

축대칭 캐비테이터에서 발생하는 자연 초월공동과 항력 특성에 대한 연구

김지혜¹·정소원¹·안병권^{1†}·전윤호²
충남대학교 선박해양공학과¹
LIG 넥스원(주) 기계연구센터²

A Study on Natural Supercavitation and Drag Characteristics of Axisymmetric Cavitators

Ji-Hye Kim¹·So-Won Jeong¹·Byoung-Kwon Ahn^{1†}·Yun-Ho Jeon²
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1 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.

A study was carried out to investigate typical features of natural supercavitation generated behind axisymmetric bodies such as disk and cone shaped cavitators. Main focuses of the study were to observe formation process of the supercavity and to measure drag forces acting on cavitators. Experiments were carried out at the cavitation tunnel of the Chungnam National University (CNU-CT), which has a capability to make sufficient flow speed for supercavitation experiments and to remove broken cavity bubbles coming back to the test section. Blockage effects on supercavity dimensions were evaluated and an effort was made to correlate tunnel experiments with unbounded flow. On the basis of experimental and numerical results, geometrical features of supercavities and characteristics of drag forces were examined and their relations were proposed.

Keywords : Cavitator(캐비테이터), Cavitation(공동), Natural Supercavitation(자연 초월공동), Cavitation Tunnel(캐비테이션 터널), Drag(항력)

1. 서론

수중에서 이동하는 운동체의 속도가 빨라지면 운동체 주위의 국부압력이 유체의 증기압(vapor pressure)보다 낮아지고, 이로 인해 그 주변 유체가 기화되는 공동(cavitation, 캐비테이션) 현상이 발생한다. 여기서 운동체의 이동 속도가 더욱 증가하여 공동이 물체의 형상을 덮을 만큼 성장하게 되면 이를 자연적으로 발생한 초월공동, 즉 자연 초월공동(natural supercavitation)이라 한다. 수중 운동체가 초월공동으로 둘러싸임에 따라 몸체는 물과의 직접적인 접촉으로 인한 마찰저항의 영향을 받지 않게 되고 전체 항력이 극적으로 감소함에 따라 운동체는 고속 운동이 가능하게 된다. 이러한 초월공동을 이용한 수중 운동체의 고속화 기술에 대한 개념은 2차 세계대전 직후인 1940년대 말부터 정립되기 시작하였으며, 1950년대에 걸쳐 기초적인 연구가 수행되었다. Self and Ripken (1955)은 자유 낙하하는 수류 터널(free-jet

water tunnel) 실험을 통해 축대칭 물체에서 발생하는 초월공동의 발생 과정을 관측하였고, Waid (1957)는 2차원 캐비테이터에서 발생하는 부분공동과 초월공동의 형상을 계속하였다. 또한 Tulin (1953), Wu (1955), Garabedian (1956) 등은 초월공동 특성에 관한 이론해석 방법들을 제시한 바 있다.

그 후 초월공동 기술이 어뢰와 같은 군사적인 목적으로 개발되기 시작하면서 이와 관련된 연구 결과들이 제한적으로 공개되어 왔다 (Serebryakov, 1972). 러시아는 1990년대 후반에 Shkval이라는 초월공동 어뢰를 개발하여 실전에 배치한 것으로 알려져 있다. Shkval의 속도는 최소 200 knots 이상으로 현재 운용되고 있는 어뢰의 약 5배 이상의 속도이다. 때문에 초월공동을 이용한 수중운동체는 기술 경쟁 국가들 사이에서 차세대 전장 환경을 변화시킬 미래 무기기술로 인식되고 있다. 또한 상대적으로 저속인 주행 단계에서도 캐비테이터 후방에서 압축가스를 분사 시킴으로써 초월공동을 생성시키는 인공 초월공동(artificial super-cavitation) 기술은 기존의 기술들과 함께 최근 들어 활발

한 연구가 수행되고 있다. 국내에서는 2009년부터 본격적으로 기초연구가 수행되기 시작했으며, Ahn, et al. (2012)과 Kim, et al. (2013)은 캐비테이터 설계에 중점을 둔 실험 및 수치해석법을 개발한 바 있다.

초월공동 수중 운동체를 구성하는 주요 요소 중 하나는 운동체의 전면에 위치하여 공동을 생성시키고 이를 초월공동으로 성장시키는 역할을 하는 캐비테이터(cavitator)이다. 캐비테이터는 크게 원판형(disk type)과 원뿔형(cone type)으로 구분되며, 각각의 형상에 따라 공동의 기하학적 크기와 항력 특성이 달라진다. 초월공동이 발생된 이후에는 대부분의 항력이 캐비테이터에 작용하기 때문에 캐비테이터의 형상설계는 초월공동 수중 운동체의 핵심 요소기술이라 할 수 있다. 본 연구에서는 원판과 원뿔형 축대칭 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 발생 과정과 캐비테이터에 작용하는 항력 특성에 대한 연구를 목적으로, 충남대학교 캐비테이션 터널에서 모형실험을 수행하였으며, 기 개발한 수치해석법을 이용한 계산 결과와 실험결과를 비교하여 검증하고, 유용한 관계식을 도출하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 모형

