

캐비테이터와 몸체의 조합에 따라 발생하는 인공 초월공동에 대한 실험연구

정소원¹ · 박상태² · 안병권^{2,†}
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
충남대학교 선박해양공학과²

An Experimental Study on Artificial Supercavitation Generated by Different Combinations of the Cavitator and Body

So-Won Jeong¹ · Sang-Tae Park² · Byoung-Kwon Ahn^{2,†}
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University²

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.

Recently, there has been a growing interest in artificial supercavitation as a way to reduce friction drag of submerged vehicles. A cavitator plays an important role to generate the supercavity, so many studies have focused on the case of cavitator only. However, the body shape behind the cavitator affects the growth of the supercavity and this effect must be considered for evaluating the overall performance of the system. In this work, we conducted experimental investigation on artificial supercavitation generated by different combinations of the cavitator and body. We observed the supercavity pattern by using a high-speed camera and measured the pressure inside the cavity by using an absolute pressure transducer. We estimated the relation between the amount of injected air and the supercavity shape for different combinations. In summary, the disk type cavitator generates larger supercavity than that of the cone and ellipsoidal cavitators, but cavity development speed is relatively slower rather than the others. Furthermore, fore body angle plays an important role to generate the supercavity enveloping the entire body.

Keywords : Cavitation(캐비테이션, 공동), Natural supercavitation(자연 초월공동), Artificial supercavitation(인공 초월공동), Underwater vehicle(수중 운동체), Fore body(전두부)

1. 서론

최근 초월공동 기술을 이용한 수중운동체의 고속화 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 초월공동은 수중운동체 주위에서 발생하는 공동이 성장하여 몸체를 덮은 상태를 말하며, 발생 매커니즘에 따라 크게 자연 초월공동(natural supercavitation)과 인공 초월공동(artificial supercavitation)으로 구분할 수 있다. 이때 자연 공동은 운동체가 고속으로 운동할 때 주위 압력강하에 의해 발생하며, 인공 공동은 물수체의 특정 위치에서 압축가스를 분사시켜 인위적으로 발생시킬 수 있다. 특히 인공 초월공동은 일반적으로 축대칭 형상을 갖는 수중운동체의 경우 캐비테이터 후방에서 압축가스를 분사하여 캐비테이터 끝단에서부터 초월공동을 발생시키며, 자연 초월공동에 비해 상대적으로 낮은 속도에서 초월공동을 발생시킬 수 있기 때문에 자연 초월공동이 발생되기 이전까

지 마찰저항을 줄여 추진효율을 높이고 부분공동 상태에서 물수체에 작용하는 불균일한 유체력을 감소시켜 운동 안정성을 높일 수 있는 장점이 있다.

초월공동 기술은 2차 세계대전 이후 개념이 정립되기 시작하여 초기에는 단순한 형상을 갖는 물수체에서 발생하는 공동 및 초월공동에 관한 연구가 주로 수행되었다. 대표적으로 Self and Ripken(1955)와 Waid(1957)의 경우 실험을 통해 축대칭과 다양한 형상의 2차원 물수체에서 발생하는 자연 초월공동의 특성을 평가하였으며, Wu(1955)는 단순한 2차원 평판에서 발생하는 초월공동에 관한 이론 연구를 수행한바 있다. 이러한 초월공동 기술은 초기에는 러시아를 필두로 군사적인 목적으로 연구가 수행되었으며, 실제 러시아에서는 1977년에 Shkval이라는 기뢰 속도의 5배 수준으로 알려진 초월공동 어뢰 개발에 성공하여 실전 배치하였다고 알려져 있다.

국내에서는 2009년부터 차세대 초고속 수중 어뢰 개발을 위한

방안으로 초월공동 기술에 관한 연구가 본격적으로 시작되었다. 대표적으로 Ahn, et al. (2012)과 Kim et al. (2013)은 자연 초월공동에 대한 실험 및 수치해석에 관한 연구를 수행하였으며, Ahn et al. (2017)은 다양한 형상의 캐비테이터를 대상으로 공기 분사량 변화에 따라 발생하는 인공 초월공동의 발생특성에 관한 실험 연구를 수행하였다. 기존에 국내에서 수행된 초월공동 기술에 관한 연구는 초월공동을 발생시키고 유지시키는 캐비테이터의 성능에 관한 연구로서 실험과 수치해석 모두 캐비테이터의 크기 및 형상 변화에 따라 발생하는 초월공동 특성에 관하여 언급하고 있다. 하지만 실제 초월공동 수중운동체는 추진기관, 배기가스 분사장치 등 다양한 기능 장치가 복잡하게 구성되어 있으며, 이를 수용하기 위해 몸체의 크기는 전방 캐비테이터보다 커질 수밖에 없다. (실제 Shkval의 경우 캐비테이터 직경은 200mm이고 몸체 직경이 533mm로 알려져 있다.) 때문에 초월공동 수중운동체를 설계할 때는 전방 캐비테이터에서 발생하는 초월공동이 상대적으로 큰 몸체를 모두 덮을 수 있도록 설계되어야 한다. 물론 기존의 실험 및 해석연구를 통해 특정 캐비테이터의 직경과 형상이 정해져있을 때 특정 캐비테이터 수조 조건에서 발생하는 공동의 크기는 예측가능하다. 하지만 이는 캐비테이터 후방에 몸체가 없는 경우의 결과로 실제 몸체 유무 및 형상 변화에 따른 공동 특성 변화에 관한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 실험에서는 몸체의 형상과 캐비테이터 변화에 따라 발생하는 인공 초월공동 특성에 관한 실험을 수행하였다. 이때 몸체의 형상은 몸체 직경을 고정하고 전두부의 길이와 각도를 변화하였으며, 캐비테이터는 서로 다른 직경과 형상을 갖도록 설계 및 제작하였다. 실험은 다양한 크기를 갖는 몸체와 캐비테이터를 가지고 이들의 조합을 바꿔가며 수행하였으며, 이때 발생하는 초월공동의 크기를 정량적으로 평가하고 공동 내부 압력을 계측하여 조건 변화에 따른 인공 초월공동 특성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 모형

실험은 충남대학교 캐비테이션터널(CNU-CT)에서 수행되었다. 터널 시험부의 단면 크기는 100mm x 100mm이고 최대 유속은 20m/s이며, 터널의 자세한 제원은 Table 1과 같다. 인공적인 초월공동 실험을 위해서는 터널 외부에서 실험모형에 압축공기를 주입해야하며, 터널에 분사된 공기가 다시 시험부로 돌아와 발생하는 공동에 영향을 주지 않는 것이 중요하다. 충남대학교 캐비테이션터널은 시험부 전방에 분사된 공기를 포집할 수 있도록 구성되어 있으며, 분사된 공기가 시험부로 재유입 되지 않아 인공 초월공동 실험이 가능하다.

