



다중 분사 인공 초월공동에 대한 실험 연구

안병권^{1,†}·김기성¹·정소원²·윤현걸³
충남대학교 선박해양공학과¹
선박해양플랜트연구소²
국방과학연구소³

An Experimental Study on Multi-Injected Artificial Supercavitation

Byoung-Kwon Ahn^{1,†}·Ki-Seong Kim¹·So-Won Jeong²·Hyun-Gull Yoon³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering²
Agency for Defense Development³

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 this study, we present experimental observations of artificial supercavitation generated by the injection of compressed air at multiple locations on the body. Experiments were conducted at a cavitation tunnel equipped with a special facility to remove injected air before returning to the test section. Artificial supercavitation, which is generated at a relatively low speed compared to natural supercavitation, is formed asymmetrically on the axis of the body due to the buoyancy effect. In order to accelerate the development of the supercavity and increase the area covering the body, an experimental device capable of additional injection from the body was designed and its performance was evaluated through the model test. The shapes of the supercavity generated by multi-injections of different combinations according to different flow speeds were analyzed using high-speed shadow images. The results show that multiple injections at suitable locations can effectively increase the length of the supercavity and consequently improve propulsion efficiency.

Keywords : Cavitation(캐비테이션, 공동), Cavitator(캐비테이터), Natural supercavitation(자연 초월공동), Artificial supercavitation(인공 초월공동), Underwater vehicle(수중 운동체), Multi-injection(다중 분사)

1. 서론

수중 운동체의 전두부에 위치한 캐비테이터로부터 발생하는 공동이 몸체를 완전히 덮게 되면, 즉 초월공동(supercavitation)이 발생하면 물과의 마찰항력 극적으로 감소되어 수중에서는 초고속이라 할 수 있는 최소 200노트 이상으로 주행이 가능하다. 초월공동에 대한 기술 개념은 이미 1940년대 말에 정립되었으나 실용화를 위한 요소기술, 특히 고체연료 추진 방식과 제어기술 등의 한계와 막대한 개발비 등 복합적인 요인으로 인해 1900년대 말엽까지 러시아를 중심으로 특정 국가에서 군사 목적으로 제한적인 연구가 이루어졌다. 이후 캐비테이터 후방에서 압축가스를 분사시켜 인공적으로 초월공동을 발생시키는 기술은 수상 운동체에도 적용 가능한 물수체의 고속화 기술로 인식

되면서 국내에서도 이에 대한 실험 및 수치해석 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 기존 연구들에 대한 검토와 분석은 이전 논문(Kim et al., 2013)에서 분석한 바 있으며, 본 논문에서는 모형실험과 관련된 주요 선행연구 결과를 중심으로 정리하였다. 수중 운동체에서 발생하는 초월공동과 항력 특성은 캐비테이터 형상에 따라 크게 달라지기 때문에 초기 연구들은 다양한 형상의 단독 캐비테이터에서 발생하는 자연 및 인공 초월공동에 집중되었다. Kim et al. (2013, 2016)은 비점성 경계요소법을 기반으로 다양한 형상의 2차원 및 3차원 캐비테이터에서 발생하는 자연 초월공동 해석을 수행했으며, 캐비테이션터널 모형시험을 통해 축대칭 캐비테이터에서 발생하는 자연 초월공동의 발생 과정과 작용하는 항력 특성을 계측하고 수치해석 결과와 비교, 검증하여 다양한 형상의 캐비테이터에서 발생하는 초월공동의 형상과 작용하는 항력과의 관계식을 도출한 바 있다. Ahn et

al. (2015)은 압축공기 분사를 통한 인공 초월공동의 발생 과정과 물리적 특성을 평가하였으며, 이를 확장하여 서로 다른 두 실험시설에서 동일 축척비의 캐비테이터를 대상으로 공동 내부 압력 계측, 유속 변화에 따른 부력효과, 분사량 변화에 따른 이력현상 등을 실증하였다 (Ahn et al., 2017; Shao et al., 2017). 또한 Jeong et al. (2018)은 불균일 유동장에서의 인공 초월공동의 비정상 거동 특성을 평가하였다. 이러한 연구를 통해 캐비테이터 단독 모형에서 발생하는 초월공동의 물리적 특성이 상당 부분 규명되었으며, 이후 캐비테이터와 몸체의 조합에 따른 인공 초월공동의 발생 특성에 대한 연구가 수행되기에 이르렀다. Jeong et al. (2019)은 몸체의 전두부 형상과 다양한 형상의 캐비테이터 조합에 따라 발생하는 인공 초월공동의 특성을 관측하여, 특히 몸체 전두부의 길이는 초월공동의 성장에 큰 영향을 미친다는 것을 밝혔으며, Jiang et al. (2019)은 몸체의 전두부 및 후두부 형상 변화에 따라 발생하는 초월공동의 특성과 함께 작용하는 항력을 계측한 바 있다.

본 연구는 원판형 캐비테이터와 몸체로 이루어진 수중 운동체를 대상으로 캐비테이터 후방과 몸체의 특정 위치에서 다중으로 압축공기를 분사하는 경우 발생하는 초월공동의 특성을 평가하기 위한 목적으로 수행되었다. 자연 초월공동에 비해 상대적으로 낮은 속도에서도 생성되는 인공 초월공동은 부력효과로 인해 공동의 형상이 운동체 축에 비대칭적으로 형성되어 몸체의 일부는 물과 닿아 있기 때문에 불균일한 유체력이 발생한다. 캐비테이터 후방에서 분사된 압축 공기에 의해 생성되는 초월공동의 발달을 촉진시키고, 몸체를 덮는 면적을 증가시키기 위해 몸체에서 추가적으로 압축공기를 분사하는 방안을 고안하였으며, 모형실험을 통해 그 성능을 평가하였다.