모형실험은 충남대학교 캐비테이션 터널(CNU-CT)에서 수행되었다. 시험부의 단면은 100 mm x 100 mm(가로x세로), 관측부의 길이는 1400 mm이며 터널의 최고 유속은 20 m/s이다. 또한 가압 및 감압 장치를 통해 터널 내부의 압력은 최소 10 kPa에서 최대 300 kPa까지 조절 가능하다(Fig. 1). 캐비테이션 터널 실험에 있어 낮은 캐비테이션수 조건에서 발생하는 초월공동을 구현하기 위해서는 높은 유속에서의 터널 운용이 가능해야 하며, 고속에서 발생된 공동이 시험부로 다시 돌아오지 않도록 해야 한다. 하지만 선박용 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션 연구를 목적으로 하는 일반적인 캐비테이션 터널의 경우 12 m/s이상의 유속에서 모형시험이 쉽지 않고, 또한 고속 시험 시 시험부로 다시 유입되는 공동의 양이 매우 많아 그 영향을 제거해 주기가 어려운 실정이다. 이러한 이유 때문에 캐비테이션 터널에서 자연 초월공동 실험을 성공적으로 수행한 경우는 흔치 않으며 국내 캐비테이션 터널에서도 수행된 바가 없었다. 충남대학교 캐비테이션 터널은 이러한 고속 유동 조건에서의 초월공동 실험이 가능하며, 시험부에서 발생한 공동이 필터탱크(F/T)와 디퓨저(diffuser) 형상의 저속 구간을 거치면서 액화되어 시험부로 다시 유입되지 않도록 하는 기능을 갖추고 있다.

앞서 언급하였듯이 캐비테이터는 공동을 생성시키고 이를 초월공동으로 성장시키는 역할을 한다. 본 실험을 통해 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 기하학적 특성인 공동의 길이와 폭을 관측하고 캐비테이터에 작용하는 하중을 계측하고자 하였다. 실험 모형은 직경이 15 mm와 20 mm인 원판형과 원뿔형(90°) 캐비테이터를 대상으로 하였으며, 캐비테이터 후방에는 직경 15 mm와 길이 100 mm로 구성된 몸체가 위치하고 있다. 공동이 생

성되어 초월공동으로 성장하는 과정에서 캐비테이터에 작용하는 항력만을 계측하기 위해 캐비테이터는 다이어프램(diaphragm)형 1축력계와 연결되어있으며, 이는 탈부착이 가능하도록 설계하였다(Fig. 2). Fig. 3은 직경 15 mm인 원판형 캐비테이터가 부착된 모형이 시험부에 설치된 모습을 보여준다.

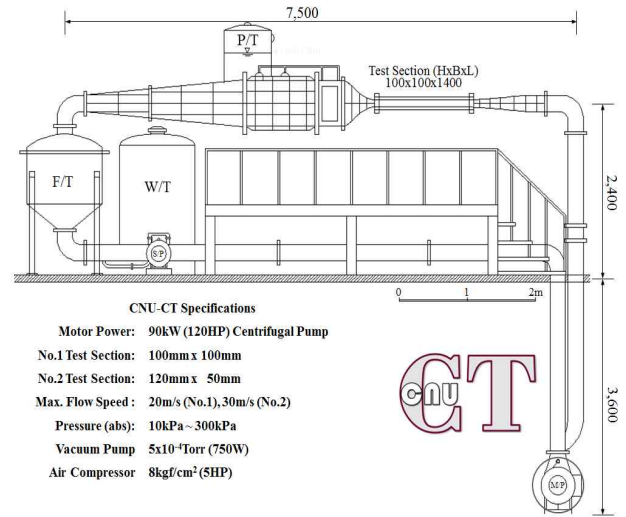


Fig. 1 CNU cavitation tunnel (CNU-CT)

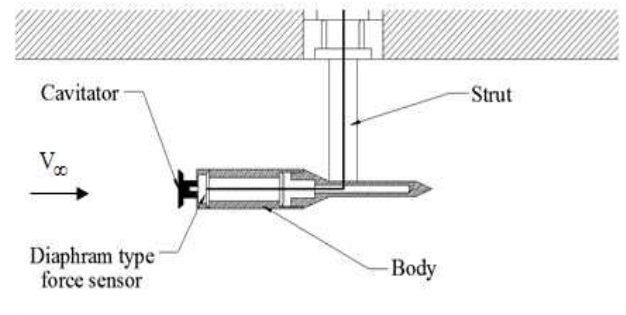


Fig. 2 Schematic view of the test model



(a) Side view



(b) Top view

Fig. 3 Experimental set-up

3. 실험 및 수치해석 결과 비교

공동의 발생정도는 아래와 같이 정의되는 캐비테이션수(σ_n)에 따라 평가하였다.

$$\sigma_n = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (1)$$

여기서 P_∞ 는 주위압력, P_v 는 유체의 증기압력, ρ 는 물의 밀도를 V_∞ 는 유입 유속이다. 캐비테이션터널에서 이루어지는 초월공동 실험의 경우 생성되는 공동의 크기에 따라 폐색효과(blockage effect)가 나타나며, 그에 따라 구현 가능한 최소 캐비테이션수(σ_m)가 결정된다. Fig. 4와 같이 터널 시험부에 대한 제한체적(control volume)을 고려하면, 연속방정식과 비점성 유동의 운동량방정식(베르누이 방정식)은 식 (2), (3)과 같이 표현된다.