실험모형은 Fig. 1과 같이 캐비테이터, 전두부, 몸체, 지지부로 구성되어 있다. 실험모형의 몸체 직경(B_D)과 길이(B_L)를 각각 25mm, 362mm로 고정하고 캐비테이터의 직경(d_c , 3종)과, 전두부의 길이(S_L , 4종)를 변화시켜 실험을 수행하였으며, Table 2는 이들 모형의 주요 치수를 보여준다. 또한 캐비테이터의 직경뿐만

아니라 서로 다른 형상의 캐비테이터 4종에 대해 발생하는 인공 초월공동 특성을 평가하였다. 끝단의 형상이 서로 다른 원판형 캐비테이터 2종과 45도 각도의 원뿔형, 장축과 단축의비가 2:1인 타원형 캐비테이터에 대해 실험을 수행하였으며, 이때 직접적인 비교를 위해 원뿔형과 타원형 캐비테이터의 경우 원판형 캐비테이터에서 발생하는 인공 초월공동과 비교를 위해 인공 초월공동이 발생하기 시작하는 캐비테이터 끝단의 위치를 동일하게 설계하였다. (Fig. 2 참조)

Table 1 CNU-CT Specifications

Test section (I)	100mm x 100mm (Contraction ratio 15:1)
Test section (II)	120mm x 50mm (Contraction ratio 25:1)
Max. flow speed	20m/s (Section I), 30m/s (Section II)
Motor power	90kW (120HP) Centrifugal pump
Pressure (abs)	10kPa ~ 300kPa
Vacuum pump	5x10 ⁻⁴ Torr (750W)
Air compressure	8kgf/cm ² (5HP)

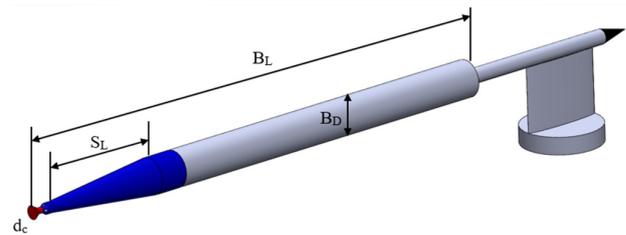


Fig. 1 Test model

Table 2 Test model size

Cavitator diameter [mm]	8.6	9.4	10.5	
Body diameter [mm]	25			
Body length [mm]	362			
Fore-body length [mm]	82.5	140	160	180
Fore-body angle [deg]	6.1	3.6	3.1	2.8

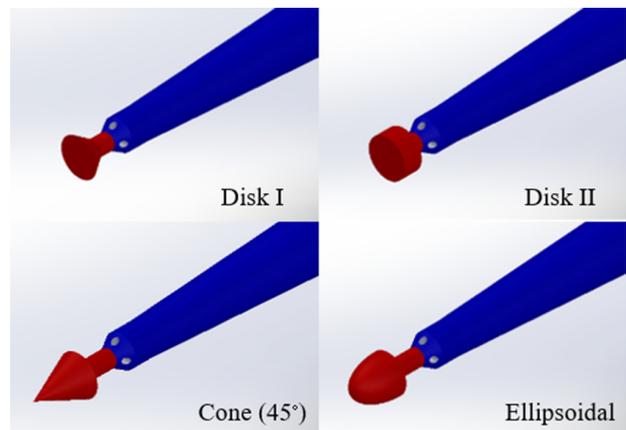


Fig. 2 Cavitator shapes ($d_c=10.5$ mm)

