



Received: 2019/05/16
Revised: 2019/06/05
Accepted: 2019/07/11
Published: 2019/08/29

***Corresponding Author:**

Jun-Hee Lee

Tel: +82-42-866-3489

E-mail: ljh@kriso.re.kr

정적 받음각을 갖는 초공동화 수중체에 대한 실험적 연구

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

이준희^{1*}, 백부근¹, 김경열¹, 김민재², 김선홍², 이승재³

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

²국방과학연구소

³대우조선해양

**Jun-Hee Lee^{1*}, Bu-Geun Paik¹, Kyoung-Youl Kim¹, Min-Jae Kim², Seonhong Kim²,
Seung-Jae Lee³**

¹Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

²Agency for Defense Development

³Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering

Abstract

본 연구에서는 디스크형 캐비테이터에 의해 생성된 초공동형태를 이용하여 수중체의 활주력을 측정하였다. 잠김 흡수비에 비례하여 활주력이 일반적으로 선형으로 증가하였고 활주각은 잠김 흡수비에 비례하지 않는 것으로 나타났다.

In the present study, we investigated planing forces of supercavitated bodies by using the supercavitation shape produced by the disk type cavitator. 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(활주현상),
Ventilated Supercavitation(환기 초공동),
Minimum Cavitation Number(최소공동수),
Submergence Ratio(몸체 잠김 깊이 비),
High-Speed Cavitation Tunnel(고속캐비테이션 터널)

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 방위사업청의
민군기술협력사업 UM14113RD1(PNS3100, 초공동
캐비테이터 설계 및 성능 검증 연구)과제의 지원으로
수행되었으며 이에 감사드립니다.

1. 서론

수중운동체의 초공동(supercavitation)화 기술은 캐비테이터(cavitator)에서 발생하는 공동이 수중운동체 전체를 덮어 유체 마찰저항을 크게 감소 시킴으로써 수중에서 50노트(knot) 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 작업이 바람직하다. 국외에서는 대표적으로 미국 미네소타 대학교의 SAFL(Saint Anthony Falls Laboratory)이 초공동 시험을 다년간 수행하여 초공동 캐비테이터 설계뿐만 아니라 초공동 운동체에 대한 유도제어 기술을 개발하여 초공동 분야에 있어서 앞선 기술을 보유하고 있다[1]. 국내에서도 모형 실험을 이용한 초공동 캐비테이터 설계뿐만 아니라 유도제어를 위한 기초 기술의 개발을 계획하고 있다[2,3]. 초공동 유도제어에 대한 기초 연구를 위해서는 비교적 큰 수중 운동체 모형에 대한 환기형(분사형) 초공동의 형상 변화, 초공동 막힘비에 따른 효과, 초공동 형상에 대한 증력효과 등을 자세히 조사할 필요가 있다. 그러나 국내에는 SAFL과 대등한 규모의 고속 캐비테이션 터널이 없어 다양한 설계 또는 검증 실험을 수행하기 어려웠다. 또한 초공동 실험을 원활하게 수행하기 위해서 터널의 시험부에 설치된 수중체로 고속의 유동이 유입되어야 하고 캐비테이터 후방에서 분사된 공기 기포들이 시험부로 재유입

되는 영향을 최소화해야하므로 적절한 기포 포집부를 필수적으로 구비해야 한다. 선박해양플랜트연구소에서는 기존의 중형 캐비테이션 터널(Medium-sized Cavitation Tunnel, MCT)과는 별도로 초공동 시험용 고속캐비테이션 터널(High-speed Cavitation Tunnel, HCT)을 설계 및 제작하여 비교적 큰 규모의 수증체에 대한 실험을 수행할 수 있게 되었다. 시험부의 제원은 0.3H × 0.3W × 3.0L m³이며 시험부에서의 최고 유속은 SAFL 터널과 유사한 20m/s로 설계되었다. 초공동 실험을 위해 신조된 HCT의 주요성능을 타기관의 고속캐비테이션 터널과 비교하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Comparison of HCT with other high-speed cavitation tunnel