2. 실험 장치 및 모형

실험은 충남대학교 캐비테이션 터널(CNU-CT)에서 수행되었으며 터널 관측부의 크기는 가로 x 세로가 100 mm x 100 mm, 길이는 1400 mm로 최대 유속은 20 m/s이며, 최소 0.1 Bar에서 최대 3 Bar까지 압력조절이 가능하다(Fig. 1). 특히 인공 초월공동 실험에 있어 터널 외부로부터 물수체의 캐비테이터에서 분사된 압축공기가 시험부로 재유입지 않아야만 초월공동의 발생 특성을 정확히 평가할 수 있다. 본 터널은 시험부 전·후방에 유입된 공기를 포집할 수 있는 장치를 갖추고 있으며, 그 성능은 이전 연구를 통해 충분히 검증되었다.

실험모형(Fig. 2)은 직경이 25 mm인 축대칭 몸체와 직경 9.4 mm인 원판형 캐비테이터 그리고 서로 다른 3개의 분사부로 구성되어 있다. 분사 위치는 이전에 수행된 연구 결과 (Jeong et al., 2019)를 종합적으로 평가하여 캐비테이터로부터 9 mm 후방과 95.5 mm와 175.5 mm로 정하였으며 상세 치수는 Table 1에 표기하였다. 분사부에는 상하좌우에 직경이 2 mm인 4개의 분사구가 있으며 몸체에 위치한 분사부의 형상 차이에 따른 특성을 평가하기 위해 Fig. 3과 같은 서로 다른 2종의 분

사부를 사용하였다. 각각의 분사부는 공기 분사량을 독립적으로 조절 가능하도록 구성하고 ALICAT사의 MCR250SLPM 유량계를 사용하였으며 공동의 내부 압력은 캐비테이터 후방의 압력 계측 홀을 통해 절대압력센서(Kulite, ETM375)를 사용하여 계측하였다 (Fig. 4). 인공 초월공동의 발달 과정은 시험부 측면부와 상면부에 설치된 초고속 카메라(Photron사의 MiniUX100)를 사용하여 초당 5,000 프레임으로 기록하였다. 특히 그림자 기법(shadow image technique)으로 촬영한 초고속 영상 이미지를 분석하여 공동의 길이와 최대 직경을 평가하였으며 이때 부력효과로 인해 공동의 형상이 비대칭적으로 발달하기 때문에 초월공동의 길이(L_s)는 공동의 하단부가 몸체에 닿을 때의 거리로, 공동의 최대 두께(D_s)는 상부에서 촬영된 초고속 이미지를 기준으로 평가하였다.

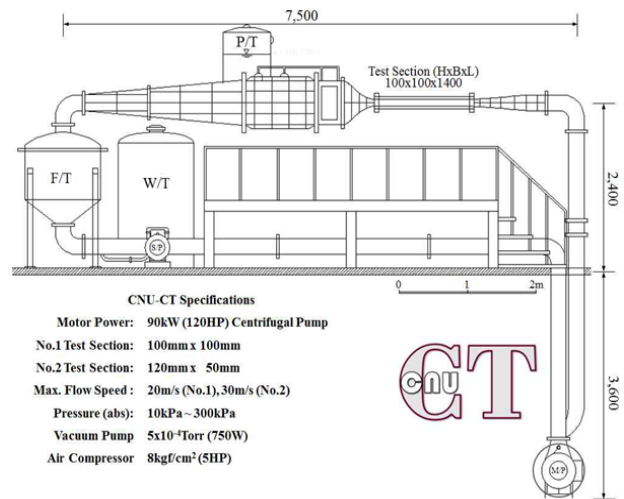


Fig. 1 CNU cavitation tunnel (CNU - CT)