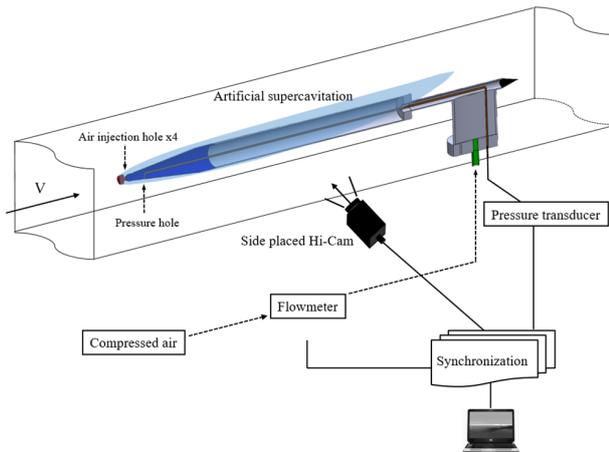


Fig. 3 Schematic view of the experimental set-up

인공 초월공동 실험을 수행하기 위해서는 캐비테이터 후방으로 공기를 정량적으로 분사할 수 있어야 하며, 인공 공동의 캐비테이션수를 정의하기 위해서는 공동 내부의 압력을 계측할 수 있는 시스템이 구성되어야 한다. 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 터널 외부에 에어 컴프레셔와 연결한 공기 유량계를 설치하여 유량을 제어 가능하도록 구성하였으며, 이때 TSI사의 공기유량계 MODEL4043을 사용하여 공기 유량계에서 분사되는 공기의 체적유량을 확인하였다. 외부로부터 주입된 공기는 캐비테이터 앞단으로부터 9mm 위치에 직경 1.5mm를 갖는 4개의 공기 분사홀을 통해 분사되도록 구성하였다. 또한 인공 공동 내부의 압력을 계측하기 위해 캐비테이터 앞단으로부터 30mm, 130mm에 위치한 압력 계측 홀에서 터널 외부에 설치한 절대압력센서(Kulite ETM-200-375)로 호스를 연결하여 계측하도록 구성하였다. 그리고 발생하는 인공 초월공동의 발생특성을 보다 면밀하게 관측하기 위해 초고속 카메라(Photron Mini UX100)를 사용하여 초당 2000 frame의 속도로 촬영하였다. 본 실험에서는 초고속 카메라 이미지 분석을 통하여 공동의 길이와 최대 직경을 계측하였다. 특히 공동 길이의 경우 부력 효과로 인해 비대칭적이며, 분사된 공기가 후류방향으로 빠져나가 명확히 구분하기 힘들기 때문에 Fig. 4와 같이 공동의 하단부의 길이를 공동의 길이로 정의하였다.

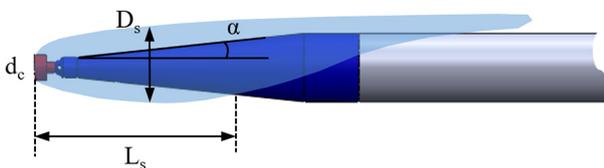


Fig. 4 Definition of cavity length and maximum diameter

3. 실험 결과

3.1 몸체 조합에 따른 인공 초월공동 특성

실험은 각각의 유속에 대해 아래 식 (1)과 같이 무차원한 공기 분사량(air entrainment coefficient, C_q)를 변화시켜가며 실험을

수행하였으며, 이때 V 는 시험부 유입 유속, d_c 는 캐비테이터 직경을 나타내며, \dot{Q} 는 캐비테이터 후방으로 주입되는 공기의 체적유량이다. 각각의 속도 조건 및 캐비테이터 크기에 따른 실험조건은 Table 3과 같다. 몸체 조합에 따른 인공 초월공동 특성은 캐비테이터의 형상에 상관없이 동일한 특성으로 나타나며, 본 논문에서는 Fig. 2의 Disk I 형상의 결과로 나타내었다.

$$C_q = \frac{\dot{Q}}{Vd_c^2} \quad (1)$$

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gd_c}} \quad (2)$$

Table 3 Test conditions

C_q	0.04~0.14, $\Delta C_q=0.02$			
V [m/s]	4	6	8	10
F_n ($d_c=8.6\text{mm}$)	13.77	20.66	27.54	34.43
F_n ($d_c=9.4\text{mm}$)	13.17	19.76	26.34	32.93
F_n ($d_c=10.5\text{mm}$)	12.46	18.69	24.93	31.16

Fig. 5는 캐비테이터 직경이 9.4mm이고 전두부의 길이가 160mm인 실험모형에 대해 프루드수(Froude number, F_n) 26.34에서 무차원한 공기 분사량을 증가시켰다가 다시 감소시켰을 때 발생하는 인공 초월공동을 보여준다. 초기에 포말형태로 발생한 인공 공동이 공기 분사량이 증가하면서 깨끗한 초월공동으로 발달하며, 공기 분사량을 줄이면 다시 포말형태의 인공 공동으로 돌아오는 것을 알 수 있다. 이때 제한된 공간인 캐비테이션터널 실험의 경우 터널 벽면의 영향으로 모형의 크기에 따라 폐색효과(blockage effect)가 발생한다. 초월공동 실험의 경우 캐비테이터 후방에서 발생한 초월공동의 크기와 터널 크기의 비율로 폐색 정도가 정해지며, 터널의 크기가 다르더라도 캐비테이터와 터널의 크기 비율이 동일하면 동일한 기하학적 특성을 갖는 공동을 발생시킬 수 있다. 또한 폐색효과로 인해 Fig. 5와 같이 초월공동이 발생하면 이후 공기 분사량을 증가시켜도 더 이상 공동이 성장하지 않으며 캐비테이션수도 일정하게 유지된다. 터널 벽면의 영향으로 실험모형 주위의 속도는 유입 유속보다 커지기 때문에 무한 영역의 결과와 비교하였을 때 동일한 캐비테이션수에서 공동의 기하학적 특성이 달라지며, Kalikov and Sholomovich(1966)는 축대칭 물체에 대해 터널과 무한 영역에서의 캐비테이션수 관계를 확인한바 있다. 또한 공기량을 증가시킬 때 깨끗한 초월공동이 발생한 이후 공기량을 감소시킬 때 동일한 공기량에서 발생하는 인공 공동의 발생 특성이 다른 이력현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 폐색효과로 인한 공동 특성 및 공동의 이력현상은 선형 연구들에서 확인된 바 있으며 (Kawakami and Arndt 2011; Ahn et al., 2017), 이는 캐비테이터 후방에 뭉툭한 몸체가 존재하더라도 인공 공동의 주요 특성중 하나인 이력현상이 나타남을 알 수 있다.

인공 초월공동은 자연 초월공동과는 달리 상대적으로 낮은 속도영역에서 초월공동을 형성할 수 있으며, 이로 인해 중력장에서 발생하는 부력효과로 인해 공동 끝이 들려 올라가 축에 비대칭적으로 형성된다. 부력효과는 유동의 관성력에 비해 중력의 효과가 상대적으로 클수록 명확하게 나타나며, 이를 앞선 식 (2)의 프루드수로 표현할 수 있다. Fig. 6은 캐비테이터 직경이 10.5mm이고 전두부의 길이가 180mm인 몸체를 갖는 모형에 대해 무차원한 공기 분사량이 일정할 때 프루드수 변화에 따라 발생하는 인공 초월공동을 보여준다. 프루드수가 작을 때 즉, 관성력에 비해 중력의 효과가 상대적으로 클 때 초월공동 끝부분이 들려 올라가는 것을 확인할 수 있으며 반대로 프루드수가 커질수록 중력에 의한 효과는 상대적으로 작아져 축대칭인 인공 초월공동이 발생함을 알 수 있다.

