

수중 운동체 주변에 형성되는 환기 초공동(ventilated supercavitation) 현상 가시화

정재호* · 조연우†

Visualization of ventilated supercavitation phenomena around a moving underwater body

Jaeho Chung* and Yeunwoo Cho†

Abstract. A laboratory experiment was carried out to observe and visualize ventilated supercavitation phenomena around a moving underwater body which is attached to a newly designed high-speed (Max. 20 m/s) carriage system in a wave tank. Compared to the existing many other experimental studies using cavitation tunnels, where the body is at rest and the fluid is in motion in a bounded or closed environment, the present experimental study deals with super-cavity formation in unbounded or free-surface bounded environments, where the body is in motion and the fluid is at rest. Main attention is paid to the effective visualization of the steady-state cavity formations around a moving body and, those cavity formations are reported pictorially according to the body speed, ventilated air-pressure, and with or without a cavitator.

Key Words : Visualization(가시화), Ventilated supercavitation phenomena(환기 초공동 현상),
Moving underwater body(수중운동체)

1. 서론

수중운동체에 의한 초공동 (supercavitation) 현상은 고속 잠수정 및 고속 어뢰 등 수중에서 고속으로 이동하는 물체 주위에서 발생하는 현상이다. 수중에서의 압력이 증기압 (vapor pressure) 보다 낮아지게 되면 수중에서 공기 방울이 발생하게 된다. 수중운동체가 고속으로 주행하게 되면 운동체 주위의 압력이 낮아지면서 공기 방울을 발생 (공동 현상)시키게 되며, 이러한 공기 방울이 수중운동체를 완전히 뒤덮게 되는 현상을 초공동현상이라 한다¹⁾.

본 연구에서는 기존의 실험 방법과는 다르게 수중운동체를 직접 이동시키면서 촬영을 하는 새로운 방법으로 초공동 현상을 가시화 하였다. 그 동안 여러 방법에 의한 실험적 연구를 통하여 다수의 연구 결과가 발표되었으며, 이

는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1950년도 전후로 초공동현상에 대한 이론 및 실험 연구가 진행되었으나, 대부분 2차원 날개형 물체 주변에서 생기는 초공동현상에 대해 연구가 진행되었으며, 실험 연구는 고정된 물체 주변으로 유체를 흐르게 하는 회류수조 방식으로 진행되어 2차원 물체의 초공동현상에 대한 이론을 증명하였다²⁾. 1960년도에서 1990년도 사이에는 수중운동체에 의한 초공동현상 보다는 수중 프로펠러에서 발생하는 초공동 현상에 대한 연구가 주로 진행되었으며, 2000년대 이후 고속 잠수정, 고속 어뢰 등에 대한 관심이 높아지면서 다시 수중운동체에 의한 초공동현상이 관심을 받게 되었다.

2000년대 이후, 탄약 (gun powder)을 사용하여 총알 형태의 수중운동체를 빠르게 이동시킬 때 발생하는 초공동 현상에 대한 실험 연구가 실행되었으며 이는 고정된 여러

† 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

E-mail : ywoocho@kaist.ac.kr

* 한국과학기술원(KAIST) 기계항공공학부

해양시스템 대학원

대의 일반 및 고속 카메라에 의해 촬영되었으며, 1,000 m/s 전후의 초고속 수중운동체에 의한 충격파 (shock wave)를 관측하는데 성공하였다⁴⁾.

이후, 고정된 물체 주변으로 유체를 흐르게 하는 회류수조를 이용한 초공동 현상 실험이 다수 이루어졌으며, 공기가 분사되지 않는 자연 초공동 (natural supercavitation) 현상⁴⁾과 공기가 분사되는 환기 초공동(ventilated supercavitation) 현상에 대한 실험이 회류수조에서 이루어졌다⁵⁾. 회류수조를 이용한 자연 초공동 현상 실험에서는 주로 캐비테이터 (cavitator)의 유무 또는 형상에 따라 생성되는 초공동 현상의 다양한 형태를 관측하여 기존 이론과 비교 연구를 진행하였다. 회류수조를 이용한 환기 초공동 현상 실험에서는 공기의 체적 유량에 따른 초공동 현상의 물리적 현상을 관찰하였다⁶⁾.