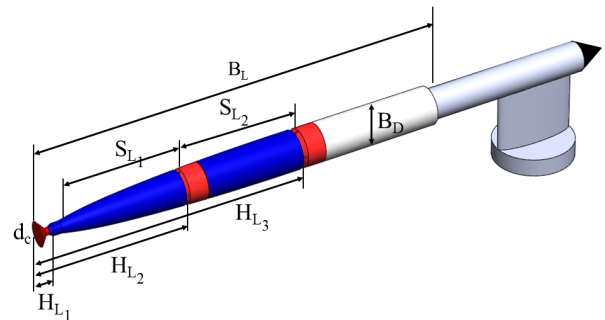


Fig. 2 Test model

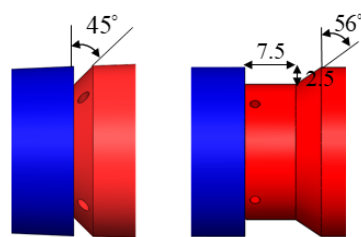


Fig. 3 Different shapes of the injection part

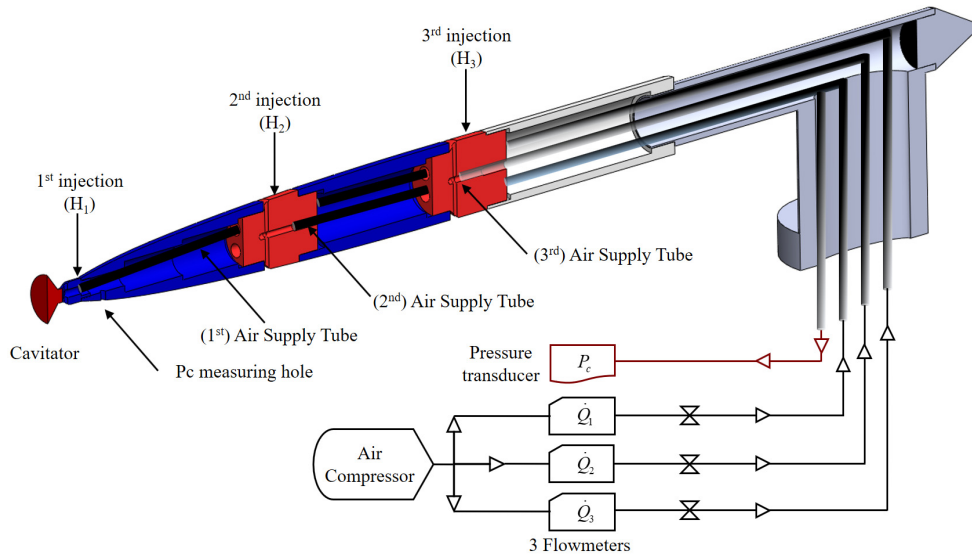


Fig. 4 Configuration of the test model and air injection unit

Table 1 Specifications of the test model

Part	Symbol	Size	Normalized by dc
Total length	BL	270 mm	28.72
Cavitator diameter	dc	9.4 mm	1.00
1st. Body length	SL1	80 mm	8.51
2nd. Body length	SL2	80 mm	8.51
Body diameter	BD	25 mm	2.65
Hole location from the front	HL1	9 mm	0.96
	HL2	95.5 mm	10.16
	HL3	175.5 mm	18.67

3. 결과 및 분석

3.1 인공 초월공동의 발생 메커니즘과 다중 분사 효과

Fig. 5는 원판형 캐비테이터 후류의 유동장과 초월공동의 발생 특성을 도식적으로 보여준다. 유입 유동방향에 수직인 캐비테이터 끝단에서 박리되는 유동은 캐비테이터와 몸체 전두부 사이의 공간에서 와류(vortex)를 형성하며, 그 주위는 상대적으로 낮은 압력장이 형성된다. 이때 캐비테이터 후방에 위치한 분사구로부터 유입되는 공기는 와류와 혼합되어 포말(foam) 상태의 균집을 이루는 공기방울 형태로 발생한다. 공기 분사량을 증가시켜 후류 유동장의 압력이 충분히 높아지면 캐비테이터 끝단을 지나는 유선을 따라 물체를 감싸는 투명한 공기 박막(thin membrane) 상태인 초월공동으로 발달한다. 이때 유체 동력학적 원리에 따라 유입유동과 초월공동의 상경계면의 압력은 동일하며, 초월공동이 생성된 상태에서의 공동 내부 압력(P_c)은 일정하게 유지된다. 인공 초월공동은 다음과 같이 정의되는 무차원수인 캐비테이션수(σ_c), 공기분사계수(C_q), 프루드수(F_n) 따라 발생 특성을 평가할 수 있다.

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

$$C_q = \frac{Q}{V_\infty d_c^2} \quad (2)$$

$$F_n = \frac{V_\infty}{\sqrt{gd_c}} \quad (3)$$

여기서, V_∞ , P_∞ 는 유입 유속과 압력이며 d_c , Q , P_c , g 는 각각 캐비테이터 직경(m), 체적유량(m^3/s), 공동 내부 압력(kPa), 중력가속도를 의미한다. 물수체의 이동 속도가 매우 빨라져 주위 압력이 유체의 증기압 보다 낮아지면서 발생하는 자연 초월공동에 비해 상대적으로 낮은 속도 조건에서 압축공기 분사를 통해 발생하는 인공 초월공동은 부력(buoyancy effect)을 받아 공동의 끝부분이 상승하여 몸체의 축 중심과 비대칭 형상을 띤다. 따라서 낮은 속도일수록 즉, 프루드수(F_n)가 작을수록 부력 효과가 강하게 나타난다. 이러한 현상은 인공 초월공동의 가장 대표적인 특성으로 캐비테이터 단독 모형을 대상으로 한 실험 연구를 통해 공동의 발달 특성과 부력효과 및 이력현상에 대해 자세히 규명된 바 있다 (Ahn et al., 2017). 초월공동 수중운동체는 궁극적으로 물체를 온전히 덮어 물과의 마찰력을 최소화함으로써 상대적으로 낮은 동력으로 고속 주행이 가능하도록 하는 것이다. 특히 인공 초월공동의 경우 자연 초월공동이 발생하기 이전의 속도 구간에서 물과의 마찰력을 줄이고, 캐비테이터 끝단에서 박리되는 유동에 의해 발생하는 불균일한 유체력을 감소시켜 운동 안정성을 향상시키는 효과가 있다. 본 연구는 Fig. 5에 도시한 것과 같이 부력효과를 받는 공동의 아랫면이 물체와 닫는 위치에서 추가 적으로 압축 공기를 분사시킴으로써 초월공동의 성장을 촉진시킬 수 있을 것이라는 아이디어에서 시작되었다. 또한 본 실험연구를 통해 여러 위치에서 다중으로