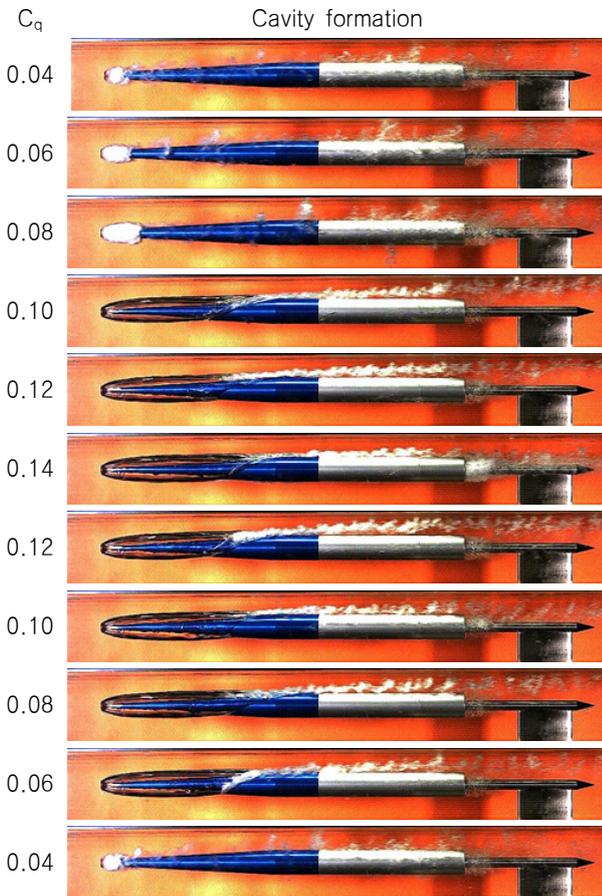


Fig. 5 Artificial supercavitation according to different air entrainment coefficient

Fig. 7은 서로 다른 크기 캐비테이터 직경을 갖는 3가지의 실험 모형에 대해 무차원한 공기 분사량이 동일($C_q=0.14$)할 때 프루드수 변화에 따라 아래와 같이 정의한 캐비테이션수 차이를 보여준다. 이때 P_∞ 는 유입 유동의 압력이며 P_c 는 공동 내부 압력을 나타낸다.

$$\sigma_c = \frac{P_\infty - P_c}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3)$$

앞서 언급한바와 같이 터널 벽면부의 영향으로 인해 초월공동이 발생한 이후 공기량을 더 증가시켜도 공동 형상 및 캐비테이션수의 변화는 없다. 이때의 캐비테이션수를 최소 캐비테이션수(σ_{min})라고 하며, 캐비테이터의 직경이 다를 때 발생하는 초월공동의 크기가 다르기 때문에 최소 캐비테이션수는 서로 다른 값을 가진다.



Fig. 6 Buoyancy effects of artificial supercavitation ($C_q=0.14$)

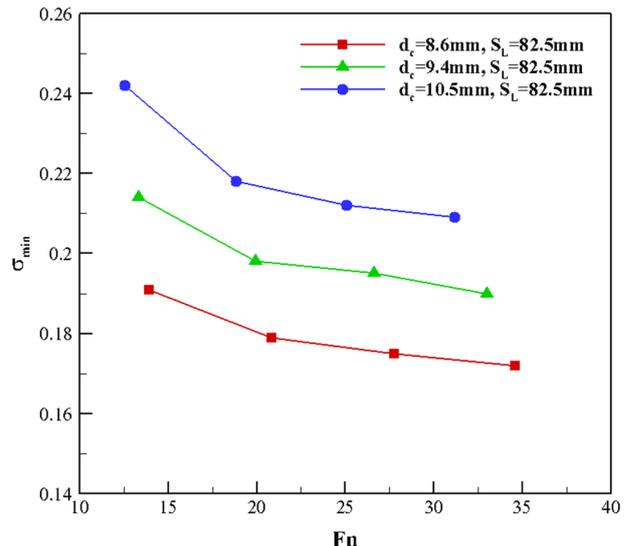


Fig. 7 Change of the minimum cavitation number according to Froude number ($C_q=0.14$)

일반적인 인공 초월공동 특성 이외에 본 실험에서는 전두부 길이와 캐비테이터 직경의 조합에 따라 발생하는 인공 초월공동의 기하학적 특성 변화를 비교하였다. Fig. 8은 몸체 전두부의 길이가 82.5mm와 160.0mm일 때 서로 다른 3종의 직경을 갖는 캐비테이터에서 발생하는 인공 초월공동을 보여준다. 전두부의 길이가 82.5mm인 경우 캐비테이터의 직경이 8.6mm에서 10.5mm로 커질 때 발생한 공동의 폭은 커졌으나 길이의 경우 공동 폭의 변화에 비해 차이가 작은 것을 알 수 있다. 이를 전두부 길이 160.0mm의 결과와 비교하면 그 차이를 명확히 확인할 수 있는데 특히 공동의 길이의 경우 동일한 캐비테이터 직경을 가질 때 전두부의 길이가 커질수록 길어진 것을 알 수 있으며, 심지어 캐비테이터의 직경이 더 큰 경우에도 전두부의 길이가 짧으면 길이가 더 짧은 인공 초월공동이 발생함을 확인할 수 있다. 즉 이는 발생하는 인공 초월공동의

