유량계수(C_q)의 이력 곡선을 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 14에서 보는 것과 같이 받음각의 크기를 크게 할수록 최소공동수 σ_{min} (Kim et al., 2015)이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 받음각의 크기가 커질수록 공동의 직경이 작아져 막힘비(blockage)효과가 낮아지므로 최소공동수가 감소하게 된다. 또한 초공동이 생성된 이후 공기분사량을 줄이더라도 내부압력이 일정하게 유지됨으로써 이력현상(hysteresis)이 발생한다.

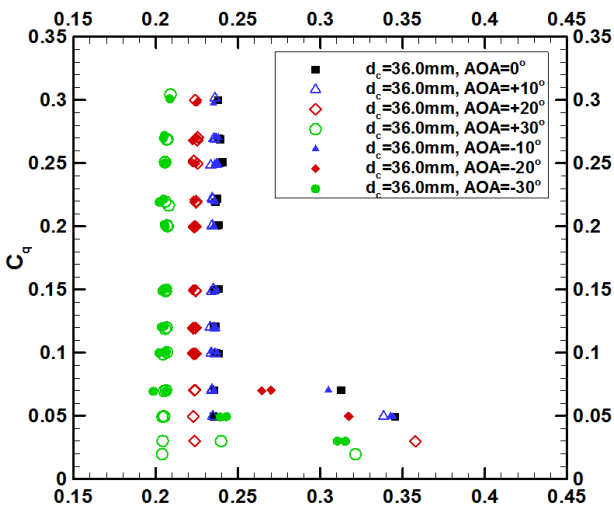
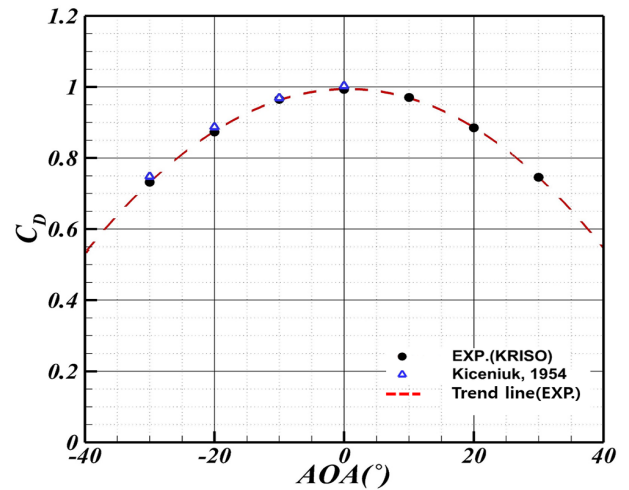


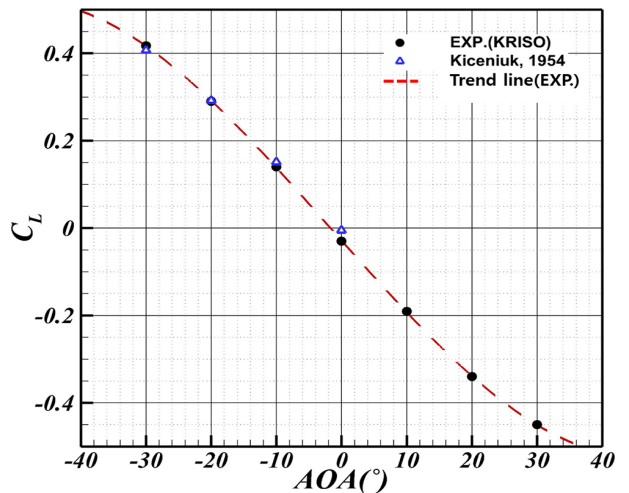
Fig. 14 C_q - σ_c hysteresis curve obtained from the angle of attack test

환기 초공동 실험에서 일반적으로 나타나는 이력현상이 양의 받음각에서 발생하지만 받음각이 -20° 와 -30° 에서는 동일한 궤적을 따라가는 것을 볼 수 있으며 이는 이력현상이 감소하거나 사라졌다고 할 수 있다. 그러나 이력현상이 달라진 궁극적인 이유를 밝히기 위해서는 초공동 경계면의 압력변화를 관찰해야 되므로 최소공동수에 도달하는 지점에서부터 캐비테이터 주위의 압력분포 등 다양한 실험 자료들을 분석해야할 것으로 판단 된다.