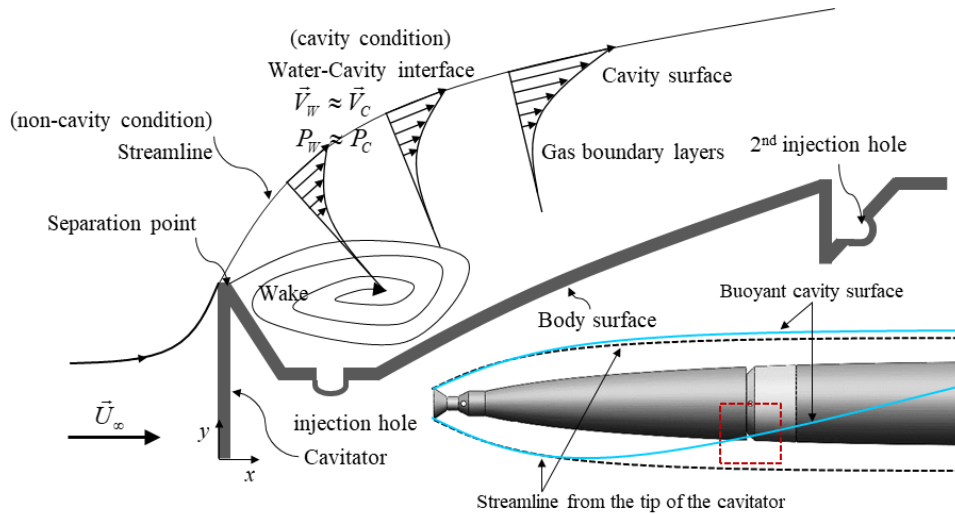


Fig. 5 Schematic view of supercavitating flow mechanism behind a disk-type cavitator

분사하는 경우 초월공동의 생성 및 발달에 미치는 효과를 평가하고자 하였다. 이 때 적합한 분사의 위치는 이전 실험연구를 통해 획득한 결과를 바탕으로 본 실험 모형의 형상과 크기를 고려하여 결정하였으며, 운동체 전두부의 끝 지점(H₁)과 원통형 몸체의 중간(H₂)에 분사부를 설치하였다.

3.2 실험 조건 및 단일 분사 초월공동 특성

실험은 유속 4, 6, 8 m/s 조건에서 각기 다른 위치에서 분사되는 공기의 양(공기분사계수, C_q)을 0.03 간격으로 조절하며 수행하였다. 유속별 최대 공기 분사량은 표준 온도(273.15K) 및 압력(101.325kPa) 상태에서의 분당 체적유량(Standard Liter Per Minute, SLPM)으로 Table 2와 같다.

먼저 몸체에 위치한 두 번째(H₂)와 세 번째 분사부(H₃)의 단 형상이 45°와 56°로 다를 때 발생하는 초월공동 특성을 평가하였다. Fig. 6은 F_n = 19.76 조건에서 C_q = 0.15로 동일한 공기량을 분사한 결과이다. 캐비테이터 후방에 위치한 첫 번째 분사부(H₁)에서만 공기를 분사한 경우 특정 크기의 초월공동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 H₂와 H₃ 분사부에서 각각 분사된 압축 공기는 공기방울 형태로 유출되며, 45°와 56°의 서로 다른 단 형상에 따른 분사 특성의 차이가 없음을 확인하였다. 캐비테이터 후방에 위치한 H₁을 통해 발생하는 초월공동과 달리 몸체에 위치한 분사부에서는 투명한 공기막을 형성하지 못하는 것은 상류에 위치한 캐비테이터 끝단을 지나는 유선을 기준으로 형성되는 와류 유동장으로부터 멀리 떨어져 있기 때문이다. 본 실험은 첫 번째 분사부를 통해 완전히 발달한 초월공동의 끝이

Table 2 Test conditions

V [m/s]	F _n	Q _{max} [SLPM]	C _q
4	13.17	3.3	0.06 ~ 0.15 [ΔC _q = 0.03]
6	19.76	5.0	
8	26.34	6.7	

두 번째 분사부의 위치에 있을 때 추가로 압축공기를 분사함으로써 공동 길이를 증가시킬 수 있는가를 규명하고자 하였으며, 이후 결과는 45° 분사단 모형에 대한 결과를 기준으로 분석 및 평가하였다.

Fig. 7은 각각의 유속 조건에서 첫 번째 분사부(H₁)에서만 공기량을 증가시킬 때 발생하는 초월공동의 특성을 보여준다. C_q = 0.06에서는 포말형태의 공동이 발생하다가 0.09부터는 투명한 초월공동이 발생한다. 포말형 공동에서 투명한 초월공동으로 성장하는데 필요한 공기량은 캐비테이터의 크기와 몸체 전두부의 형상 및 크기에 따라 형성되는 캐비테이터 후류의 압력장에 따라 결정된다. 유속이 증가함에 따라 즉, 프루드수가 증가함에 따라 부력효과는 작아지며 결과적으로 초월공동의 아랫면이 몸체에 닿는 길이가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 길이 변화의 정량적 특성은 다음 절, 다중 분사에 따른 초월공동 특성에 대한 결과와 함께 분석하였다.