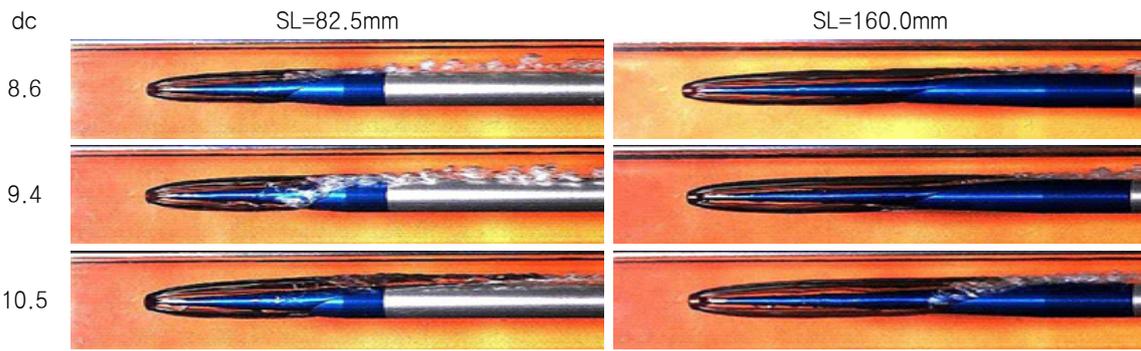


Fig. 8 Artificial supercavitation according to different cavitator diameters

크기가 캐비테이터 후방 몸체의 형상 변화에 따라 달라질 수 있음을 보여준다.

전두부 길이에 따라 발생하는 인공 초월공동의 형상을 확인하기 위해 캐비테이터의 직경과 형상을 고정하고 몸체의 전두부 길이를 변화하여 실험을 수행하였으며, Fig. 9는 그중 캐비테이터 직경이 10.5mm이고 프루드수가 18.69, 무차원한 공기 분사량이 0.16일 때 발생하는 인공 초월공동을 보여준다. 캐비테이터의 직경이 동일함에도 전두부의 길이가 길어질 때 발생하는 초월공동의 길이가 더 길어지며, 각각의 조건에서 발생하는 인공 초월공동의 길이가 전두부를 넘어가지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 조건에서 캐비테이터 후방에 전두부와 두꺼운 몸체가 존재하지 않고 캐비테이터보다 작은 직경을 갖는 지지부만 설치된 경우 발생하는 인공 초월공동과 비교하였을 때 몸체 유무에 따라 발생하는 공동 크기 차이를 보다 명확히 확인할 수 있다. 이러한 차이는 캐비테이터에서 발생한 인공 초월공동은 부력효과로 인해 공동 하단부터 전두부에 부딪치면서 초월공동이 안쪽으로 재돌입됨에 따라 나타나며, 공동과 몸체의 접촉은 전두부의 각도가 클수록 공동의 길이가 짧을 때 발생한다. 이로 인해 캐비테이터 직경이 동일함에도 전두부의 각도가 크거나 길이가 작아질수록 길이가 짧은 초월공동이 발생하는 것으로 이해할 수 있다.

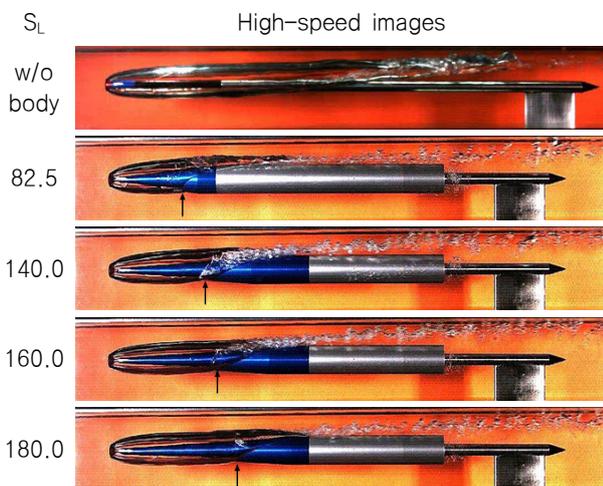


Fig. 9 Artificial supercavitation according to different fore bodies ($d_c=10.5\text{mm}$)

Fig. 10은 캐비테이터 직경이 10.5mm일 때 몸체 직경으로 무차원한 전두부 길이와 프루드수 차이에 따라서 발생하는 캐비테이터의 직경으로 무차원한 인공 초월공동의 길이(L_c)를 보여준다. 이때 인공 초월공동의 길이는 캐비테이터로부터 발생한 공동의 하단부가 전두부에 부딪쳐 재돌입유동이 발생하는 구간까지로 정의하였다. 먼저 프루드수가 일정한 경우 Fig. 8에서 확인한바와 같이 캐비테이터 직경으로 무차원한 초월공동의 길이는 몸체 직경으로 무차원한 전두부의 길이가 증가할수록 길어지는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 몸체형상에서도 프루드수가 커질수록 초월공동의 길이가 길어지는 것을 확인할 수 있는데 이는 프루드수가 커질수록 부력효과가 낮아지면서 공동이 들려올라가는 정도가 낮아지기 때문에 초월공동의 길이가 길어지는 것으로 이해할 수 있으며 이는 Fig. 6을 통해서도 육안으로도 그 차이를 확인할 수 있다.

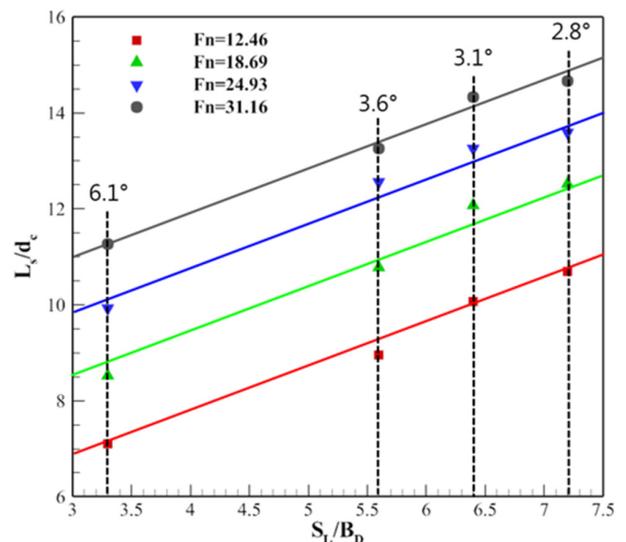


Fig. 10 Comparison of the cavity length for different non dimensional fore body lengths

동일한 크기와 형상을 갖는 캐비테이터에서 발생하는 인공 초월공동이 후방 몸체로 인해 서로 다른 크기를 가질 때 초월공동 내부 압력을 계속하여 그 차이를 비교하였다. Fig. 11은 캐비테이터 직경이 10.5mm일 때 유체 동압($0.5\rho V^2$)에 대한 차압 ($P_\infty - P_c$)을 나타낸 그래프로 기울기가 캐비테이션수를 의미한

다. 그래프에서 x축 유체 동압이 커지는 것은 터널 내부 유속이 커지는 것을 의미하며 그에 따라 차압도 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이때 몸체 전두부의 길이가 달라짐에 따라 공동의 크기가 달라져도 동압에 대한 차압이 일정한 것을 알 수 있는데 이는 전두부 길이 변화에 따른 인공 초월공동 크기가 변하더라도 공동 내부압력은 동일한 것을 의미한다.