회류수조는 관내에 고정된 물체 주변으로 유체가 흐르는 방법을 이용한 수조로서, 상하좌우가 막혀있는 관내 유동이며, 물체가 이동하는 것이 아닌 유체가 이동하는 이유로 실제 상황과 다르다는 단점이 있다. 본 연구에서는 수면이 존재하는 유체 내에서 유체를 흐르게 하는 방식이 아닌, 물체를 이동시키는 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 길이 192 m의 수조에 고속으로 이동 가능한 레일 시스템을 장착 후, 레일 시스템에 수중운동체와 카메라를 부착하여 함께 주행시키며 초공동 현상 연구를 진행하였다. 이를 위해 고속 레일 시스템을 자체 제작하였으며 수중운동체에 환기 장치를 결합하여 환기 초공동 현상을 관측하였다. 수중운동체와 카메라를 동시에 이동시키며 촬영함으로써, 초공동화 수중운동체의 수중 실주행 특성에 대해 연구하였다.

본 실험 연구는 한국과학기술원(KAIST) 초공동 수조 실험실에서 수행되었다.

2. 실험 환경

본 연구에서 사용된 실험 수조는 실주행 하는 수중운동체에서 발생하는 초공동 현상을 가시화하기 위한 목적으로 특수제작 되었다. 길이 192 m, 폭 1 m, 높이 1 m의 수조 위에 고속 레일 시스템을 장착 한 후, 고속 레일 시스템에 카메라 지지대를 부착하여 수중운동체와 카메라가 같은 속도로 주행하며 초공동 현상을 가시화하는 방법을 고안하였다. Fig 1은 초공동 실험 수조의 개념도를 보여 주고 있다.

레일 시스템은 모터 동력기관을 포함한 차량 형태의 본체 양 측면으로 지지대를 설치하여 수조 양 측면 상단에

수조 길이 방향으로 위치한 레일봉 가이드를 따라 주행하도록 제작하였다. 레일 시스템 하단으로는 수중운동체를 지지하는 ‘C’자형 지지대를 설치하여 수중운동체를 장착하였으며, 레일 시스템 측면으로 카메라 지지대를 장착하여, 상기 수중운동체와 동일한 높이에 카메라를 설치하여 수중운동체와 카메라가 동시에 주행하며 초공동 현상을 가시화 하는 연구를 진행하였다.

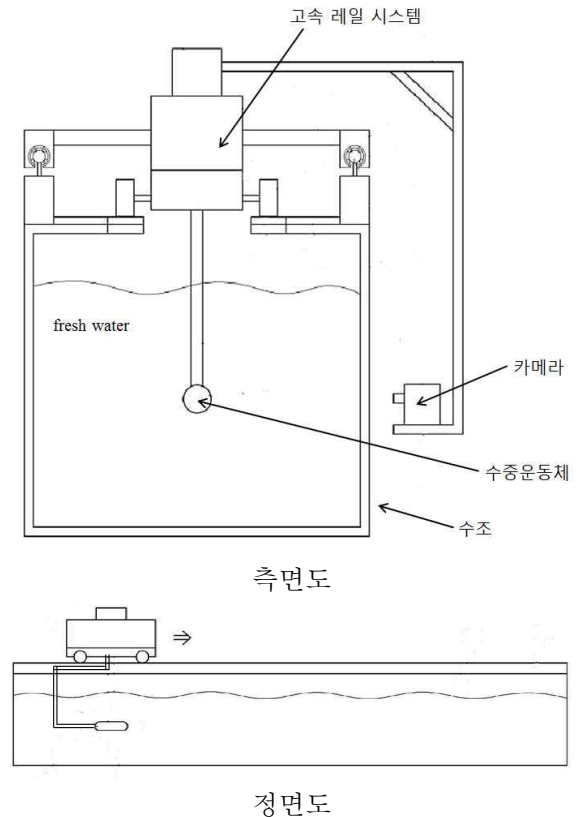


Fig. 1. Schematic of supercavitation water tank

Fig 2는 본 실험 연구가 진행된 초공동 수조를 보여 주고 있다. 수조의 한 측면은 관측을 위해 투명한 유리로 제작하였으며, 다른 측면은 빛에 의한 반사를 제거하기 위하여 검정색 시트지를 부착하였다.



Fig. 2. Supercavitation water tank (KAIST)

Fig 3은 본 실험 연구에서 사용된 수중운동체의 형상을 보여주고 있다. 수중운동체는 어뢰의 형상을 단순화한 형태로 제작되었다. 본 연구에서는 두 종류의 수중운동체로 실험을 진행하였으며, 위 그림은 캐비테이터(cavitator)를 장착하지 않은 수중운동체이며, 아래 그림은 캐비테이터를 장착한 수중운동체이다. 수중운동체의 재질은 알루미늄을 사용하였다. 캐비테이터를 제외한 타원형 수중운동체의 크기는 길이 75 mm, 지름 30 mm로 동일하며 캐비테이터의 크기는 길이 15 mm, 지름 10 mm의 'T'자형으로 제작하였다.