$$V_\infty A = V_c (A - A_s) \quad (2)$$

$$\frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} = \left(\frac{V_c}{V_\infty}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

여기서 A 와 A_s 는 터널의 시험부와 공동의 최대 횡단면적을 나타내며 이를 터널의 직경(D , 사각형 터널의 경우 원형으로 환산한 값)과 공동의 최대 직경(D_s)의 관계식으로 표현하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 정리된다.

$$\sqrt{\sigma_m + 1} = \left(\frac{V_c}{V_\infty}\right) = \frac{1}{1 - (D_s/D)^2} \quad (4)$$

즉, 최소 캐비테이션수는 공동의 최대 두께와 터널 직경의 비(D_s/D)에 따라 결정됨을 알 수 있다.

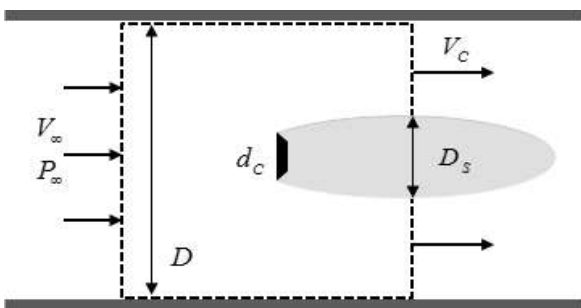


Fig. 4 Description of the blockage effect

캐비테이터에서 발생하는 공동의 두께는 캐비테이터의 크기에 종속적이며, 결국 최소 캐비테이션수는 터널의 직경(D)과 캐비

테이터의 직경(d_c)과의 비로 정의되는 폐색률(blockage ratio, D/d_c)에 따라 결정된다고 할 수 있다.

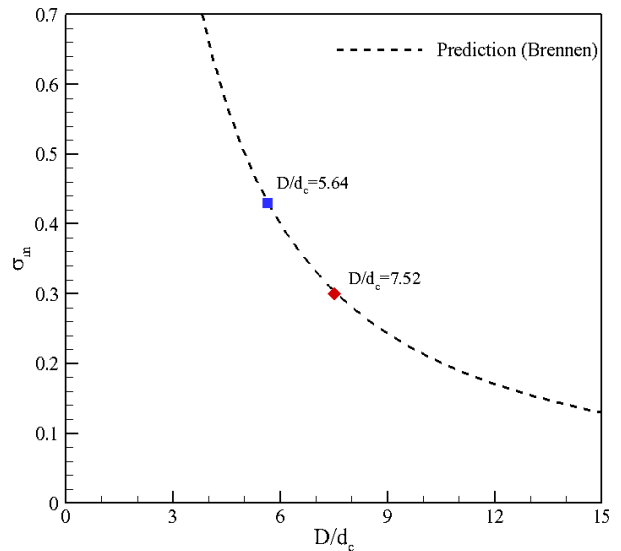


Fig. 5 Prediction of the minimum cavitation number corresponding to the blockage ratio

Brennen (1969)은 비점성 해석법에 기초하여 D/d_c 에 따른 최소 캐비테이션수(σ_m)를 계산할 수 있음을 보였으며, 그 결과를 본 실험에 사용된 모형의 폐색률과 함께 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. Fig. 6은 직경 15 mm와 20 mm의 원판형 캐비테이터에 대해 충남대학교 캐비테이션터널에서 나타나는 최소 캐비테이션수를 예측한 결과이다. 여기서 동압(dynamic pressure)에 대한 차압(pressure difference)의 비는 캐비테이션수를 나타내며, 예측된 결과는 Fig. 5에 나타난 최소 캐비테이션수의 예측 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

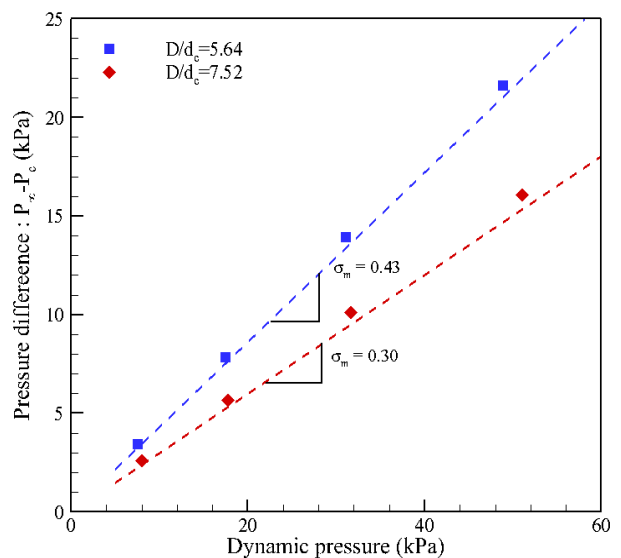


Fig. 6 Measured minimum cavitation number: dynamic pressure v.s. pressure difference