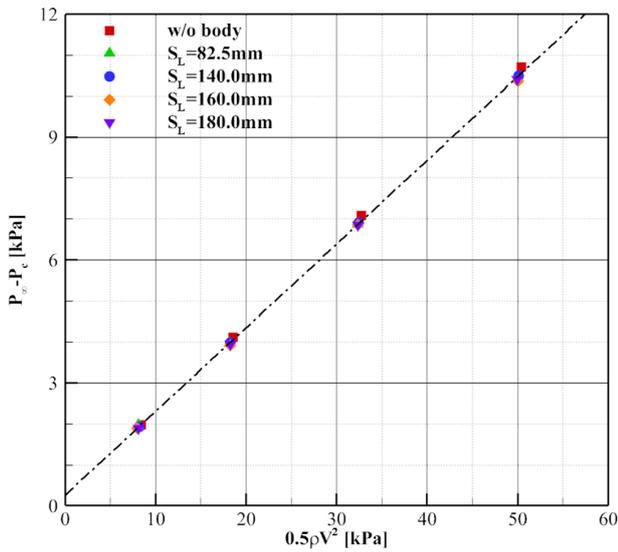


Fig. 11 Comparison of pressure inside the supercavity

3.2 캐비테이터 형상에 따른 인공 초월공동 특성

앞서 언급한바와 같이 초월공동을 발생시키고 유지시키는 캐비테이터는 초월공동 수중운동체 연구의 핵심이며 관련 연구가 지속적으로 수행되어져 왔다. 본 실험에서는 캐비테이터 후방에 운동체가 존재할 때 동일 유속 조건 및 공기 분사량 조건에서 캐비테이터 형상차이에 따른 인공 초월공동 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였으며, 그중 Fig. 12는 4종의 캐비테이터 직경이 모두 동일한 10.5mm의 결과로 유속과 캐비테이터 직경으로 무차원한 공기 분사량의 정의에 따라 C_q 가 동일할 때 실제 분사되는 공기의 체적유량도 동일하다. 이때 원판형 캐비테이터의 경우 Fig. 2에서와 같이 캐비테이터 끝단의 형상이 다른 경우로 Fig. 12의 결과에서는 공기 분사량이 증가할 때 동일한 거동을 보이면서 초월공동으로 성장해 나가는 것을 알 수 있다. 하지만 원뿔형과 타원형 캐비테이터의 경우 $C_q=0.04$ 에서도 깨끗한 초월공동이 발생하는 것을 알 수 있으며 직경이 동일함에도 원판형 캐비테이터에 비해 발생하는 초월공동의 크기가 작은 것을 알 수 있다. 이는 캐비테이터에서 발생하는 초월공동은 캐비테이터 직경뿐만 아니라 형상에 따라 서로 달라지며, 운동체 및 발생하는 초월공동의 크기, 작용하는 항력 등과 같은 여러 가지 요소를 고려하여 선택해야한다.