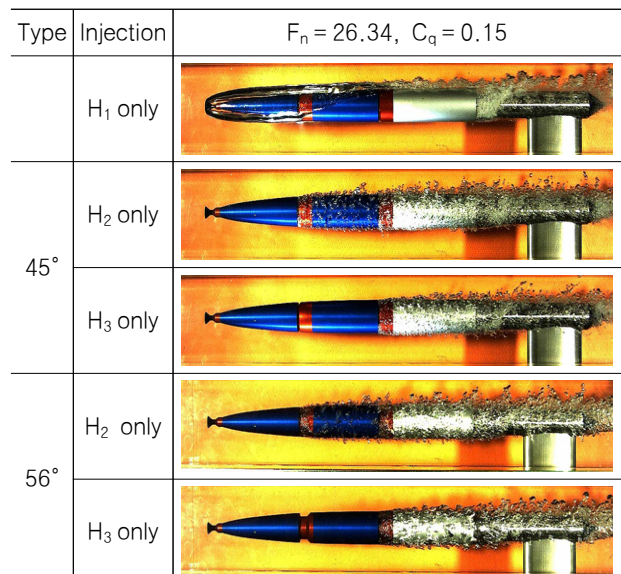


Fig. 6 Air flow from different injection parts and positions

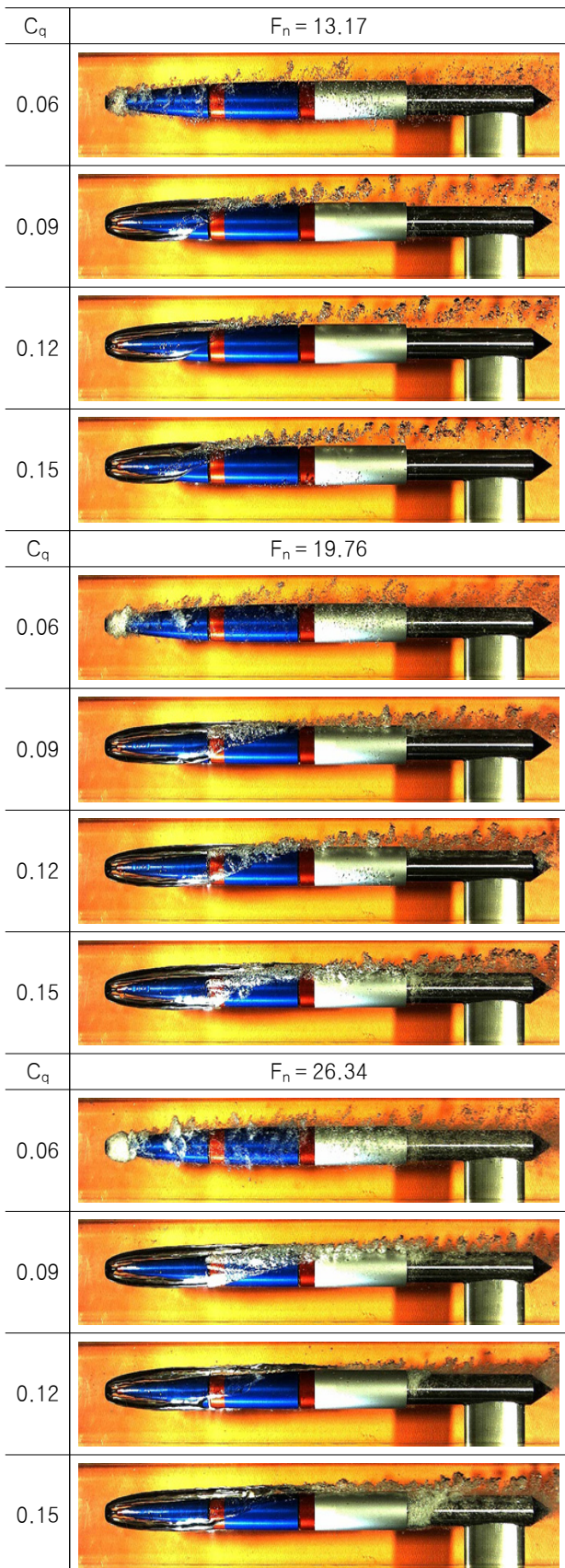


Fig. 7 Supercavitating flow by air injection from the 1st holes (H1) at different Froude numbers (Fn) and air injection coefficients (Cq)

3.3 다중 분사 초월공동 특성

Fig. 8은 해당 유속 조건에서 H_1 , H_1+H_2 , $H_1+H_2+H_3$ 과 같이 다중 분사 조합에 따라 발생하는 초월공동의 발생 특성을 비교하여 보여준다. 이때 각 분사부로부터 분사되는 공기량은 $C_q = 0.15$ 로 동일하며 본 실험에서의 최대 분사량에 해당한다. 다중 분사에 따른 초월공동의 형상 변화에 대한 고찰에 앞서, 분사량 변화에 따른 공동 내부 압력(P_c)의 계측 결과(Fig. 9)를 살펴보면, 상대적으로 분사량이 적은 때는 포말 상태의 공동이 발생하며 이때계측 위치에서의 압력은 터널 시험부 유동장의 압력과 같고, 분사량이 증가되어 $C_q = 0.09$ 에 이르면 투명한 초월공동이 생성되며 공동 내부의 압력은 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 즉, $C_q = 0.09$ 를 기준으로 포말 상태의 공동이 형성되는 구간과 완전 발달한 초월공동이 발생하는 구간이 구분되는 것을 알 수 있다. 이는 캐비테이터 및 몸체 전두부의 형상과 크기에 따라 다르게 형성되는 압력장의 특성에 따라 결정되는 값으로 캐비테이터 단면을 지나는 물의 체적유량($V_{\infty} d_c^2$)의 약 10%에 해당하는 공기를 분사하면 초월공동이 형성된다고 할 수 있다.