Tunnel (country)	Tunnel dimension (L × H m ²)	Test section (B × H × L m ³)	Max. speed (m/s)	Bubble collection
HCT (Korea)	16.5 × 9.5	0.3 × 0.3 × 3.0	20.4	Enough
SAFL (USA)	10.2 × 4.4	0.19 × 0.19 × 1.0	20	Enough
ARL (USA)	12.0 × 10.0	0.3 (dia.) × 0.8	21	Not enough
SSPA (Sweden)	2.5 (L)	1.0 (dia.)	23	Not enough
CNUCT (Korea)	7.5 × 4.5	0.1 × 0.1	20	Enough

환기 초공동 실험을 위해서는 고속 유동의 실현뿐만 아니라 기포들을 효율적으로 포집하는 것이 매우 중요하므로 기포 포집부의 설계와 검증 작업이 필요하다. 본 연구에서는 실제 공기 포집부의 공기 제거 성능을 확인하기 위하여 시험부에서 공기 기포들을 가시화하여 검토하였다. 또한 제작된 고속터널에서 이루어진 환기 초공동 시험 결과의 신뢰성을 얻기 위하여 초공동 검증 시험을 수행하였다. 환기 공동수와 공기유량계수를 이용하여 공동의 생성부터 소멸까지 관찰하였고 국외 유사 실험결과와 비교 검증하였다. 또 공동 형상 및 캐비테이터 항력 계측 결과들을 이용하여 잘 알려진 경험식 결과와 비교하였다[4].

2. 고속캐비테이션 터널 작동 시운전

Fig. 1과 같이 최종 제작된 HCT의 시험부 길이는 3m, 단면적 크기는 0.3 × 0.3 m²이다. 실제 HCT 시험부에서 형성된 유체 유동의 균일도와 난류강도 값을 살펴보기 위하여 1차원 레이저 유속계를 사용하여 시험부에서 터널 유속을 계측하였다. 유속을 계측한 곳은 시험부 길이 방향으로 2곳이며

각 위치에서 경계층을 제외한 200(높이) × 200(폭)mm²의 단면에 대해 조사하였다. 유속 계측은 HCT의 주모터 rpm을 변화시켜 주유동 방향과 수직 방향에 대해서 레이저 유속계를 이용하여 계측하였고 그 결과를 Table 2에 표시하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 유동의 균일도는 1% 내외이며 난류강도는 0.4% 내외임을 확인하였다.

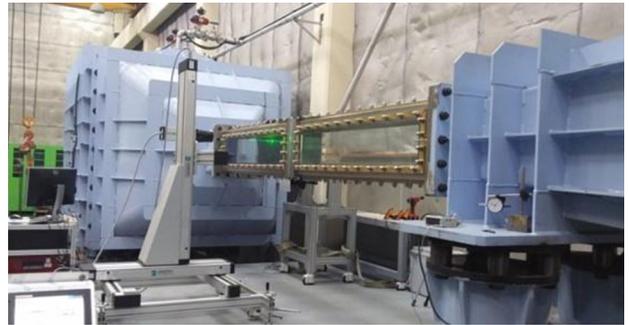


Fig. 1. High-speed cavitation tunnel (HCT) in KRISO

Table 2. Flow velocity measurements in uniform flow region (200 × 200 mm²) [5]

	1st window	2nd window
Mean (m/s)	15.01	15.20
Uniformity (%)	99.6	98.6
Turbulence intensity (%)	0.38	0.42

원하는 공기 유량을 시험부 내로 유입할 수 있는 공기 유량제어 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 300l/min까지 ±2% 이내에서 공기 유량을 일정하게 제어할 수 있는 공기 유량제어 시스템을 Fig. 2와 같이 제작하여 사용하였다. 공기 유량제어 시스템은 공기의 압력을 일정하게 유지하는 압력탱크와 레귤레이터(regulator), 유량제어밸브 및 on-off 밸브로 구성되어 있다. 압력탱크는 최대 9bar까지 압력을 유지할 수 있다[4].

