

원판 캐비테이터의 환기 초공동에 대한 실험적 연구

김병진·최정규·김형태†
충남대학교 선박해양공학과

An Experimental Study on Ventilated Supercavitation of the Disk Cavitator

Byeung-Jin Kim·Jung-Kyu Choi·Hyoung-Tae Kim†
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University

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 paper, the experimental equipments for ventilated supercavitation in cavitation tunnel is constructed and the basic data of ventilated supercavitation regard to the entrainment coefficient and Froude number is fulfilled. The experiments are conducted for the disk cavitator with injecting air and the pressure inside cavity and the shape of cavity are measured. As the entrainment coefficient increases while the Froude number is kept constant, the ventilated cavitation number decreases to a minimum value which decreases no more even with increasing the air entrainment. The minimum value of ventilated cavitation number, caused by the blockage effect, decreases according to increasing the diameter ratio of test section to cavitator. The cavity length is rapidly enlarged near the minimum cavitation number. In low Froude numbers, the cavity tail is floating up due to buoyancy and the air inside the cavity is evacuated from its rear end with twin-vortex hollow tubes. However, in high Froude numbers, the buoyancy effect is almost negligible and there is no more twin-vortex tubes so that the cavity shape becomes close to axisymmetric. In order to measure the cavity length and width, the two methods, which are to be based on the cavity shapes and the maximum width of cavity, are applied. As the entrainment coefficient increases after the ventilated cavitation number gets down to the minimum cavitation number, the cavity length still increases gradually. These phenomenon can be confirmed by the measurement using the method based on the cavity shapes. On the other hand, when the method based on the maximum width of cavity is used, the length and width of the cavity agree well with a semi-empirical formular of natural cavity. So the method based on the maximum width of cavity can be a valid method for cavitator design.

Keywords : Ventilated cavitation(환기 공동), Supercavitation(초공동), Cavitator(캐비테이터), Cavitation tunnel(캐비테이션 터널)

1. 서론

수중운동체의 속도를 높이기 위한 다양한 기술들이 연구되어 왔으며, 속도 증가에 따른 마찰 및 압력항력의 증가를 극복하기 위해 최근 들어 초공동 어뢰 및 초공동 수중실탄 등 초공동(supercavitation)을 이용하는 기술이 부각되고 있다. 이 기술의 핵심은 의도적으로 초공동을 발생시켜 수중운동체를 감싸게 되면 물체 표면이 기체와 접촉하게 되어 마찰항력을 줄임으로써 전체적인 항력을 감소시켜서 고속 항주를 가능하도록 하는 것이다. 초공동 수중운동체의 선두 주자는 러시아의 초고속 어뢰인 Shkval을 들 수 있으며, 수중에서 약 200노트의 속도로 진행되는 것으로 알려져 있다. 통상적인 어뢰의 최고속도가 40노트 내외임을 감안하면 이는 매우 빠른 속도이다.

초공동을 발생시키기 위해서 수중운동체 머리에 캐비테이터를 장착하며, 충분히 낮은 공동수(cavitation number) 조건에서 자연 초공동(natural supercavitation)이 발생하므로 공동수를 낮추기 위해서는 속도가 매우 빠르거나 운동체 주변의 압력이 상당히 낮게 형성되어야 한다. 실제 운항 중에 이러한 조건을 만들기 위해서는 로켓추진 등을 통해 속도를 높여야 하는데, 발사 초기의 낮은 속도에서는 공동이 물체를 충분히 감싸지 못하므로 가속을 위해 큰 항력 증가를 감수해야 한다. 또 방향 전환 등의 특정 상황에서도 초공동 형상을 유지할 수 있는 기술이 요구된다. 따라서 초공동 수중운동체는 자연 초공동이 충분히 발생하지 않거나 안정되게 유지하기 어려운 상황에서도 초공동의 발생을 촉진시키고 형상을 안정적으로 유지할 수 있어야 하며, 이를 위한 것이 환기 초공동(ventilated supercavitation) 발생 기술이다.