H_1 에서 분사된 압축 공기에 의해 초월공동이 발달한 이후 H_2 와 H_3 에서 공기량을 증가시키면서 추가적으로 분사를 하더라도 공동 내부의 압력은 변화가 없으며 결과적으로 캐비테이션 수는 일정하게 유지되는데, 이러한 결과는 Fig. 10을 통해서도 확인할 수 있다. $C_q = 0.06$ 에서는 포말 상태의 공동이 발생하며 분사량을 증가시켜 $C_q = 0.09$ 에 이르면 초월공동이 발생한다. 이 과정에서 식 (1)과 같이 정의된 캐비테이션수는 낮아져 최소 값에 도달하며, 이후 분사량을 증가시키더라도 캐비테이션수는 일정하게 유지된다. 즉, 공동 내부의 압력변화는 없음을 의미하며, 추가로 분사된 공기는 더 이상 공동 내부의 압력을 높이지 못하며 초월공동의 꼬리를 따라 후류로 유출된다.

다중 분사에 따른 초월공동의 형상 변화는 공동의 길이(L_s)와 최대 두께(D_s)로 평가하였다. Fig. 8의 H_1 분사의 경우를 살펴보면 유속이 증가할수록, 즉 프루드수가 증가할수록 부력효과는 작아져 결과적으로 공동의 길이(L_s)가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 공동의 길이 및 최대 두께의 정량적인 평가를 위해 각 실험조건에서 발생하는 초월공동 형상을 그림자 기법(shadow image technique)을 활용하여 초고속 영상으로 기록하고, 각각의 이미지를 비색분석법(colorimetric analysis method) 사용하여 초월공동 형상을 추출하였다. Fig. 11은 $F_n = 19.76$, $C_q = 0.09$ 조건에서 시험부의 측면과 상면에서 동기화 하여 기록된 초월공동의 그림자 형상을 보여준다. 캐비테이터 끝단으로부터 몸체와 닿는 측면 거리를 공동의 길이(L_s)로 계산하였으며, 상면 형상을 기준으로 공동의 최대 두께(D_s)를 계산하여 비교, 평가하여 하였다. Fig. 12는 다중 분사 조합에 따른 공동의 길이 변화의 결과이다. 가로 축은 각 분사부까지의 거리를 캐비테이터의 직경으로 무차원화한 값(H_i/d_c)이며, 세로축은 캐비테이터의 직경으로 무차원화한 공동 길이(L_s/d_c)의 값이다. H_1 에 비해 H_1+H_2 에서 분사하는 경우 공동의 길이가 증가하는 것을 알 수

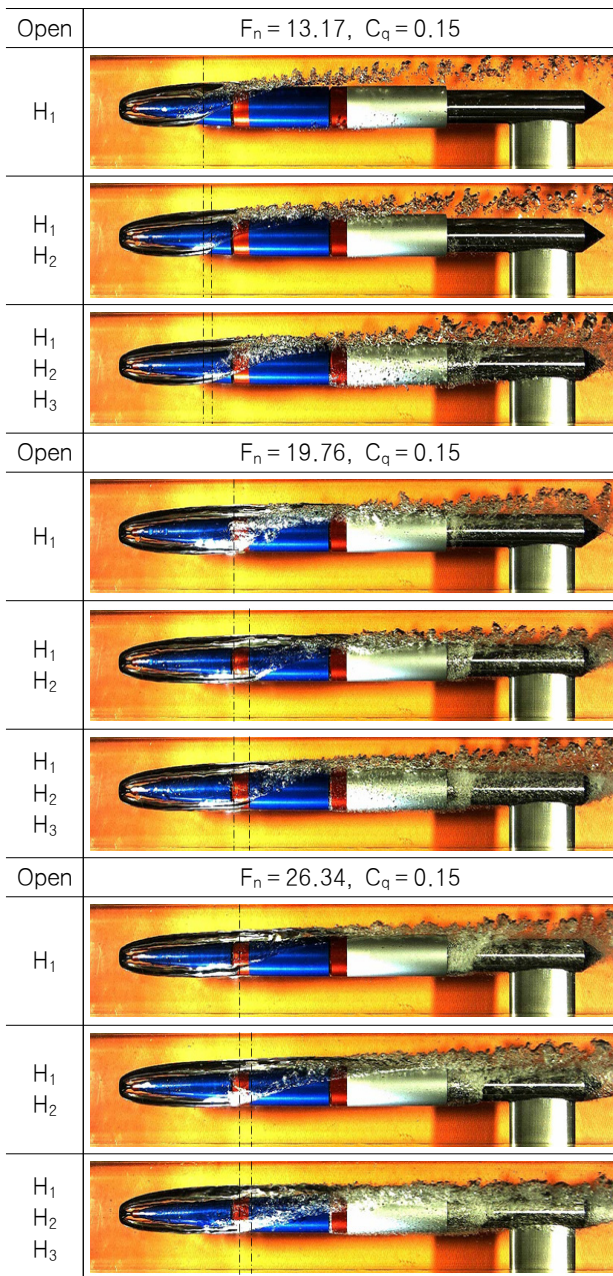


Fig. 8 Instantaneous multi-injected supercavitating flow at different Froude numbers (F_n) with the same air injection coefficients