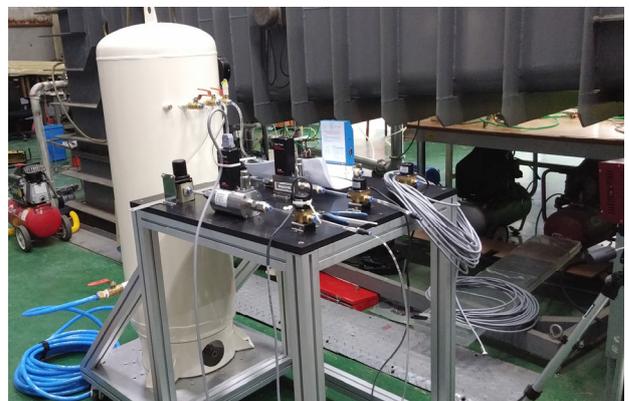


Fig. 2. Air flow-rate control system for air injection

3. 캐비테이터 받음각 시험

캐비테이터에 대한 받음각 변화 실험을 수행하기 위해 캐비테이터 받음각 조절장치는 톱니바퀴 방식으로 설계하였으며 톱니 1개 당 5도 회전 가능하다. 캐비테이터 받음각 조절장치는 캐비테이터 및 샤프트(shaft)에서 쉽게 탈착이 가능하다. 캐비테이터 받음각 조절장치의 전체 길이는 20mm이었다. 받음각 조절 장치를 이용하면 캐비테이터를 상하(pitch) 방향으로 조절 가능하다. 캐비테이터의 상하방향 조절 시 캐비테이터에 미치는 힘은 3가지 형태로 나타나며 Fig. 3에 힘의 좌표계를 표시하였다. 캐비테이터에 작용되는 힘의 좌표계는 Fig. 3과 같이 주유동 방향은 X 방향, 높이 방향은 Z 방향, 시험부의 오른쪽(우현, starboard) 방향은 Y 방향으로 정의하였다. 이 때 캐비테이터의 받음각은 Y 방향을 축으로 하여 회전하게 된다. 캐비테이터에 발생하는 힘은 X방향의 항력, 높이 방향(Z)의 양력, Y축을 중심으로 회전하는(pitching) 모멘트(moment) 등 3가지 힘 성분이 나타난다. 따라서 캐비테이터 후방의 샤프트 내에 3분력계를 설치하여 캐비테이터에 나타나는 3가지 힘 성분을 계측하고자 한다.

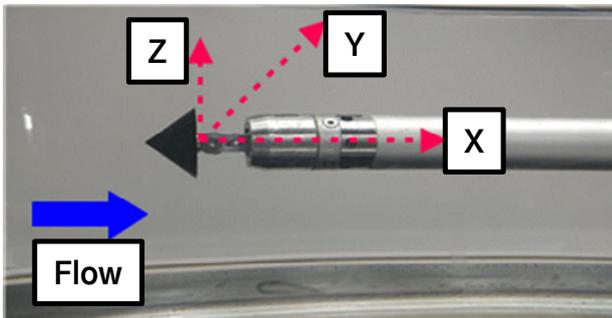


Fig. 3. Cavitator control device and coordinate of forces

분력계를 경계로 내·외부의 압력 평형을 얻을 수 있도록 beam 방식[5]의 3분력계를 Fig. 4에서와 같이 캐비테이터 직후방에 설치하였다. 이 3분력계의 힘 측정범위는 $F_x = 100N$, $F_z = 70N$, $M_y = 5Nm$ 에 대한 정확성을 가진다.