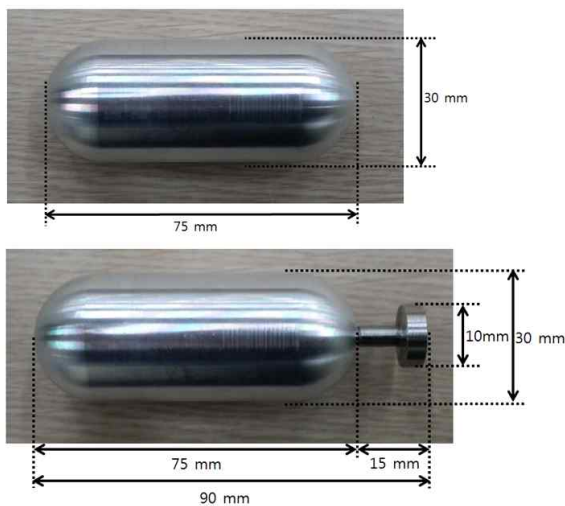


Fig. 3. Test bodies

환기 초공동 현상 실험에서는 캐비테이터를 장착하지 않은 경우, 수중운동체의 주행방향 앞 입구 부분에서 공기가 분사되며 캐비테이터를 장착한 수중운동체의 경우, 캐비테이터와 수중운동체를 연결해 주는 'T'자형 원통형 부분에 90° 간격 네 방향으로 뚫려있는 지름 1 mm 구멍에서 공기가 분사된다.

Table 1. Specification of the camera

Model	Sony HDR-AS100V
Max. Frame Rate	240 fps
Max. Resolution	1,920 × 1,080
Max. Resolution at Max Frame fps	800 × 480
Sensor Type	Exmor R CMOS
Lens	ZEISS TESSAR

본 연구에 사용된 카메라는 레일 시스템에 연결된 지지대에 장착되어 수중운동체와 함께 주행하며 촬영을 할 수

있는 240 fps의 액션캠(Action Cam)이 사용되었으며 사양은 Table 1에 표시하였다.

3. 연구 결과

초공동 현상은 캐비테이션수(Cavitation number, $\sigma_c = 2(p_\infty - p_c)/\rho U_\infty^2$)가 0.1보다 작을 때 일어난다⁽⁷⁾. p_∞ 는 기준 압력(reference pressure)이며 p_c 는 증기 압력(vapor pressure), ρ 는 유체의 밀도, U_∞ 는 유동 속도(free-stream velocity)를 나타낸다. 초공동 현상을 구현하기 위해서는 세 가지 방법이 있다. 첫째는 유동 속도를 높이는 방법이며, 둘째는 기준 압력을 낮추는 방법이고, 셋째는 증기 압력을 높이는 방법이다. 본 실험 연구에서는 초공동 현상을 구현하기 위해 환기(ventilation) 장치를 사용하여 증기 압력을 높이는 방법을 사용하였다.

본 실험 연구에서 수중운동체의 속도는 2.5 m/s, 3.0 m/s, 4.0 m/s, 5.0 m/s로 네 가지 케이스로 나누었으며, 환기 장치를 통하여 분사되는 공기의 압력은 계기압력(gauge pressure)기준 0.1 MPa, 0.3 MPa으로 하였고, 수중운동체의 수심은 0.2 m로 하였다.

Fig 4는 캐비테이터를 장착한 수중운동체가 환기 공기 압력이 0.1 MPa일 때, 주행 속도에 따른 공동 현상의 형태를 보여주고 있다. 속도가 증가함에 초공동이 크게 발달하는 것을 확인하였으며 초공동의 형태는 점차 타원에 가까워지는 것을 관찰하였다.

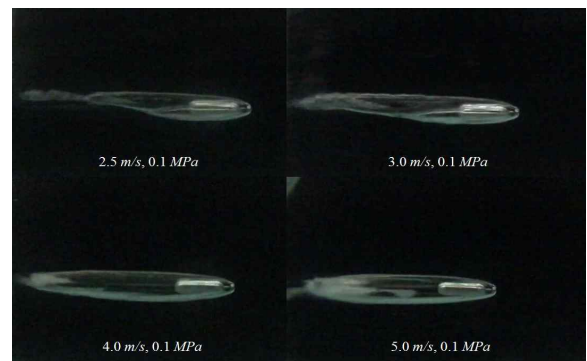


Fig. 4. Ventilated supercavitating body with the cavitator (0.1 MPa)

Fig 5는 캐비테이터를 장착한 수중운동체가 환기 공기 압력이 0.3 MPa일 때, 주행 속도에 따른 공동 현상의 형태를 보여주고 있다. 공기 압력이 0.1 MPa일 때와 비교 시, 초공동 길이와 폭이 약간 더 크게 발생하는 것을 확인하였으며, Fig 4와 Fig 5에서 공통적으로 속도가 증가함

에 따라 초공동의 꼬리 부분이 위쪽 방향에서 평행 방향으로 내려가는 것을 확인하였다.