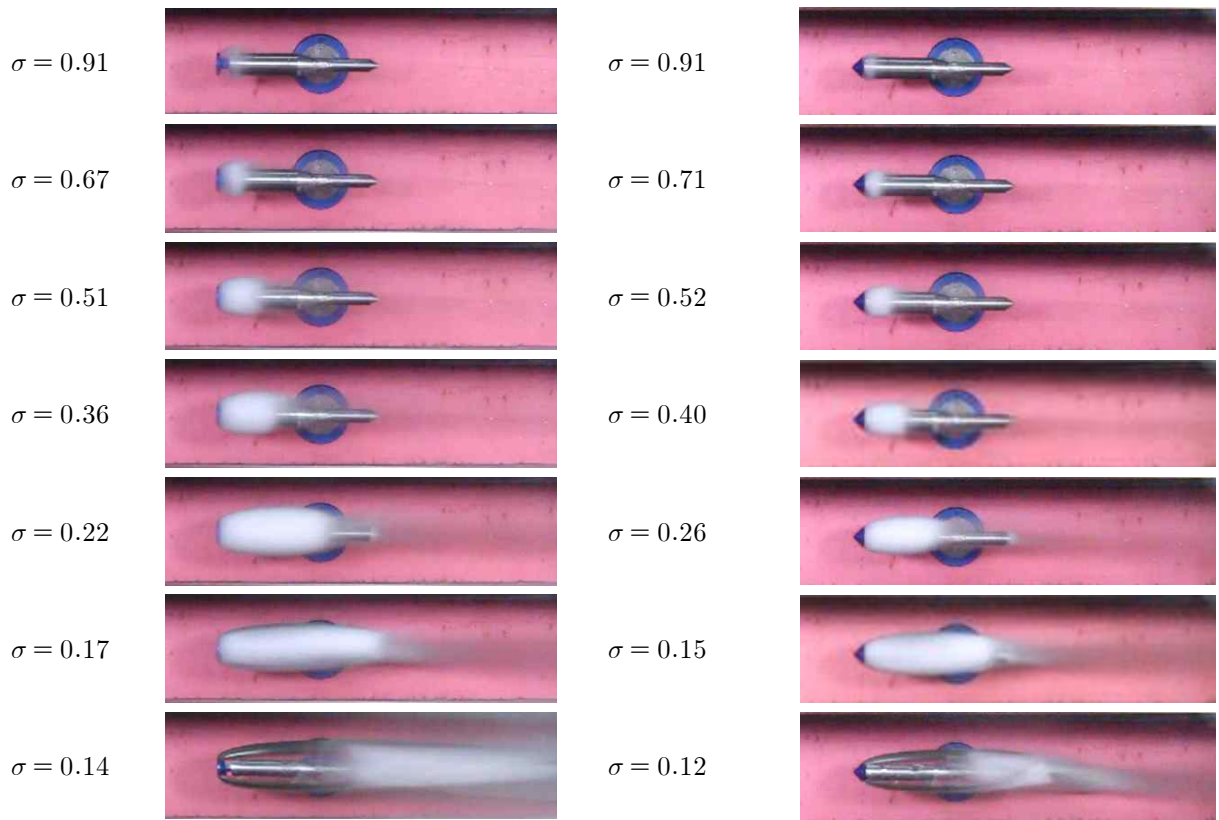


Fig. 7 Formation of the supercavity on disk (left) and cone (right) type cavitators: $d_c=15$ mm