환기 초공동은 캐비테이터 뒤에서 노즐 또는 흡을 통해 가스

를 분사하여 초공동을 인위적으로 형성시키는 것으로서 공동내부의 압력을 높여 무한 원방의 압력과 상대적인 차이를 작게 함으로써 자연 공동이 형성되지 않는 낮은 속도에서도 낮은 공동수 조건을 만들어 준다. 환기 초공동은 자연 초공동에 비해 압력 및 속도 조건의 제약이 크지 않고, 초공동 형상을 비교적 안정적으로 유지할 수 있으므로 수중운동체 고속화를 위한 핵심기술이 될 것으로 전망된다.

지금까지 환기 초공동에 대한 연구는 자연 초공동에 비해 아직까지 활성화 되지 못한 실정이지만 공기 유출량에 대한 해석적 연구 (Spurk, 2002; Michael, et al., 2009)와 실험적 연구 (May, 1975; Campbell & Hilborne, 1958; Kawakami, 2010; Schauer, 2003; Kim, et al. 2014)가 수행 되었다. 초공동 수중운동체에 관한 연구는 대부분 군사적 목적으로 초공동 어뢰 등의 개발을 위한 것이어서 자료의 공개가 제한적이며, 특히 국내에서는 최근 들어 자연 초공동을 대상으로 한 실험적 연구 (Ahn, et al., 2012; Ahn, et al., 2010)와 수치해석적 연구 (Lee, et al., 2013; Kim, et al., 2013; Kim & Lee, 2014; Kim & Kim, 2014)가 점점 활성화 되는 추세이지만 환기 초공동에 대해서는 Kim, et al. (2014)의 실험적인 연구결과가 유일한 형편이다.

초공동 형상을 촉진하고 유지할 수 있는 분사량이나, 유체속도 등의 추정에 관한 연구는 초공동 수중운동체 설계에 있어서 매우 중요하므로 실험을 통한 이론검증 및 설계에 반영할 만한 자료 확보 측면에서 반드시 필요한 연구로 사료된다. 따라서 공기 분사량과 공동수 및 형상에 대한 관계를 정립하고 소요분사량 추정 방법을 확립해야하며 분사시스템의 설계를 위한 자료의 축적이 선행되어야 한다. 특히 국내에서 캐비테이션 터널에서의 환기 초공동 실험은 아직 초기 단계이므로 실험 시스템의 구축과 설계에 활용이 가능한 기초자료의 확보가 시급히 요구된다.

본 논문에서는 환기 초공동 실험을 위해 캐비테이션 터널에서 급기, 공동내부압력 및 형상 계측 등의 실험 시스템을 구축하고, 원판 캐비테이터를 대상으로 공기 분사량과 유동속도의 조합에 따른 환기 초공동 실험을 수행하였다. 압력 및 형상 계측을 통해 환기 초공동 유동의 특성, 차폐효과 및 공동수와의 관계에 대해 조사하고, 공동수와 공동 형상 특성에 대해 논의하였다.

2. 환기 초공동 실험방법

2.1 환기 초공동 실험 장치

환기 초공동 실험은 충남대학교 선박해양공학과에서 보유하고 있는 캐비테이션 터널에서 수행 되었으며 개략적인 구성도와 제원을 Fig. 1에 나타내었다. 본 캐비테이션 터널은 폐쇄형 고속 터널로서 시험부 크기는 높이 0.1 m, 폭 0.1 m, 길이 1.4 m이며, 진공펌프를 이용한 가압 및 감압이 가능하다. 유속은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수축부(P_1) 및 시험부 시작 위치(P_2)에서의 차압으로부터 얻을 수 있고, 최대 유속은 20 m/s이다.