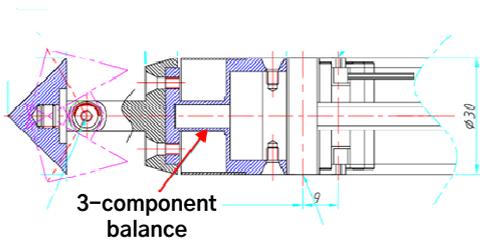


Fig. 4. 3-component balance for force measurements

디스크 캐비테이터에 대한 회전에 대한 정의는 Fig. 3에서 Y축으로 회전을 하며 캐비테이터의 forward facing면(유동 박리면)의 normal vector가 +Y 방향이며 + 받음각, -Y 방향이면 - 받음각으로 정의한다. 주어진 캐비테이터에 대해 받음각 회전 범위를 $-30^\circ, -20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 로 선정하여 받음각 시험을 수행하였다. Fig. 6은 받음각(angle of attack, AOA) 변화시 환기 초공동수 σ_c 에 대한 공기 유량계수 C_q 의 이력곡선을 나타낸다. 받음각의 크기를 크게 할수록 최소공동수 σ_{min} 이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 받음각의 크기가 커질수록 공동의 직경이 작아져 막힘비(blockage) 효과가 낮아지므로 최소공동수가 감소하게 되는데 이는 원추형 캐비테이터에 대한 환기 초공동 실험의 경향과 유사하다. 또한 양의 받음각에서는 환기 초공동 실험에서 일반적으로 나타나는 이력현상(hysteresis)이 발생하지만 음의 받음각에서는 이러한 이력현상이 대폭 감소하거나 사라지는 현상을 발견하였다.