캐비테이터 받음각에 따른 항력계수(C_D) 및 양력계수(C_L)를 나타낸 그래프를 Fig. 15에 나타내었으며 최소공동수가 동일한 지점($=0.24$)에서의 실험결과와 Kiceniuk(1954) 연구를 비교하였다. Fig. 15에서 보듯이 항력계수에서는 최대 약 1.9%내외의 차이를 보이며 양력계수의 경우 캐비테이터 받음각 0° 를 제외하고는 매우 만족스러우며 정성적 경향 또한 비슷하게 나타난다.



(a) Drag coefficient



(b) Lift coefficient

Fig. 15 Variation of the drag and lift coefficients with the AOA(Kiceniuk, 1954)

받음각 0° 에서의 양력계수 차이는 캐비테이터 피치각 변화를 줄 수 있는 톱니형태의 유격으로 작은 양력이 발생한 것으로 판단 된다. 그리고 캐비테이터 받음각 0° 를 기준으로 $\pm 30^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 10^\circ$ 의 항력계수는 각각 약 1.8%, 1.3%, 0.5% 내외의 차이를 보이며 대칭성이 잘 나타내어 시험부 정중앙에 실험장치가 정확히 설치되었다고 볼 수 있다. 원판형 36mm 캐비테이터 받음각을 변수로 하는 항력계수와 양력계수를 식(1)과 (2)로 추정할 수 있다.

$$C_D = -0.0003x^2 + 0.0003x + 0.9942 \quad x = AOA(^{\circ}) \quad (1)$$

$$C_L = (3 \times 10^{-6})x^3 + (1 \times 10^{-5})x^2 - 0.0168x - 0.0286 \quad x = AOA(^{\circ}) \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 이용하여 수중체 받음각 변화 실험으로부터 얻어진 결과에서 캐비테이터에 작용하는 유체력을 제한으로써 환류상태의 초공동화 수중체의 활주력을 추정하였다. 그러나 추정식이 본 연구소의 터널에 해당하는 최소공동수에서 얻은 결과

값으로 나타내었으며 적용할 수 있는 공동수의 범위는 추가 실험을 통해 확인할 필요가 있다.

3.2 초공동화 수중체 받음각에 대한 실험결과

수중체 받음각 실험을 수행하기 위해 Fig. 7과 8에서 보여준 실험 장치를 구성하여 활주력과 모멘트를 계측하였다. 제작 설치된 3분력계의 성능을 검증하기 위해서 몸체 받음각이 0°인 상태에서 유속 1m/s부터 5m/s까지 non-cavity 상태의 수중체 전 항력계수 C_D 를 계측하였는데 캐비테이터의 받음각 실험에서 계측된 캐비테이터 항력계수($C_D=0.99$)와 유사하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 수중체의 후미에 작용하는 활주력을 얻기 위해 식(1)과 (2)로부터 추정된 캐비테이터의 항력계수 및 양력계수를 이용하게 된다.

수중체 받음각은 HCT 시험부의 크기를 고려하여 $-0.6^\circ \leq \alpha_B \leq 1.0^\circ$ 내에서 0.1° 간격으로 변화시켰다. Fig. 16은 수중체 받음각이 +0.6°일 때 6가지 몸통 형상의 수중체에 대한 초공동 현상을 보여주고 있으며, 활주력에 영향을 주는 α_p 와 h 값을 얻기 위해서는 초공동 밖으로 드러나 물에 노출된 수중체 표면과 초공동 현상을 구분하여 추출해야한다. 초공동 윤곽들을 추출할 수 있는 그림자기법에서는 몸통 후미형상이 변화하거나 활주가 미세하게 발생한 상태에 대해서도 초공동 윤곽들을 잘 포착할 수 있도록 고속카메라 옆에 광원을 추가적으로 배치하였으며 배경 영상을 이용하여 불필요한 부분에 대한 영상을 제거한 뒤 추출된 영상으로 활주 영역에 대한 정보를 획득하였다. Fig. 17에 보는 바와 같이 후미형상의 변화에 따라 추출된 활주영역의 윤곽을 잘 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 때 사용된 고속카메라(MINI AX50, Photron)는 896× 208의 픽셀(pixel) 분해능, 24비트의 컬러 관용도(dynamic range)를 가지며 계측 시 영상의 공간 분해능은 1.094 pixel/mm이다.