있으며 $H_1+H_2+H_3$ 에서 분사하는 경우 길이 증가 효과는 거의 없음을 알 수 있다. H_1 에서 발생한 공동은 H_2 를 일부 또는 전부를 덮고 있으며, H_2 에서의 추가적인 분사로 인해 공동 길이가 증가한다. 반면 H_3 는 H_1 에서 발생한 공동이 덮지 못하고 유입 유동에 노출되어 있어 공동의 형상 변화에 영향을 미치지 못하고 후류로 유출된다.

H_1+H_2 분사에 의한 길이 증가 효과는 $F_n = 19.76$ 조건에서 가장 크게 나타나는데, 이때 H_1 분사를 통해 완전히 발달한 공동의 아랫면이 H_2 위치에 있을 때 추가적인 압축 공기 분사를 통해 가장 효과적으로 공동 길이를 증가시킬 수 있음을 보여준다. Fig. 13은 공동의 최대 직경을 캐비테이터 직경으로 무차

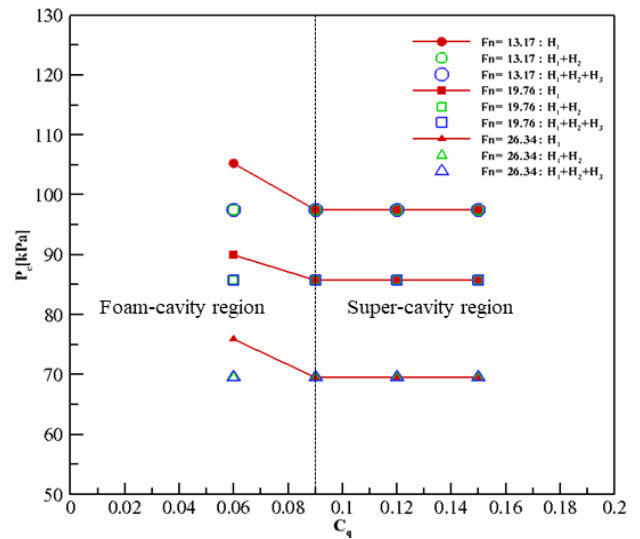


Fig. 9 Pressure inside the cavity versus air injection coefficient

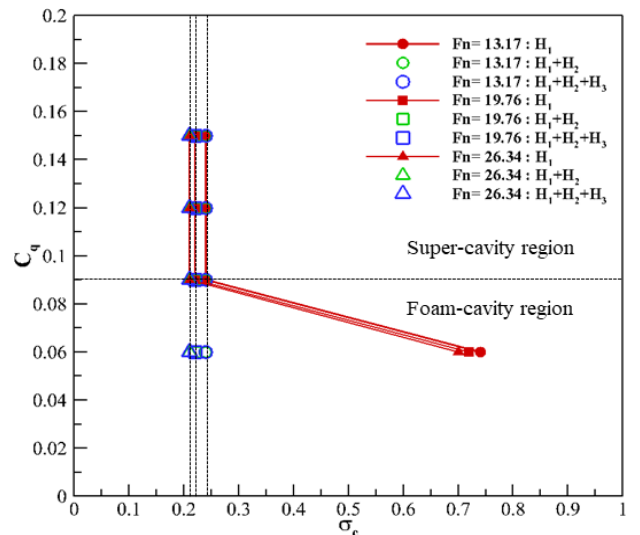


Fig. 10 Cavitation number versus air injection coefficient

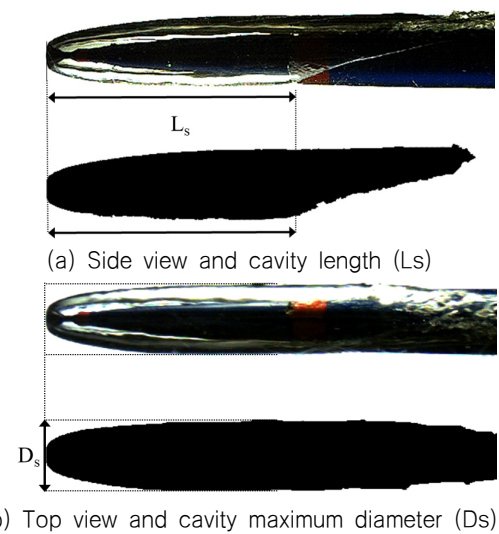


Fig. 11 Synchronized side and top view of the supercavity and subtraction using a colorimetric method