압력계는 0~300 kPa 범위에서 절대압력을 계측하는 Proviso사의 PR-21 압전저항식 절대압력계(Fig. 2(a))이다. 속도 계측을 위한 수축부(P_1) 및 시험부(P_2)와 공동내부 압력 계측을 위한 캐비테이터 뒤쪽(Fig. 4, P_3) 등 3개의 압력계를 설치하였으며, 압력계는 수두를 이용한 교정실험을 통해 비선형성(non-linearity) $\pm 0.003\%$ 이내, 이력성(hysteresis) $\pm 0.002\%$ 이내로 압력계측에 적합함을 확인하였다.

캐비테이터 뒤쪽에서 공기를 분사하는 급기장치는 유량조절을 위한 유량계와 압력을 가해주는 컴프레서로 구성된다. 컴프레서는 3.5마력으로서 탱크용량은 40리터이다. 유량계(Fig. 2(b))는 분당 최대유량 60리터이며, 최대 유량의 1%씩 조절할 수 있고, Bronkhorst사의 열식 질량 유량계(F-201AC-FGVB-22-V)를 사용하였다.

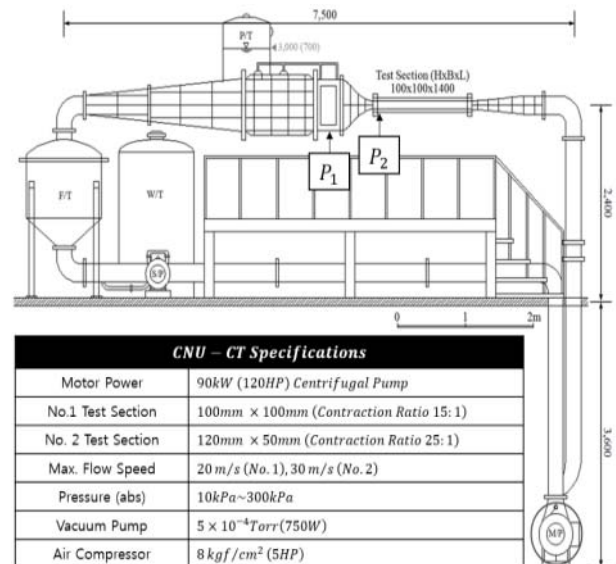


Fig. 1 Schematic diagram of CNU cavitation tunnel

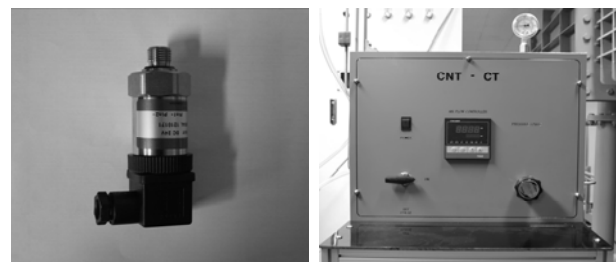


Fig. 2 (a) Pressure sensor, (b) Flow meter

2.2 실험 방법

환기 초공동 실험을 위한 장치 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 스트럿과 몸체로 구성된 취부는 터널 시험부 측면에 부착되며, 몸체 머리에 원판 캐비테이터(disk cavitator)를 고정하였고, 캐비테이터의 교체가 가능한 볼트형 구조이다. 캐비테이터 뒤쪽 부분에 8개의 직경 2 mm 원형 공기구멍이 2열로 배치되고, 스트럿과

몸체 내부 공간을 통해 공기를 공급하여 구멍으로 분사된다. 공기구멍 뒤쪽 몸체에 공동내부압력의 계측을 위한 압력홀(P_3)이 있으며 튜브로 압력계와 연결된다.