500장의 공동 영상들을 이용하여 국소적으로 비정상(unsteady) 상태인 공동 현상들에 대한 앙상블(ensemble)평균을 취하였으며 그 결과들을 몸체 잠김 비(h/D_ϕ)에 따른 활주각 α_p 와 양력계수 C_L 를 Fig. 18에 나타내었다. 여기서 D_ϕ 는 몸통 평행부의 직경을 나타내며 80mm이다. Fig. 18에서 (a)는 선수부 경사각(θ_H)이 9°이고 (b)는 선수부 경사각이 12°이다. θ_H 의 변화는

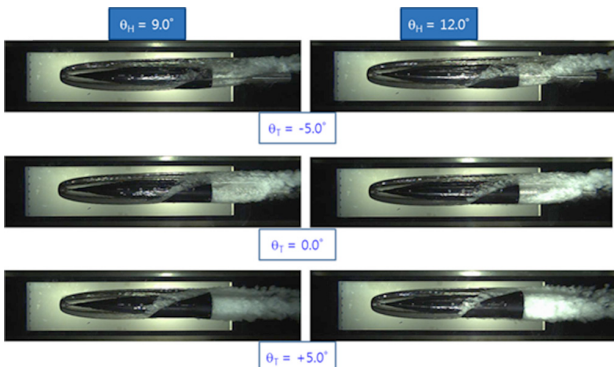


Fig. 16 Supercavity images for $\alpha_B = +0.6^\circ$

h/D_ϕ , α_p 와 양력계수에는 큰 영향을 주지 않았다. $0.2^\circ \leq h/D_\phi \leq 0.8^\circ$ 범위에서는 θ_T 가 -5° 또는 0°일 경우 $15^\circ \leq \alpha_p \leq 25^\circ$ 의 값이 형성되었으며 활주에 의해 발생한 양력계수가 선형적으로 증가하였다. 그러나 θ_T 가 +5°인 경우 θ_T 가 -5°이거나 0°일 때와는 상당히 다른 활주현상 및 활주력 분포를 보이므로 자세 제어 설계 시 주의가 필요함을 알 수 있다.

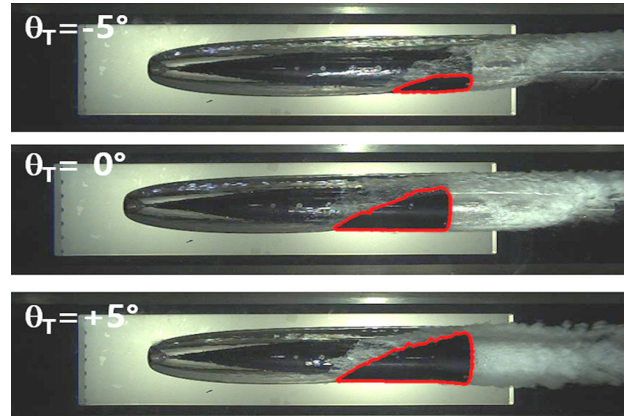


Fig. 17 Immersed area extracted by image processing method at $\alpha_B = 0^\circ$, $\theta_H = 9^\circ$

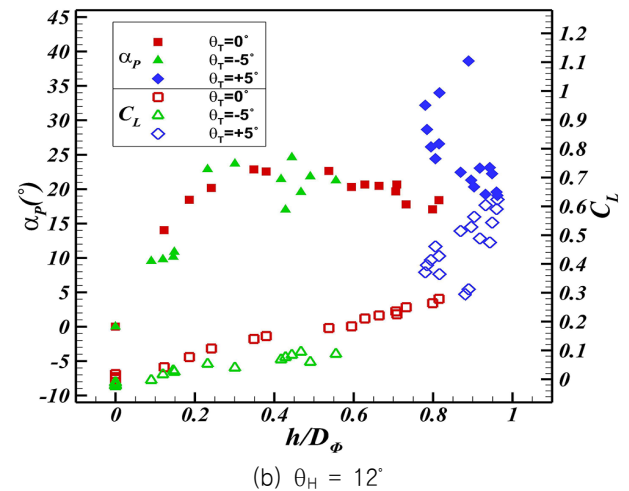
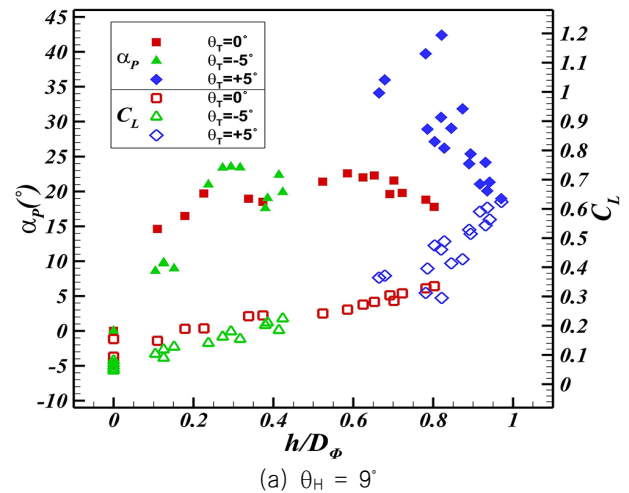