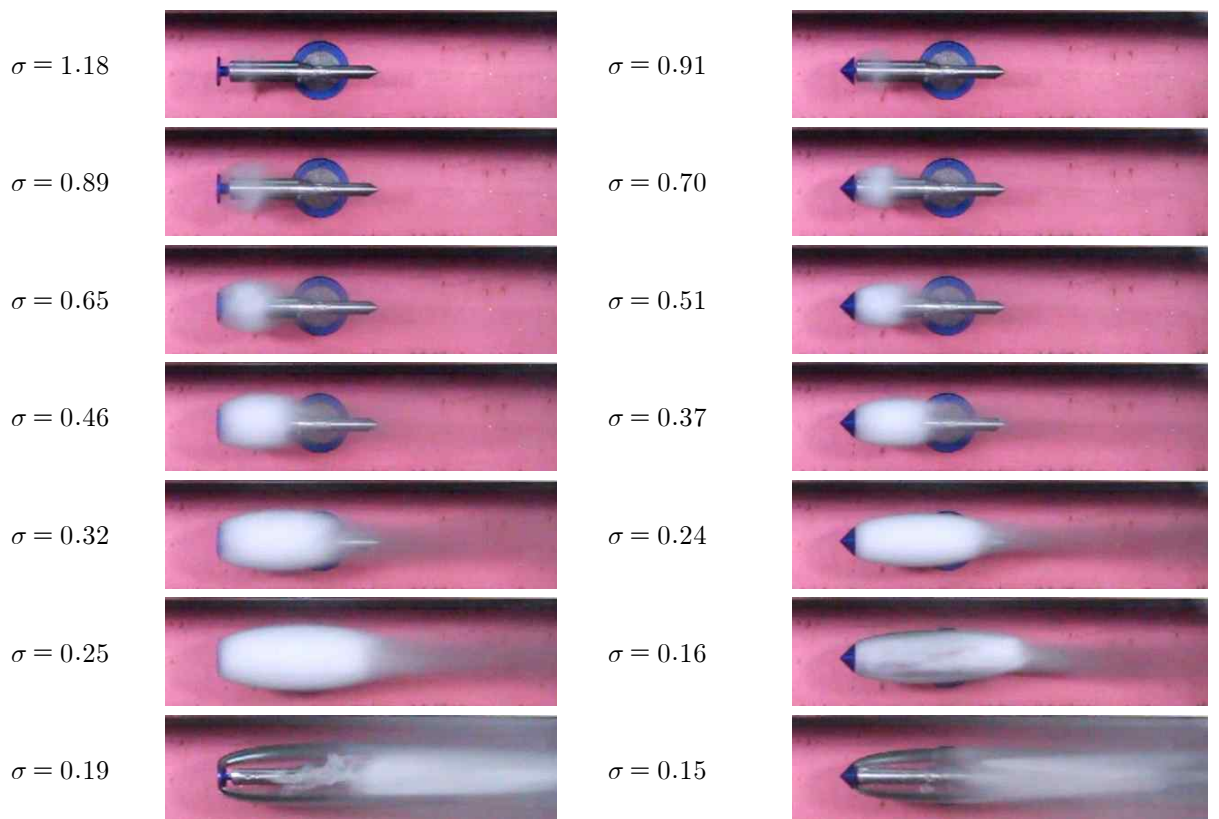


Fig. 8 Formation of the supercavity on disk (left) and cone (right) type cavitators: $d_c=20$ mm

실제 초월공동은 폐색효과가 없는 상태에서 발생하기 때문에 터널에서의 실험결과는 폐색효과를 고려하여 무한영역으로 확장할 수 있어야 한다. Karlikov and Sholomovich (1966)는 축대칭 유동에 대한 이론해석을 통해 무한영역에서의 등가 캐비테이션 수(σ)를 아래와 같이 제시하였으며, 본 실험에서 계측된 캐비테이션수는 식 (5)에 따라 무한영역으로 확장하여 표시하였다.

$$\sigma = \frac{\sigma_n^2 - \frac{1}{2}\sigma_m^2}{\sigma_n^2} \quad (5)$$

Fig. 7과 8은 실험을 통해 관측된 직경 15 mm와 20 mm인 원판과 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 발생 과정을 보여준다. 캐비테이션수가 낮아짐에 따라 캐비테이터 끝단에서 생성된 공동이 재돌입하는 후류의 영향으로 액체와 기체가 혼합된 포말상태를 유지하며 성장하는 것을 볼 수 있다. 그 후 캐비테이션수가 더욱 낮아지면 포말상태의 공동은 완전한 기체 상태의 초월공동으로 성장하는 것을 확인할 수 있다. 공동은 캐비테이터 끝단에서 발생하여 유선을 따라 형성되기 때문에 동일한 캐비테이션수 조건에서 원판형 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 형상은 원뿔형 캐비테이터와 비교하여 두껍고 길게 발생한다.

Fig. 9는 직경 15 mm인 원판과 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 공동의 형상과 본 연구그룹에서 개발한 비점성 해석법에 기반한 포텐셜 유동에 대한 수치해석 방법 (Kim, et al., 2013)을 통해 예측된 결과를 비교한 결과이며, 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 각각의 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 정량적인 형상 특성을 계산 결과와 보다 엄밀하게 비교하기 위해 발생한 초월공동의 길이(L_s)와 공동의 최대 두께(D_s)를 캐비테이터의 직경(d_c)으로 무차원하여 Fig. 10에 나타내었다. 수치해석을 통해 예측한 초월공동의 형상 정보와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

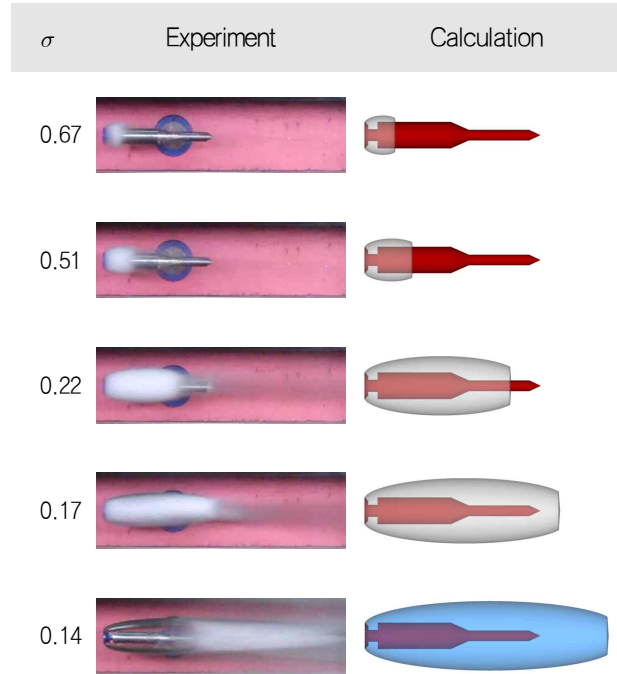
Fig. 10의 수치해석 결과를 바탕으로 원판과 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 무차원화된 길이와 최대 두께의 관계식을 각각 아래와 같이 도출하였다. 이 관계식에 기초하면 주어진 캐비테이션수 조건에서 종속적으로 발생하는 초월공동의 최대 길이와 두께를 예측할 수 있다.