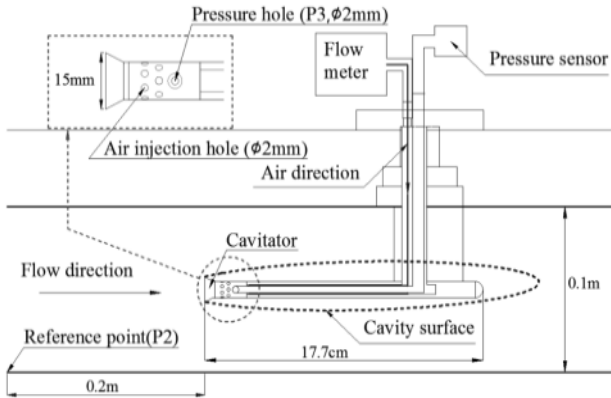


Fig. 3 Schematics for experiment of ventilated cavitation

본 실험에서 압력은 터널 수축부(P_1)와 시험부 입구(P_2) 그리고 캐비테이터 뒤 몸체(Fig. 3, P_3)에서 절대압력계를 이용하여 계측하였다. P_1 과 P_2 는 시험부 유속을 결정하고, P_2 와 P_3 는 환기 공동수를 결정하므로 모든 압력계의 기준 시점을 일치시켜 60 Hz의 샘플링으로 데이터를 취득하였다. 각 위치에서의 압력은 일정한 공기 분사량으로 5분 동안 분사하여 환기 공동이 충분히 발달한 후 10초 동안 취득한 값을 시간에 대해 평균하여 얻었다.

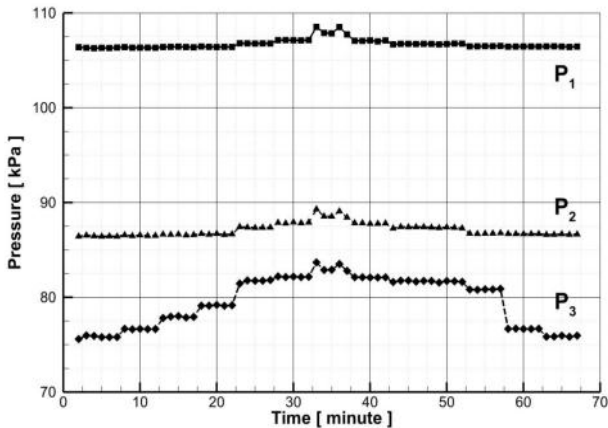


Fig. 4 Example of pressure measurements according to volume rate of injected air

Fig. 4는 대표적으로 직경 15mm인 캐비테이터를 대상으로 유속 8m/s인 경우에 대해 계측된 압력 결과 값을 나타낸 것이다. 분사량 변화에 따라 단계적으로 압력이 변화함을 볼 수 있으며, 분사량이 유지되면 압력도 일정하게 안정되는 것을 확인하였다.

환기 초공동의 형상은 공동의 길이 및 폭으로 대표될 수 있으며, 길이 및 폭의 계측은 주로 카메라를 이용한 순간 영상을 분석하는 방법이 사용되고 있다. 본 실험에서는 공동의 영상을 얻기 위하여 측면(side) 및 상면(top)에 디지털 카메라(Cannon

D90)를 배치하여(Fig. 5) 상하좌우의 형상을 모두 확인할 수 있도록 하였으며, 공동 형상의 계측은 측면 카메라로부터 얻은 영상을 바탕으로 수행하였다. 공동의 영상은 공동내부압력이 거의 변하지 않고 공동수 및 공동 형상이 안정된 상태에서 환기 공동 내부압력을 계측하기 시작한 시점으로부터 0.25초 간격으로 연속적으로 얻었다(Fig. 6). 영상으로부터 공동의 길이 및 폭을 도출하기 위해 0.25초 간격의 영상 4장을 합성하고, 캐비테이터면과 중심축이 만나는 점을 원점으로 하는 xy평면에서 물과 공기 사이 경계면의 좌표 데이터를 취득하였다. 윗면과 아랫면에서 명확히 확인되는 형상까지의 데이터를 각각 4차 스플라인 보간(Fig. 7)한 후에 각 스플라인 선을 연장하여 만나는 점을 공동 단함으로 하고, 이 형상으로부터 공동의 길이 및 최대 폭을 도출하였다.