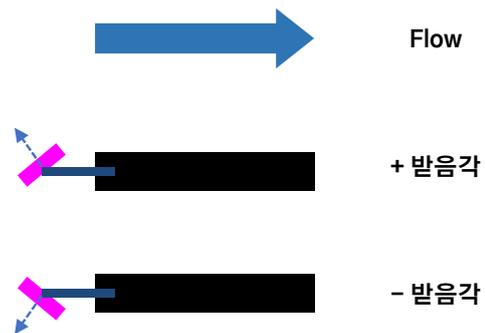


Fig. 5. Definition of angle of attack

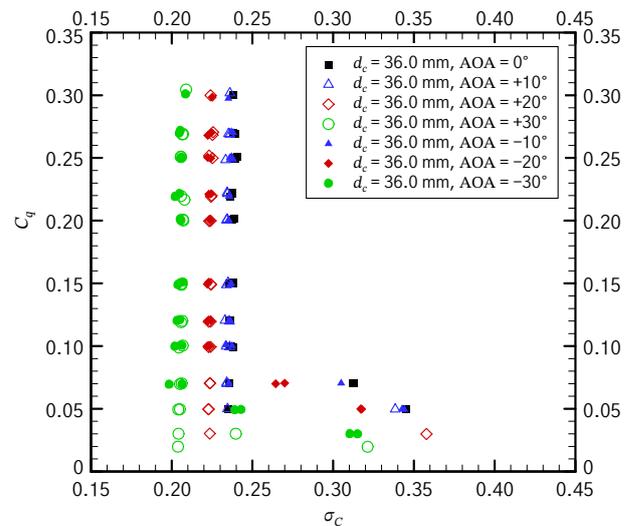


Fig. 6. C_q - σ_c hysteresis curve obtained from the angle of attack test

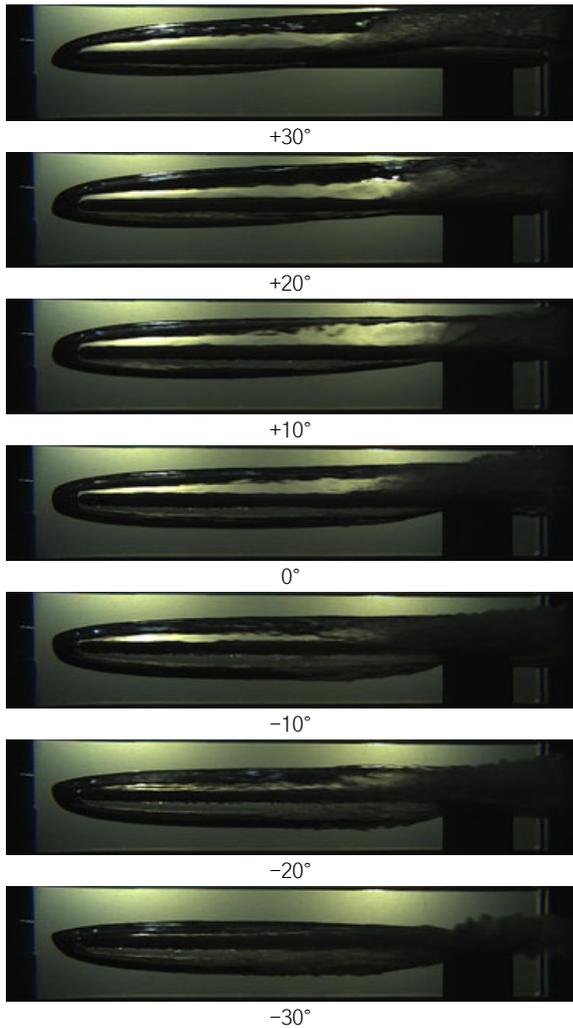


Fig. 7. Supercavitated images with the variation of cavitation angle of attack

Fig. 7은 초공동 형성 유무에 따라 각 받음각에서 획득한 초공동 영상을 나타내었다. 위의 초공동 결과영상에서 보는 바와 같이 양의 받음각에서는 캐비테이터의 위쪽 edge가 하류에 위치함에 따라 이로부터 박리되는 유동이 빠르게 공동 형상을 만들면서 공동 꼬리가 위로 상승하는 중력효과가 명확히 나타나고 있다. 그러나 음의 받음각에서는 캐비테이터의 아래쪽 edge가 하류에 위치하면서 박리되는 유동이 공동 형상을 만들기 때문에 양의 받음각에 비해서 중력효과가 작게 나타나고 있다. 즉, 음의 받음각에서는 수평으로 나란한 공동 형상이 주로 발생하고 있다.

Fig. 8은 캐비테이터의 받음각에 따른 항력계수를 나타내고 있다. 받음각 0°를 기준으로 ±30°, ±20°, ±10°의 항력계수는 각각 약 1.8%, 1.3%, 0.5% 내외의 차이를 보이고 대칭성 또한 잘 보여주어 실험장치가 시험부 정중앙에 잘 설치되었다고 볼 수 있다. 캐비테이터 받음각 변화에 따른 항력

계수 C_D 는 식 (1)과 같이 2차 다항식으로 추정할 수 있다. 여기서, x 는 캐비테이터의 받음각을 말한다.