Fig. 18 Lift coefficient and planing angle with the variation of immersion draft ratio

특히 몸체 잠김 비 변화에 활주각의 변화가 일정한 패턴을 보이는 선미부 경사각($\theta_r=0^\circ$)의 선수부 경사각이 서로 다른 2가지 수중체 형상에 대해 몸통 잠김 비의 변화에 따른 피치모멘트 계수(C_M) 계측결과를 Fig. 19에서 보여주고 있다. 피치모멘트 계수에 대한 정의는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_M = \frac{\text{Moment}}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \frac{\pi}{4} D_\phi^3} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, U_0 는 터널 내 유속을 각각 나타낸다. Fig. 19에 나타낸 방향을 선미부 기준으로 표현하면 양의 C_M 은 수중체의 선미부가 위로 들려 올라가는 방향이고 음의 C_M 은 수중체의 선미부가 아래로 기울어 내려가는 방향을 표현하고 있다. 활주에 의해 몸체 잠김 비 h/D_ϕ 가 증가함에 따라 C_M 값도 증가하는 경향을 뚜렷하게 보이며 $\theta_H=9^\circ$ 일 때 12° 보다 피치모멘트가 더 크게 작용하고 h/D_ϕ 증가에 따라 C_M 이 증가하는 기울기는 $\theta_H=12^\circ$ 일 때 더 크게 나타나고 있다.

양상블 평균으로 얻어진 활주각과 잠김 비에 대한 정보로부터 Fig. 20과 같이 몸체의 잠김 부피를 계산하여 부력 (buoyancy, F_z)을 도출하였다. 또한 3분력계로 계측된 Z방향 힘에서 부력과 캐비테이터 유체력을 제외시켜서 도출한, 물에 노출된 몸통 부분에 작용하는 동적 활주력(dynamic planing force, F'_z)의 관계를 Fig. 21에서 보여주고 있다. 부력이 1.5N까지는 부력의 약 10배 정도로 동적 활주력이 나타나지만 부력이 더 증가하여 5N이 되면 부력의 약 4배 정도의 동적 활주력이 나타난다. 이는 활주상태에서 정적인 힘(=부력)보다 더 큰 동적인 힘의 성분이 존재함을 시사하며, 이러한 동적 활주력은 초공동화 수중체의 자세제어를 어렵게 만드는 요소로 작용된다. Fig. 21을 통해 부력과 동적 활주력이 비선형적인 관계를 가짐을 알 수 있다.