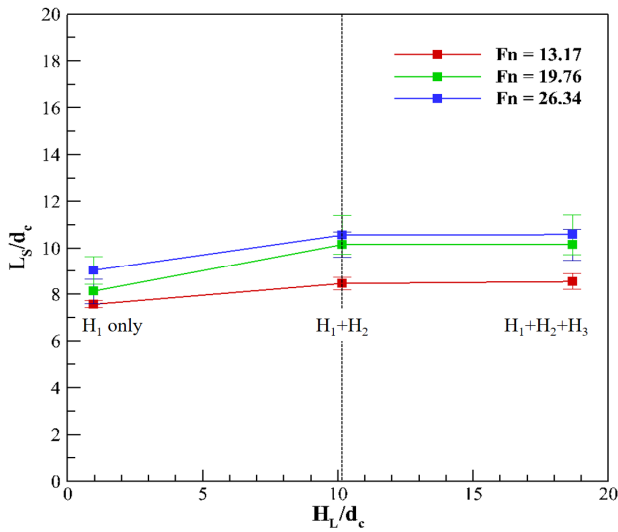


Fig. 12 Multi-injection effect: cavity length

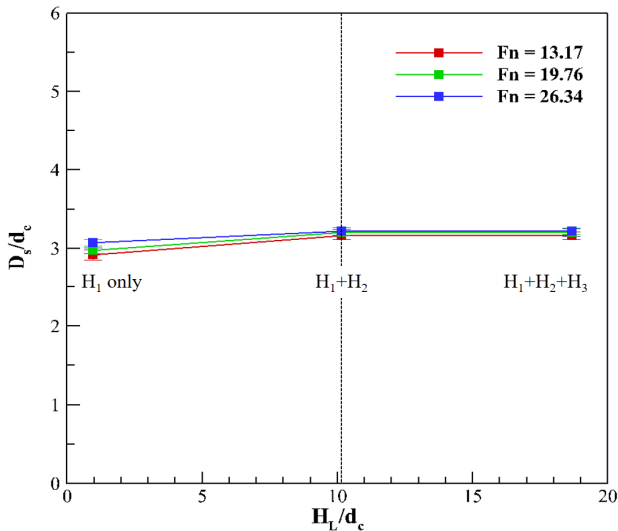


Fig. 13 Multi-injection effect: cavity diameter (max)

원화(D_s/d_c)한 결과로 다중 분사 시 공동 직경의 변화는 거의 없는 것으로 평가 할 수 있다. 이는 H_1 분사를 통해 최소 캐비테이션수에 도달한 상태에서는 추가로 공기를 분사하더라도 공동 내부의 압력 변화는 없기 때문에, 분사된 공기는 공동의 꼬리를 따라 유동방향(축방향)으로 유출되며 이때 유동방향 관성력을 증가시켜 길이가 증가한다고 설명할 수 있다.

4. 결론

본 실험 연구는 캐비테이터 후방에서만 압축공기를 분사하여 인공 초월공동을 발생시키는 기존의 방식을 개선하여 몸체의 서로 다른 위치에서 추가적으로 압축 공기를 분사하는 경우 발생하는 초월공동의 특성 변화와 성능을 평가하기 위한 목적으로 수행되었다. 유속을 변화시켜 가면서 다중 분사위치의 조합과 분사량 변화에 따른 초월공동의 발생 특성을 초고속 영상자료를 바탕으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 캐비테이터와 몸체로 구성된 수중 운동체의 경우 초월공동을 발생시키는데 필요한 공기량은 캐비테이터의 크기와 몸체 전두부의 형상 및 크기에 따라 형성되는 캐비테이터 후류 유동장의 압력에 따라 결정된다.
- 유속이 증가함에 따라 즉, 프루드수가 증가함에 따라 부력 효과는 작아지며 결과적으로 초월공동의 아랫면이 몸체에 닿는 길이가 길어지며, 캐비테이터 단면을 지나는 물의 체적유량($V_{\infty}d_c^2$)의 약 10%에 해당하는 분사량을 기준으로 포말 상태의 공동이 형성되는 구간과 완전 발달한 초월공동이 발생하는 구간이 명확하게 구분된다.
- 수중 운동체의 형상 특성과 운용조건을 고려하여 캐비테이터 후방뿐만 아니라 몸체에서의 다중 분사를 통해 초월공동의 길이를 약 12% 이상 증가시킬 수 있으며 결과적으로 해당 면적에 비례하는 물과의 마찰항력이 감소되어 추진효율을 증대시키고 최대 속도까지의 도달 시간을 감축시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 민군겸용기술개발과제(UM1406RD1)와 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019R1A2C1084306).

References

- Ahn, B.K. et al., 2015. Experimental study on artificial supercavitation of the high speed torpedo. *Journal of the KIMST*, 18(3), pp.300–308.
- Ahn, B.K. et al., 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.
- Jiang, Y., et al., 2019. Experimental investigation of drag characteristics of ventilated supercavitating vehicles with different body shapes. *Physics of Fluids*, 31, 052106.
- Jeong, S.W., Park, S.T., & Ahn, B.K., 2018. Experimental investigation of artificial supercavitation under periodic gust flows. *Journal of the KIMST*, 18(3), pp.300–308.
- Jeong, S.W., Park, S.T., & Ahn, B.K., 2019. An experimental study on artificial supercavitation generated by different combinations of the cavitator and body. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(4), pp.327–334.
- 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.

Kim, J.H., Jeong, S.W., Ahn, B.K. & Jeon, Y.H., 2016. A study on natural supercavitation and drag characteristics of axisymmetric cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(6), pp.465–472.

Shao, S. et al., 2017. A comparative study of natural and ventilated supercavitation across two closed-wall water tunnel facilities. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, pp.519–529.