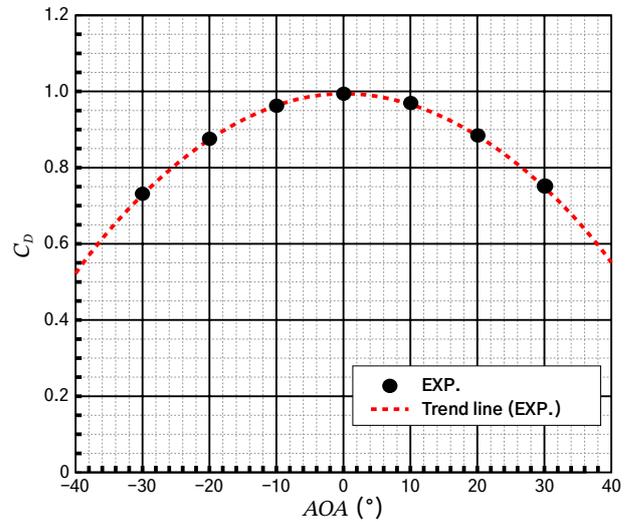


Fig. 8. The drag coefficient for the angle of attack of the cavitator

$$C_D = -0.0003x^2 + 0.0003x + 0.9942 \quad (1)$$

$$x = AOA$$

4. 초공동화 수중체 몸체 받음각 시험

수중체 받음각 실험을 수행하기 위해 Fig. 9에 같이 캐비테이터의 공동운곽안에 수중체가 위치하여야 하므로 그림 자기법을 통해 공동운곽을 추출하였으며 공동안에 포함되는 초공동화 수중체를 설계하였다. planing 힘과 모멘트를 계측하기 위해서 수중체 내에 3분력계를 설치하였다. 제작 설치된 3분력계의 성능을 검증하기 위해서 몸체 받음각이 0도인 상태에서 속도변화에 따라 항력 계수 C_D 를 계측하였는데 캐비테이터의 받음각에 변화에 따른 항력계수 실험 결과($C_D = 0.99$)와 유사하였다. 0° 이외의 캐비테이터 받음각에 의해 얻어지는 항력계수는 식 (1)을 이용하여 산출하게 된다.

수중체 받음각은 HCT 시험부의 크기를 고려하여 $-0.6^\circ \leq \alpha_B \leq 1.0^\circ$ 까지 0.1도 간격으로 변화를 주었다. Fig. 10은 몸체 받음각(α_B)이 0.6°일 때의 수중체 몸체 형상변화에 따른 초공동 형상을 보여주고 있으며 planing 힘에 영향을 주는 α_p 와 h 값을 얻기 위해서는 수중체 몸체에 대한 공동 형상을 구분하여 추출해야 하며 초공동 윤곽들을 추출할 수 있는 그림자기법[5]과 선미부 형상이 변화하거나 미세한 planing이 발생한 상태에 대해서도 planing을 캐치할 수 있도록 광원

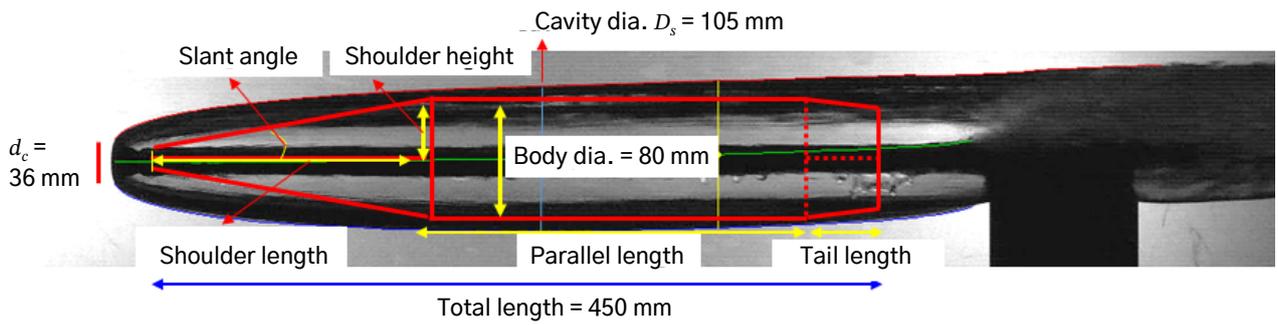


Fig. 9. Cavitated shape and design supercavitated body without supercavitation body