Fig. 13은 4가지 형상의 캐비테이터에 대해 프루드수 변화에 따른 캐비테이션수와 발생한 인공 초월공동의 무차원한 최대 직경을

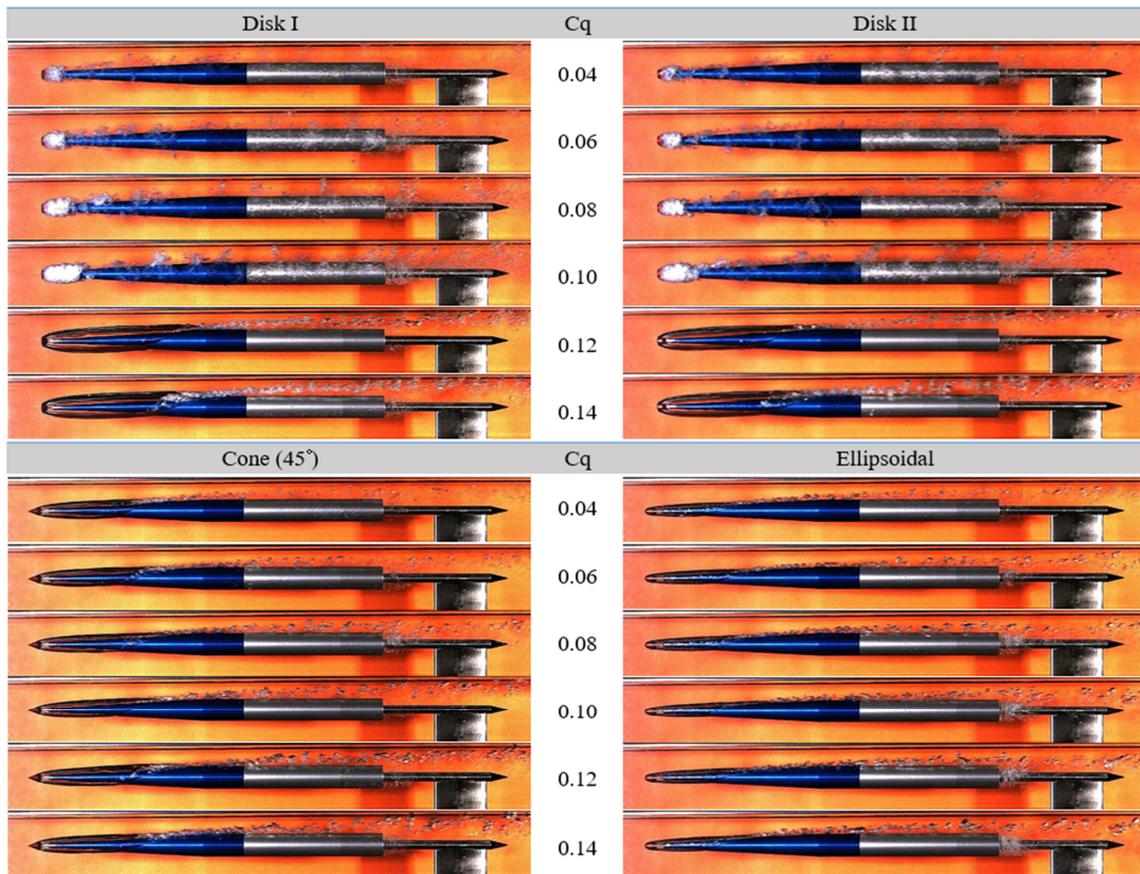


Fig. 12 Development of the artificial supercavity for different cavitator shapes

보여준다. 먼저 모든 캐비테이터에 대해 프루드수가 증가할수록 최소 캐비테이션수가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이에

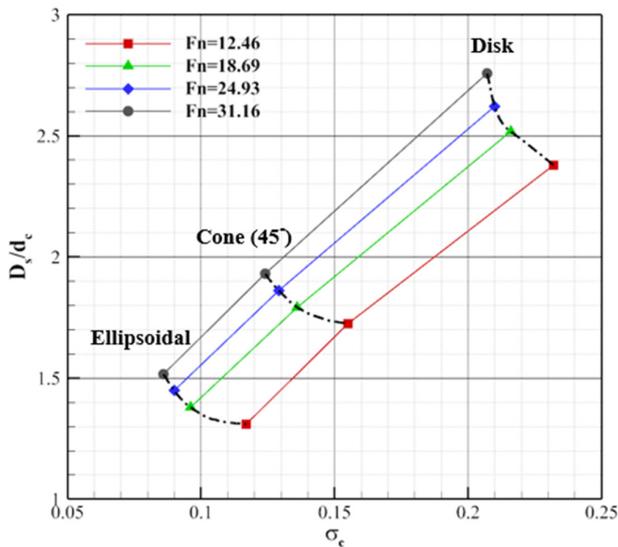


Fig. 13 Comparison of the maximum cavity diameter for different cavitator shapes

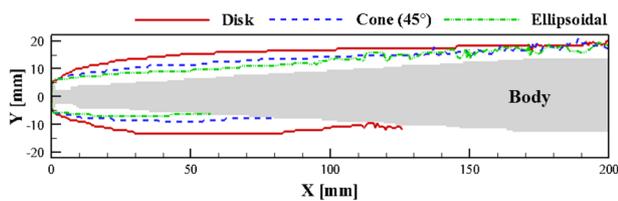


Fig. 14 Artificial supercavity shapes according to different cavitators ($F_n=18.69$)

따라 초월공동의 최대 직경도 커지는 것을 확인할 수 있다. 이때 원뿔형과 타원형 캐비테이터의 경우 캐비테이터 직경이 동일함에도 원판형 캐비테이터보다 낮은 최소 캐비테이션수를 가지며 그중에서도 타원형 캐비테이터가 가장 낮은 최소 캐비테이션수를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 공기량이 주입될 때 캐비테이터 후류에서 발생하는 초월공동의 크기가 작을수록 공동 내부의 압력 (P_c)이 커지므로 상대적으로 작은 캐비테이션수를 갖는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 14는 프루드수 18.69인 조건에 대해 Fig. 12에서 비교한 서로 다른 3가지 형상을 갖는 캐비테이터에서 발생하는 공동의 형상을 비교한 결과이다. Fig. 13에서 확인한바와 같이 공동의 최대 직경은 원판형이 가장 크고, 타원형이 가장 작은 것을 확인할 수 있으며, 원판형 캐비테이터의 경우 다른 형상에 비해 공동의 직경이 크기 때문에 상대적으로 캐비테이터 끝단에서부터 공동이 몸체의 하단에 닿는 부분까지의 거리는 길어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 원판형 캐비테이터와 원뿔형 캐비테이터에서 동일 유속 조건에서 동일한 공기량을 분사하였을 때 발생하는 0.087초 동안의 공동의 발달 과정을 보여준다. 이때 조명을 시험 모형 뒤편에서 초고속 카메라로 향하게 설치하여 공동 및 시험 모형의 그림자를 촬영하여 명암 대조를 통해 공동의 생성 정도를 보다 명확히 구분하였다. 초기에 캐비테이터의 형상에 상관없이 동일하게 발생하기 시작한 공동이 시간이 지날수록 발달하는 것을 확인할 수 있다. 이때 시간이 지날수록 원뿔형 캐비테이터의 경우 깨끗한 초월공동으로 약 0.05초 이내의 빠른 시간에 발달하는 반면 원판형 캐비테이터의 경우 0.087초가 경과하여도 포말형 공동 상태로 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 캐비테이터 후류 유동과 공동 내부와 외부의 압력차로 인해 발생하는 재돌입유동의 영향으로 인해 발생