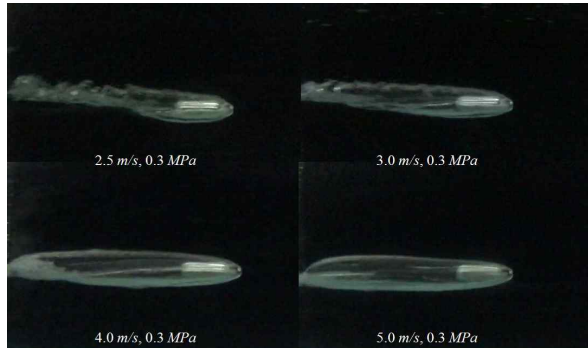


Fig. 5. Ventilated supercavitating body with the cavitator (0.3 MPa)

Fig. 6과 Fig. 7은 캐비테이터를 장착하지 않은 수중운동체의 환기 공기 압력 0.1 MPa, 0.3 MPa일 때의 형상을 보여주고 있다. 캐비테이터를 장착한 수중운동체의 경우와 비교 시, 전체적으로 초공동이 잘 발달하지 않는 것을 확인하였다. 또한, Fig. 4, Fig. 5와 비교 시, 캐비테이터가 없는 경우에는 환기 압력이 초공동 현상 발생 여부에 큰 영향을 주는 것을 관측하였다.

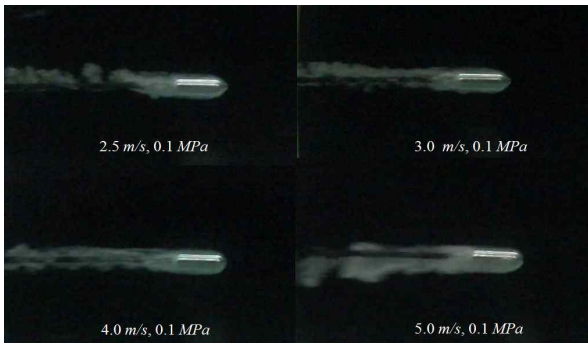


Fig. 6. Ventilated supercavitating body without the cavitator (0.1 MPa)

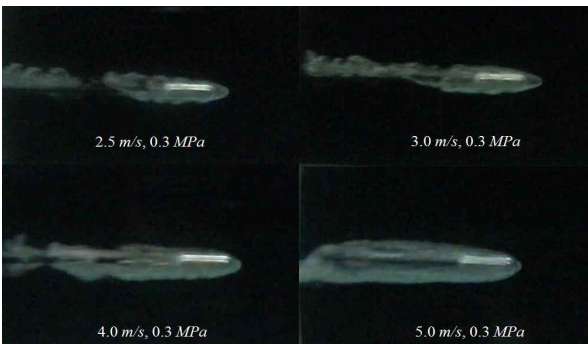


Fig. 7. Ventilated supercavitating body without the cavitator (0.3 MPa)

4. 결 론

국내의 최초로 초공동화 수중운동체의 실주행시 현상에 대해 실험적으로 분석하였다. 캐비테이터의 유무, 주행 속도, 환기 공기 압력의 변화에 따른 초공동 현상을 가시화하였고, 다음의 현상들을 실험을 통해 확인하였다. 캐비테이터의 유무가 낮은 환기 압력에서는 초공동 발달에 밀접한 관련이 있음을 확인하였고, 어느 조건에서든 주행 속도는 초공동 발달에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 환기 압력의 경우, 캐비테이터가 없는 경우에 초공동 발달에 영향을 크게 주는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2014R1A1A1002441)

REFERENCES

- 1) May, A., 1975, "Water entry and cavity-running behavior of missiles", National Technical Information Service U. S. Department of Commerce, Technical Report 75-2.
- 2) Tulin, M. P., 1960, "Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies", David Taylor Model Basin, Report 834.
- 3) Waid, R. L., 1957 "Water tunnel investigation of two-dimensional cavities", California Institute of Technology, Report E-73.6.
- 4) Hrubec, J. D., 2001, "High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles", Experiments in Fluids, Vol. 30, pp.57-64.
- 5) Ahn, B. K., Lee, T. K., Kim, H. T. and Lee, C. S., 2012, "Experimental investigation of supercavitating flow", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 4, pp.123-131.
- 6) Wosnik, M., Schauer, T. J. and Arndt, R. E. A., 2003, "Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle", Fifth International Symposium on Cavitation, OS-7-008, pp.1-7.
- 7) Franc, J. P. and Michel, J. M., 2010, Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.97-130.