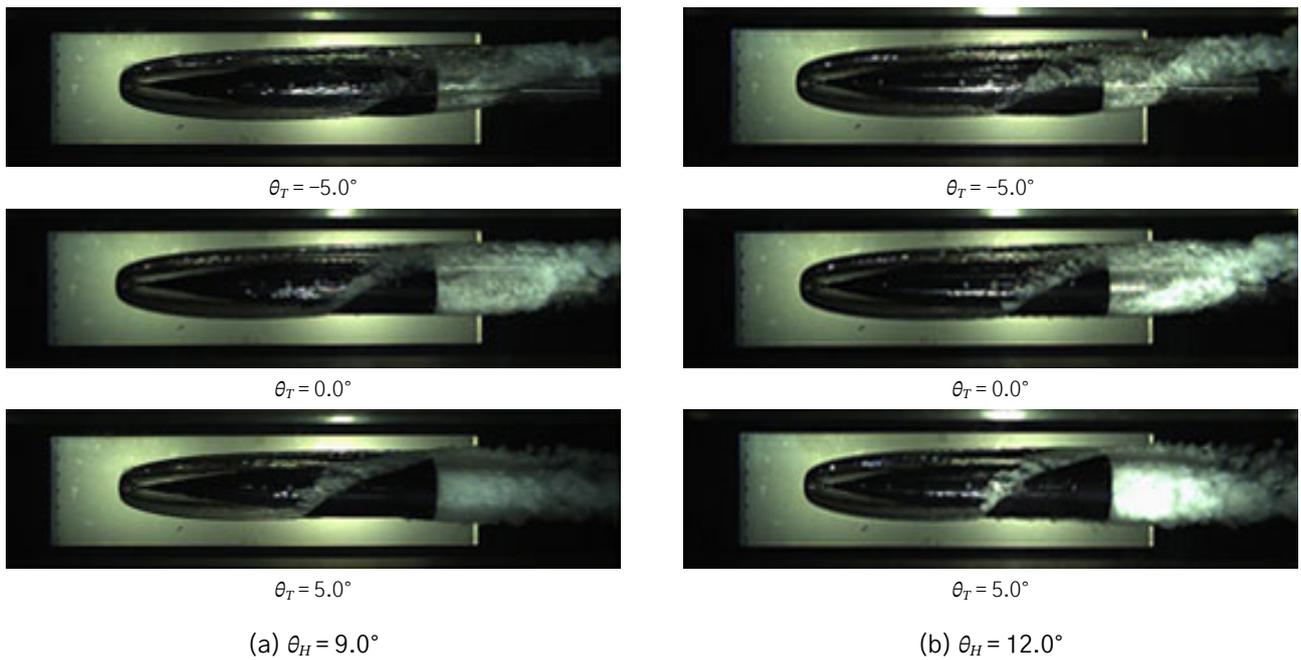


Fig. 10. Supercavity shape for $\alpha_B = +0.6^\circ$

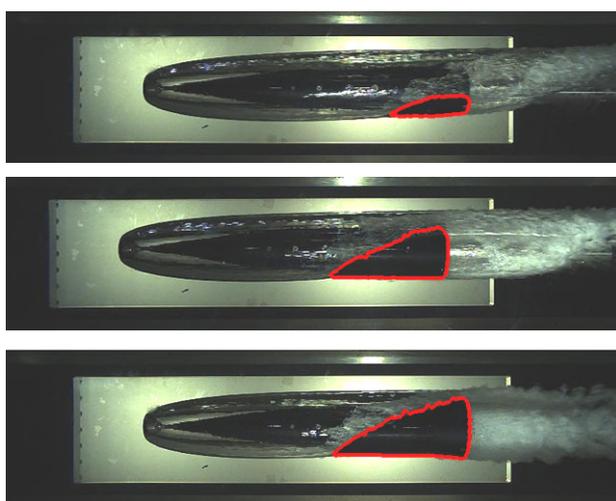


Fig. 11. Planing area extracted by image processing method

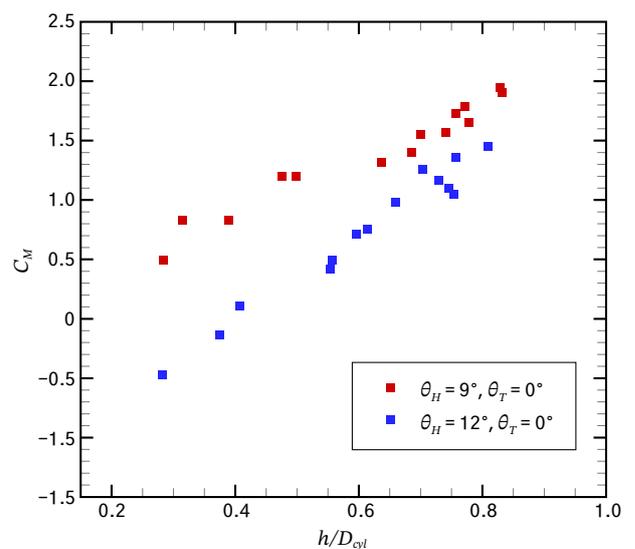


Fig. 12. Moment coefficient with the variation of submergence ratio

을 추가적으로 고속카메라 옆에 배치하였으며 배경 영상을 이용하여 불필요한 부분에 대한 영상을 제거한 뒤 추출된 영상으로 planing 영역에 대한 정보를 획득하였다. Fig. 11에 보는 바와 같이 planing 크기와 선미부의 형태에 따라 추출된 planing 윤곽이 잘 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 때 사용된 고속카메라(MINI AX50, Photron)는 896×208 의 픽셀(pixel) 분해능을 가지며 24bit의 컬러 영상을 촬영하였고 카메라의 공간 분해능은 1.0pixel/mm이다. 고정된 몸체 받음각에서도 비정상적으로 planing이 발생하며 고속카메라를 통해 500장의 영상을 ensemble 평균을 통해 α_P 와 h 를 추출하였다. 몸체 잠김 깊이 비(submergence ratio, h/D_{cyl}) 증가에 따라 pitching 모멘트를 Fig. 12에서 보여준다. 여기서 D_{cyl} 는 수중체의 직경으로 80mm이다. Pitching 모멘트는 선수부 각도 9° 에서 더 높게 나타나고 있지만 몸체 잠김 깊이 비에 따른 모멘트의 증가비율은 12° 가 크다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 환기형 초공동 실험을 위해 선박해양플랜트연구소 내에 신조된 고속 캐비테이션 터널에 대해서 소개하였으며 신뢰성 있는 초공동 실험을 위해 수행된 기초 실험들에 대하여 기술하였다. 그리고 캐비테이터 받음각에 따라 유체력을 계측하였으며 캐비테이터의 받음각을 매개 변수로 하는 항력계수의 추정식을 도출하였다. 또한 초공동화 수중체의 정적 받음각 변화를 고려한 초공동 형상 및