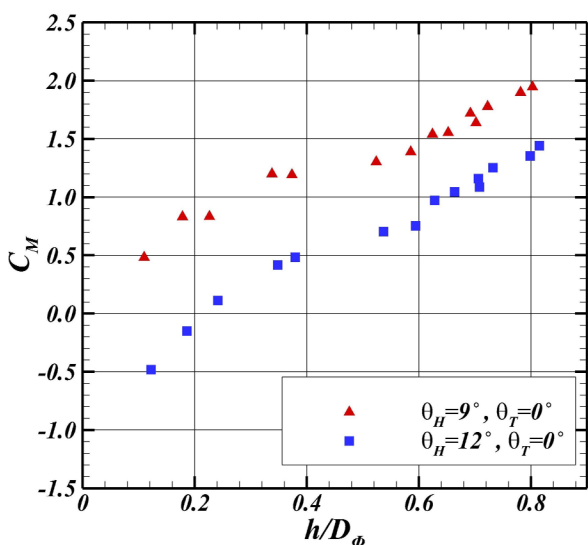


Fig. 19 Moment coefficient with the variation of immersion draft ratio

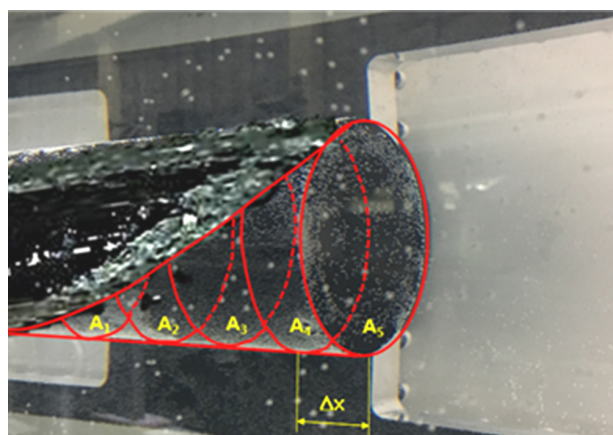


Fig. 20 Calculation of buoyancy for body-immersed volume at planing test

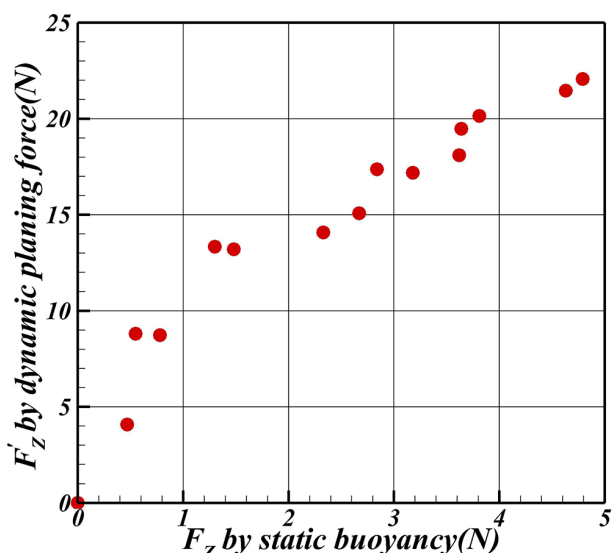


Fig. 21 Calculation of buoyancy for body-immersed volume at $\theta_H=9^\circ$, $\theta_r=0^\circ$

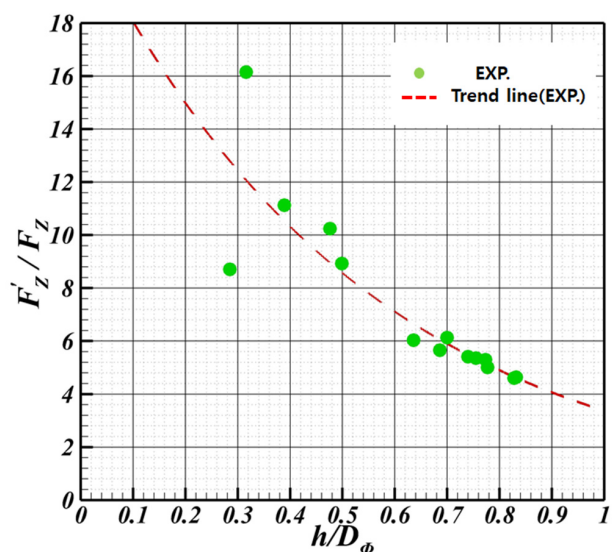


Fig. 22 Planing force ratio with the variation of immersion draft ratio at $\theta_H=9^\circ$, $\theta_r=0^\circ$

활주력 비(planing force ratio, F_z'/F_z)와 h/D_0 의 관계를 Fig. 22와 같이 표현할 경우 로그함수 형태의 추정 식(4)으로 표현할 수 있다.