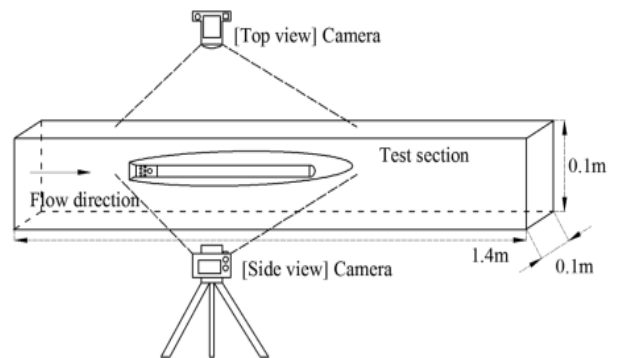


Fig. 5 Camera set-up to take images of ventilated cavity shape

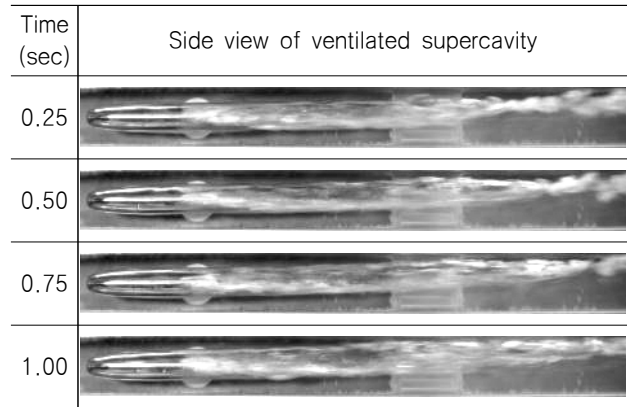


Fig. 6 Photographs at each 0.25 second interval for a composite image

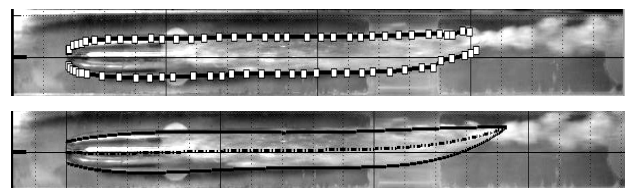


Fig. 7 Estimation scheme of ventilated cavity shapes (up : surface measuring, down : 4th order spline)

3. 환기 초공동 실험 결과 해석

3.1 주요 무차원 변수

수중에서 고속으로 운동하는 물체 주위의 압력이 물의 증기압 (vapor pressure, P_v) 보다 낮아지면 통상 물속에 존재하는 공동 핵(cavitation nuclei)이 기포로 확대되고 물이 증기로 상변화 하면서 공동이 발생하는데 이를 자연 공동(natural cavitation)이라 한다. 자연공동 현상의 가장 중요한 지표는 자연 공동수(natural cavitation number, σ_v)로서 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\sigma_v = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (1)$$

이 식에서 P_0 는 무한원방의 압력, P_v 는 유체의 증기압력, ρ 는 액상 유체의 밀도, 그리고 U_0 는 유체(또는 물체)의 속도이다.

한편 환기 공동(ventilated cavitation)은 캐비테이터 뒷면에서 주입되는 공기에 의해 형성되며, 이때의 환기 공동수(ventilated cavitation number, σ_c)는 식 (2)와 같이 정의한다. 여기서 P_c 는 공동내부압력을 의미한다.

$$\sigma_c = \frac{P_0 - P_c}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (2)$$

환기 초공동에 미치는 중력의 영향을 가늠하는 지표로 관성력과 중력의 비를 나타내는 Froude 수(F_n)는 캐비테이터의 직경을 이용하여 식 (3)과 같이 정의하여 사용한다.

$$F_n = \frac{U_0}{\sqrt{gd_c}} \quad (3)$$

식 (3)에서 g 는 중력 가속도, d_c 는 캐비테이터의 직경이다. 또한 공기분사량계수(entrainment coefficient, C_q)는 환기 초공동 유동의 특성을 규정하는 중요한 변수로서 식 (4)와 같이 정의하며, \dot{Q} 는 주입되는 공기의 체적 유량(volumetric flow rate)이다.