유체력을 계측하였다. 수중체의 planing이 나타날 때의 초공동 형상을 관찰하였고 planing이 몸체에 미치는 항력, 양력, pitching 모멘트 등을 계측하였다. 선수부 경사각이 9° 와 12° 일 때 수중체에 유사한 초공동 현상이 발생하였다. 선수부 각도 9° 가 12° 에 비해 pitching 모멘트가 크게 작용하는 것을 확인할 수 있으나 증가비율에서는 선수부 각도 12° 가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 자료들은 수중운동체의 자세 제어에 중요한 기초자료로 활용된다.

참고문헌

- [1] Kawakami, E. and Arndt, R.E.A., "Investigation of the behavior of ventilated supercavities", *Journal of Fluids Engineering*, 2011, 133 (9). 091305.
- [2] Park, J., Kim, S. H. and Kim, N., "Studies on planing avoidance control for a ventilated supercavitating vehicle", *J. of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(3), 2016, 201-209.
- [3] Kim, H. T., Kang, K. T., Choi, J. K., Jung, Y. R. and Kim, M. J., "A numerical study of effects of body shape on cavity and drag of underwater vehicle", *J. of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(3), 2018, pp. 252-264.
- [4] Paik, B. G., Park, I. R., Kim, K. S., Lee, K. C., Kim, M. J. and Kim, K. Y., "Design of a bubble collecting section in a high speed water tunnel for ventilated supercavitation experiments", *J. Mechanical Science and Technology*, 2017, 31 (9), 4227-4235.
- [5] Paik, B. G., Kim, M. J., Jung Y. R., Lee, S. J., Kim, K. Y. and Ahn, J. W., "Fundamental Studies for Ventilating Supercavitation Experiments in New High-speed Cavitation Tunnel", *J. of the Society of Naval Architects of Korea*, 2018, 55(4), pp. 330-340.