$$F_z'/F_z = -7.86 \ln(h/D_0) + 3.20 \quad (4)$$

몸체 잠김 비가 커질수록 활주력 비에는 높은 수렴성이 나타남을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 식(4)은 HCT에서 실험한 특정 모델에 대해서 추정하였으므로 다양한 모델의 형상에 대해서도 적용이 가능할 지 추후 연구를 통해 확인해야 된다. 본 연구에서 활주력 비와 잠김 비를 통해 얻은 추정식은 후속 연구인 비구속 1DOF(Degrees Of Freedom)자세 제어 가능성 검토하기 위해 사용할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 초공동화 수중체의 정적 받음각 변화를 고려한 초공동 형상 및 유체력을 계속하였다. 캐비테이터만을 이용한 받음각 실험을 통해 원판형 36mm 캐비테이터에 대한 항력계수 및 양력계수 추정식을 도출하였으며 공동 윤곽을 추출하여 수중체를 설계하였다. 선수부 경사각 9°와 12°, 선미부 경사각 0°와 ±5°를 조합하여 총 6가지 수중체 형상에 대해 실험을 수행하였다. 선수부 경사각의 변화에 따라 수중체에는 유사한 초공동 현상이 발생하였고 특정 몸체 잠김 비(0.2~0.8)에서는 일정한 범위의 활주각 분포가 발생하였다. 또한 공동 밖으로 드러나 물에 잠김 몸통 부분의 부력과 캐비테이터에 작용하는 유체력을 제외시켜서 동적 활주력을 도출하였다. 활주상태가 발생할 경우 부력보다 4배 이상의 동적 활주력이 작용하였다. 활주력 비는 몸체 잠김 비를 변수로 하는 로그함수 형태로 추정할 수 있다. 이 추정식은 후속 연구인 비구속 1DOF 수중체 자세 제어 가능성 검토를 위한 기초자료로 활용될 예정이다.

후 기

본 연구는 민군기술협력사업 UM14113RD1 (PNS3310, 초공동 캐비테이터 설계 및 성능 검증 연구)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Escobar, E., Balas, G. & Arndt, R.E.A., 2014. Planing avoidance control for supercavitation vehicles. *American Control Conference*, Portland, OR, USA, 4-6 June 2014.

Hjartarson, Arnar., 2012. *Experimental study of control laws for supercavitating vehicles*. Ph. D. Thesis, University of Minnesota.

Kawakami, E. & Arndt, R.E.A., 2011. Investigation of the behavior of ventilated supercavities. *Journal of Fluids Engineering*, 133(9), 091305.

Kiceniuk, T., 1954. *An experimental study of the hydrodynamic forces acting on a family of cavity-producing conical bodies of revolution inclined to the flow*. Department of the Navy Contract NOrd 9612, Report No. E-12.17.

Kim, B. J., Choi, J. G. & Kim, H. T., 2015. An experimental study on ventilated supercavitation of the disk cavitator. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp. 236-247.

Kim, H. T., Kang, K. T., Choi, J. K., Jung, Y. R. & Kim, M. J., 2018. A numerical study of effects of body shape on cavity and drag of underwater vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(3), pp. 252-264.

Kochin, V., Moroz, V. Serebryakov, V. & Nechitalio, N., 2015. Hydrodynamics of supercavitating bodies at an angle of attacks under conditions of considerable effect of fluid weightiness and closeness of free border. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 5, pp.255-265.

Paik, B. G., Park, I. R., Kim, K. S., Lee, K. C., Kim, M. J. & Kim, K. Y., 2017. Design of a bubble collecting section in a high speed water tunnel for ventilated supercavitation experiments. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(9), pp.4227-4235.

Paik, B. G., Kim, M. J., Jung Y. R., Lee, S. J., Kim, K. Y. & Ahn, J. W., 2018. Fundamental studies for ventilated supercavitation experiments in new high-speed cavitation tunnel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(4), pp.330-340.

Park, H. J., Kim, J. H. & Ahn, B. K., 2018. Numerical analysis of supercavitation according to shape change of the two-dimensional submerged body. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(1), 1-8.

Park, J., Kim, S. H. & Kim, N., 2016. Studies on planing avoidance control for a ventilated supercavitating vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(3), 201-209.

Sanabria, Escobar David., 2015. *Modeling, robust, control and experimental validation of a supercavitating vehicle*. Ph. D. Thesis, University of Minnesota.

Waid, R. L., 1957a. *Cavity shapes for circular disks at angles of attack*, Department of the Navy Contract NOrd 16200 Task 1, Report No. E-73.4.

Waid, R. L., 1957b. *Forces on cylinders planing on flat and curved surfaces in cavitating and noncavitating flow*. Department of the Navy Contract NOrd 16200 Task 1, Report No. E-73.5.

Weaver, W., 1962. Wind-induced vibration in antenna members. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), pp. 679-702.

Zdravkovich, M. M., 1981. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(2), pp.145-189.