$$\left(\frac{L_s}{d_c}\right)_{disk} = 0.950\sigma^{-1.200} \quad (6)$$

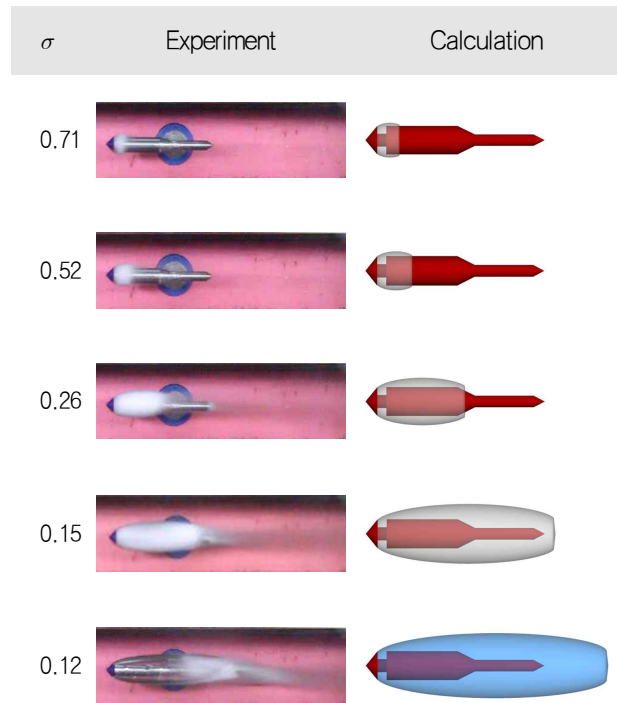
$$\left(\frac{D_s}{d_c}\right)_{disk} = 1.169\sigma^{-0.438} \quad (7)$$

$$\left(\frac{L_s}{d_c}\right)_{cone_{90}} = 0.740\sigma^{-1.181} \quad (8)$$

$$\left(\frac{D_s}{d_c}\right)_{cone_{90}} = 1.005\sigma^{-0.399} \quad (9)$$

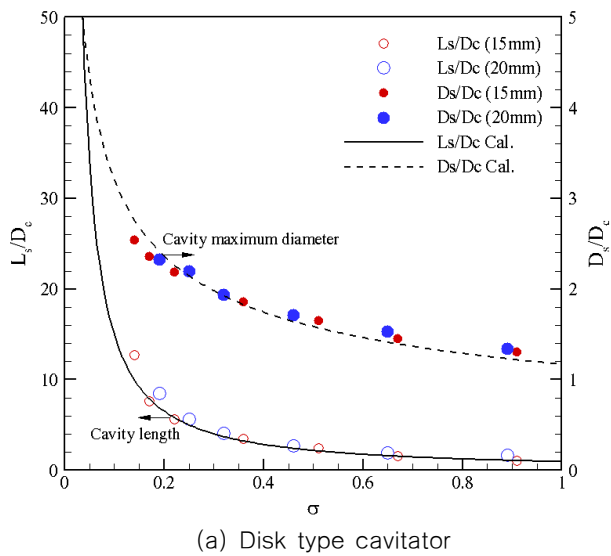


(a) Disk type cavitator

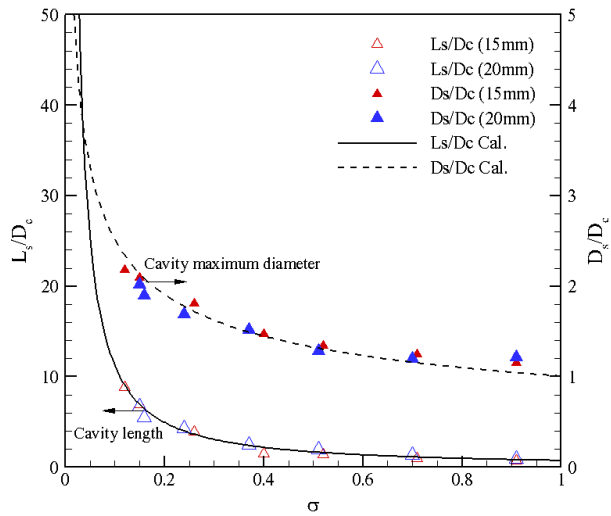


(b) Cone type cavitator

Fig. 9 Comparison of cavity shapes between experimental observations and numerical calculations