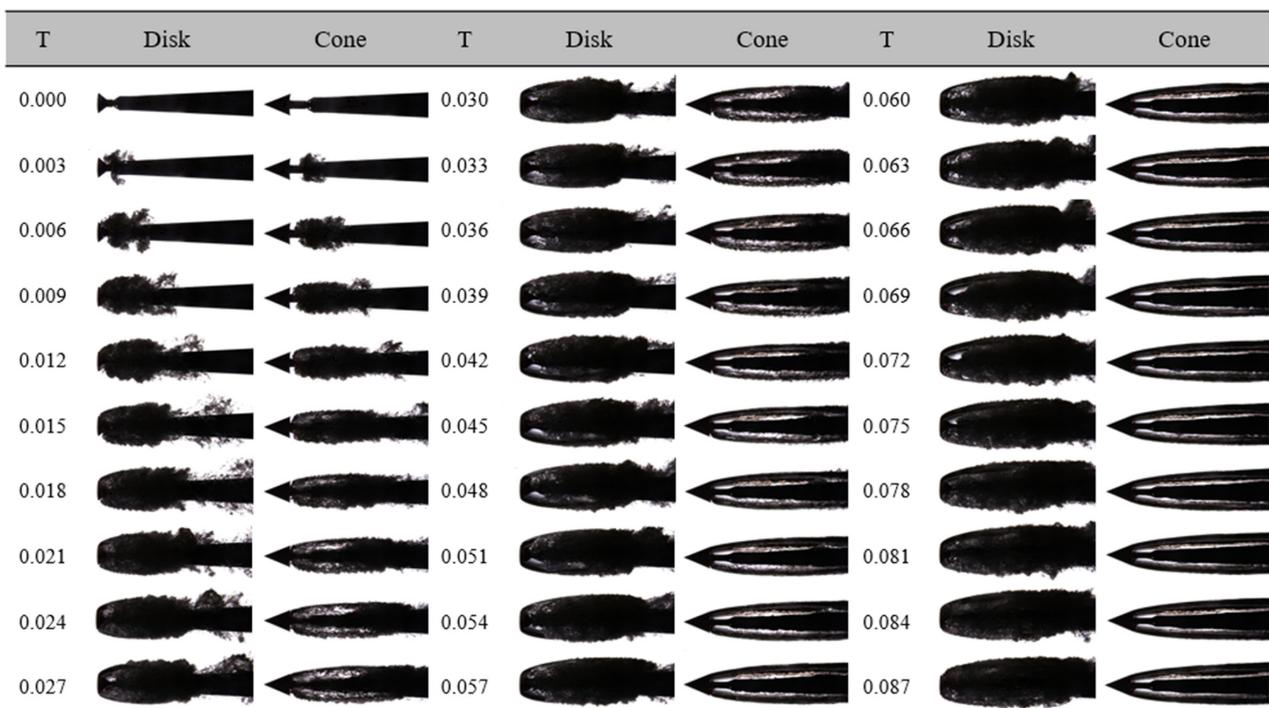


Fig. 15 Comparison of the cavity development between disk and cone type cavitator

한다. 일반적으로 원판형 물수체 후류의 압력과 원뿔형 물수체 후류의 압력의 경우 원판형의 경우 원뿔형에 비해 상대적으로 낮으며, 이는 실제 계측된 공동 내부압력을 기준으로 계산한 캐비테이션수를 통해서도 확인 가능하다. 이는 동일한 유속 조건에서 외부 압력이 동일할 때 원판형 캐비테이터 후류의 압력이 상대적으로 낮아 재돌입유동이 강하게 발생하며, 이러한 재돌입유동으로 인해 공동의 발달이 저해됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 실험연구는 캐비테이터와 몸체의 조합에 따라 발생하는 인공 초월공동의 특성을 파악하기 위한 목적으로 수행되었다. 캐비테이터와 몸체의 다양한 조합이 가능하도록 형상을 설계 및 제작하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 통해 다음과 같이 종합하여 정리할 수 있다.

먼저 캐비테이터 형상 변화에 따라 발생하는 인공 초월공동의 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

캐비테이터의 형상이 다를 때 인공 초월공동을 발생시키기 위해 필요 공기 분사량이 다르며, 발생하는 인공 초월공동의 크기 또한 다르다.

인공 초월공동의 크기가 다를 때 초월공동 내부압력이 달라지며, 내부압력은 공동의 크기가 작을수록 큰 값을 가진다.

캐비테이터의 형상에 따라 재돌입하는 유동의 차이로 인해 초월공동의 발달 속도가 달라진다.

다음으로 몸체 형상 변화에 따라 발생하는 인공 초월공동의 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

캐비테이터 후방에 직경이 큰 몸체가 존재하더라도 인공 초월공동은 초기에 포말형태의 부분 공동에서 완전한 초월공동의 상태로 발달하는 특성은 동일하게 나타난다.

몸체가 있을 때 발생하는 인공 초월공동에서도 공동 및 공동 내부 압력의 이력현상, 부력현상과 같은 인공 초월공동의 주요 특성이 동일하게 나타난다.

전두부 길이는 인공 초월공동의 성장에 매우 큰 영향을 미친다. 동일한 유속 및 공기 분사조건에서 전두부의 길이가 길고 전두부 각도가 작을수록 더 긴 초월공동이 발생한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 민간협력진흥원 민간기술협력센터와 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. *International Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineering*, 4(2), pp.123-131.
- Ahn, B.K., Jeong, S.W., Kim, J.H., Shao, S., Hong, J. & Arndt, R.E.A., 2017. An experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(2), pp.227-237.
- Kalikov, V.P. & Sholomovich, G.I., 1966. Method of approximate account for the wall effect in cavitation flow around bodies in water tunnels. *Izv. AN SSSR. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 1(3), pp.89-93.
- Kawakami, E. & Arndt, R.E.A., 2011. Investigation of the behavior of ventilated supercavities. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 113(9), p.091305.
- Kim, J.H., Jang, H.K., 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.W. & Ripken, J. F., 1955. *Steady-state cavity studies in a free-jet water tunnel*. Washington DC: St. Anthony Falls Hydraulic. Lab Report No. 47.
- Waid, R.L., 1957. *Water tunnel investigation of two-dimensional cavities*. California: The Hydrodynamics Laboratory of California Institute of Technology, Report No. E-73.6.
- Wu, T. Y., 1955. *A free streamline theory for two-dimensional fully cavitating hydrofoils*. California: The Hydrodynamics Laboratory of California Institute of Technology, Report No. 21-17.



정 소 원

박 상 태

안 병 권