(a) Disk type cavitator



(b) Cone type cavitator

Fig. 10 Comparison of cavity length and maximum diameter

초월공동이 발생하면 하중은 캐비테이터에 집중되기 때문에 캐비테이터에 작용하는 하중 특성을 파악하기 위해 앞서 Fig. 2에서 설명한 바와 같이 1축력계를 사용하여 캐비테이터에만 작용하는 하중을 계측하였다. Fig. 11은 직경 15 mm와 20 mm인 원판과 원뿔형 캐비테이터에 작용하는 항력을 속도조건에 따라 나타낸 결과이다. 여기서 점선과 실선은 비공동 상태의 원판형과 원뿔형 캐비테이터에 작용하는 입력항력을 계산한 결과이다. 상대적으로 저속인 구간($V_{\infty} \leq 7.0 m/s$)에서는 작용하는 항력 값의 크기가 작아 계산 결과와 다소 차이를 보이고 있지만, 그 외 유속범위에서는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 원뿔형 캐비테이터에 작용하는 항력의 경우 표면미찰저항 성분이 포함되어 전체적으로 수치계산 결과보다 다소 크게 나타나는 것으로 보인다.

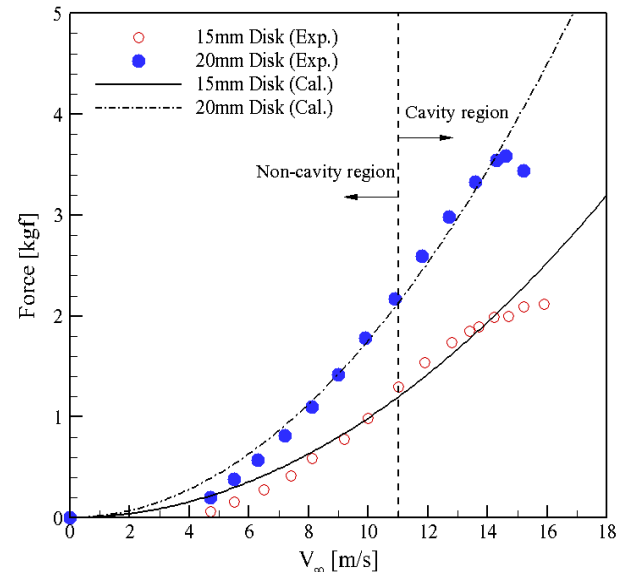
캐비테이터에 작용하는 항력특성을 살펴보기 위해 공동이 충분히 성장한 영역에 대해 캐비테이션수에 따른 항력계수를 비교하였다(Fig. 12). 여기서 항력계수는 각 캐비테이터의 정면 면적을 사용하여 무차원하였다. 캐비테이션수가 낮아져 초월공동으로 성

장하는 경우 작용하는 항력은 캐비테이터에 집중되며, 공동의 길이가 커질수록 항력계수가 작아지며 해석결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉 캐비테이션수가 낮아져 초월공동으로 성장할수록 전체 항력은 입력항력이 지배적이며, 항력계수가 감소하는 초월공동 유동의 물리적 특성을 명확히 확인할 수 있다.

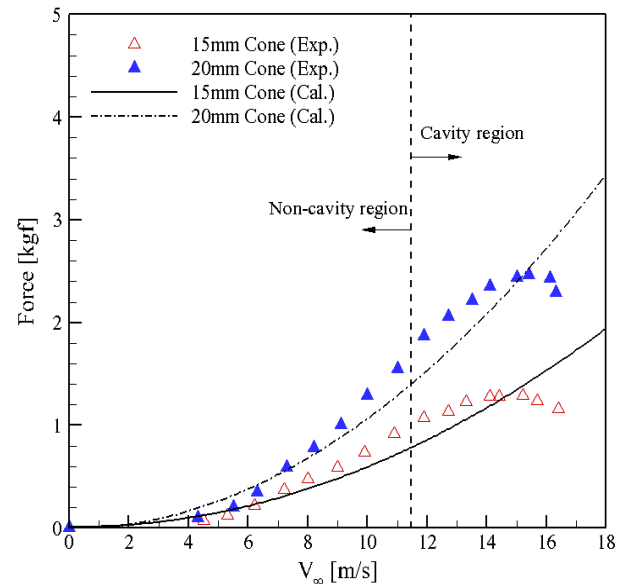
해석결과를 바탕으로 공동 발생 영역에서 원판과 원뿔형 캐비테이터의 항력계수와 캐비테이션수의 관계식을 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$C_{D_{disk}} = 0.775(1 + 1.046\sigma) \quad (10)$$

$$C_{D_{cone, 90^\circ}} = 0.461(1 + 1.480\sigma) \quad (11)$$



(a) Disk type cavitator



(b) Cone type cavitator

Fig. 11 Drag force acting on the cavitator

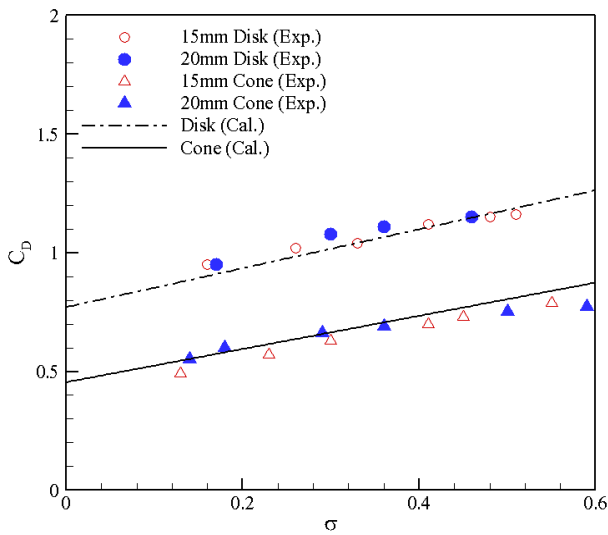


Fig. 12 Drag coefficient versus cavitation number

결과적으로 초월공동의 길이 및 최대 두께는 아래 식 (12) ~ (15)와 같이 캐비테이션수와 항력계수의 관계식으로 정리할 수 있으며, 이를 이용하면 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 형상과 작용하는 항력의 관계를 예측할 수 있다.

$$\left(\frac{L_s}{d_c}\right)_{disk} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{C_D - 0.775}{0.627}\right)^{-0.200} \quad (12)$$

$$\left(\frac{D_s}{d_c}\right)_{disk} = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \left(\frac{C_D - 0.775}{0.065}\right)^{0.062} \quad (13)$$

$$\left(\frac{L_s}{d_c}\right)_{cone_{90}} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{C_D - 0.461}{0.129}\right)^{-0.181} \quad (14)$$

$$\left(\frac{D_s}{d_c}\right)_{cone_{90}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \left(\frac{C_D - 0.461}{0.649}\right)^{0.101} \quad (15)$$

4. 결론

최근 초월공동을 이용하여 수중 운동체에 작용하는 마찰저항을 감소시켜 고속 주행이 가능하도록 하는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 캐비테이션 터널에서 자연 초월공동 실험을 수행하기 위해서는 매우 낮은 캐비테이션수 구현이 가능하도록 터널 내부의 유속을 충분히 높일 수 있어야 하며, 높은 유속 조건에서 발생된 공동이 다시 시험부로 돌아오지 않아야 한다. 충남대학교 캐비테이션 터널은 수년간에 걸쳐 이러한 초월공동 실험이 가능하도록 기능을 개선해왔으며, 이를 통해 본 연구에서는 캐비테이터의 대표적인 형상인 원판과 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 초월공

동의 형상 특성을 관측하고 이에 작용하는 항력을 계측하였다.

먼저 원판과 원뿔형 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 형상 특성을 정량적으로 평가하여 분석하였다. 원판형 캐비테이터의 경우 원뿔형에 비해 동일 캐비테이션수 조건에서 길이가 길고 직경이 큰 초월공동이 발생하며 수치해석 결과와 비교하여 잘 일치함을 보였고, 이를 바탕으로 캐비테이터 직경과 발생하는 초월공동의 길이 및 최대 두께와의 관계식을 도출하였다. 또한 캐비테이터에 작용하는 하중을 계측하여 항력특성을 평가하였다. 원판형에 비해 원뿔형 캐비테이터가 저항 성능이 우수한 것은 자명한 사실이지만, 항력특성과 함께 동일한 캐비테이션수 조건에서 수중 운동체를 충분히 덮을 수 있는 초월공동의 형상 특성도 동시에 고려해야 한다. 이를 위해 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 형상과 작용하는 항력의 관계를 실험 및 수치해석을 통해 검증하였으며, 초월공동 수중운동체의 캐비테이터 설계에 유용하게 사용할 수 있는 관계식을 도출하였다.

후기

본 연구는 한국연구재단 원천기술개발사업(NRF-2014M3C1A9060786)의 지원으로 수행되었다.

References

Ahn, B.K. Lee, T.K. Kim, H.T. & Lee, C.S., 2012. Experimental Investigation of Supercavitating Flows. *Inter-national Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineering*, 4(2), pp.123-131.

Brennen, C., 1969. A Numerical Solution of Axisymmetric Cavity Flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 37(4), pp.671-688.

Garabedian, P.R., 1956. Calculation of Axially Symmetric Cavities and Jets. *Pacific Journal of Mathematics*, 6(4), pp.611-684.

Karlikov, V.P. & Sholomovich, G.I., 1966. Method of Approximate Account for the Wall Effect in Cavitation Flow around Bodies in Water Tunnels. *Fluid Dynamics*, 1(4), pp.89-93.

Kim, J.H. Jang, H.G. Ahn, B.K. & Lee, C.S., 2013. A Numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-Dimensional Axisymmetric Cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.160-166.

Self, M. & Ripken, J.F., 1955. Steady-state cavity studies in a free-jet water tunnel. *St. Anthony Falls Hydrostatic Laboratory Report No 47*.

Serebryakov, V., 1972. The Annular Model for Calculation of Axisymmetric Cavity Flows. *Hydromechanics*, Nauvoka Dunka Ed., Kiev (in Russia), 27, pp.25-29.

Tulin, M., 1953. *Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies*. Navy Dept.: Washington D.C.

Waid, R.L., 1957. Water tunnel investigation of two-dimensional cavities. *CalTech. Hydrostatic Laboratory Report No E-73.4*.

Wu, T.Y., 1955. A free streamline theory for

two-dimensional fully cavitated hydrofoils. *Calif Inst of Tech Hydrodyn Lab Report No 21-17*.