$$C_q = \frac{\dot{Q}}{U_0 d_c^2} \quad (4)$$

공기 분사량계수의 경우 공기를 분사하여 환기 초공동을 형성하고 환기 초공동 끝에서 공기가 유출된다. 분사된 공기(injected air)와 유출된 공기(entrained air)의 양이 같고 환기 초공동(ventilated cavitation)에서는 공동 끝 공기 유출 방식 및 꼬리 형상의 중요성 때문에 분사량 계수를 영어로 entrainment coefficient라 표현하는 것이 관례이며, 본 연구에서도 영어식 표현은 같은 관례를 따랐다.

3.2 실험 조건

직경이 10 mm, 15 mm인 원판 캐비테이터를 대상으로 유속과 공기 분사량을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 유속은 6 ~ 12 m/s 범위에서 2 m/s 간격으로 4가지이며, 이때 식 (3)과 같이 직경으로 무차원한 Froude 수(F_n)는 15 ~ 40 사이이다. 공기 분사량은 식 (4)의 분사량 계수(C_q)로 나타내어 0.02 ~ 0.14 까지 0.02 간격으로 7가지이며, 대상 속도 및 분사량 계수를 조합하여 실험 조건을 구성하였다. 다만 직경 10 mm 원판 캐비테이터의 경우 유속이나 분사량 계수가 작을 때 환기 공동이 매우 불안정하여 형상을 제대로 유지하고 못하고 단속적(intermittent)으로 떨어져 나가는 현상이 발생하였기 때문에 분석 결과에서는 제외하였다. Table 1과 Table 2에는 각각 15 mm 및 10 mm 직경의 캐비테이터에 대한 공기 분사량과 유속조건을 나타내었다.

Table 1 Volumetric flow rate (l/min) of entrained air for 15 mm disk cavitator

U_0 (m/s)/ F_n \ C_q	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
6 / 15.64	1.62	3.24	4.86	6.48	8.10	9.72	11.34
8 / 20.85	2.16	4.32	6.48	8.64	10.80	12.96	15.12
10 / 26.06	2.70	5.40	8.10	10.80	13.50	16.02	18.90
12 / 31.28	3.24	6.48	9.72	12.96	16.20	19.44	22.68

Table 2 Volumetric flow rate (l/min) of entrained air for 10 mm disk cavitator

U_0 (m/s)/ F_n \ C_q	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
8 / 25.54	1.92	2.88	3.84	4.80	5.76	6.72
10 / 31.93	2.40	3.60	4.80	6.00	7.20	8.40
12 / 38.31	2.88	4.32	5.76	7.20	8.64	10.08

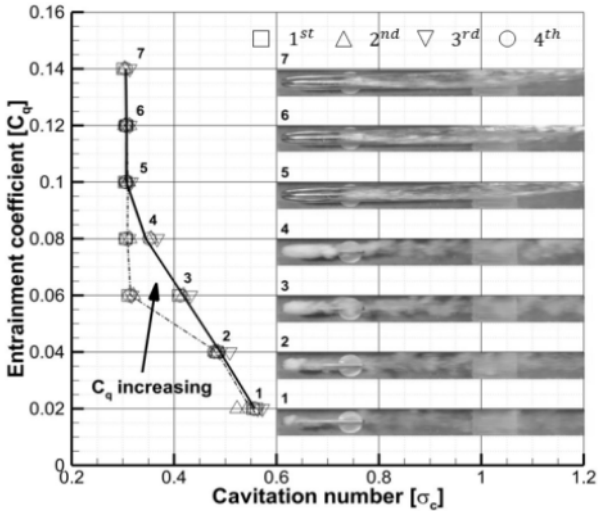
3.3 환기 초공동 실험 특성

3.3.1 분사량 변화에 따른 환기 초공동 특성

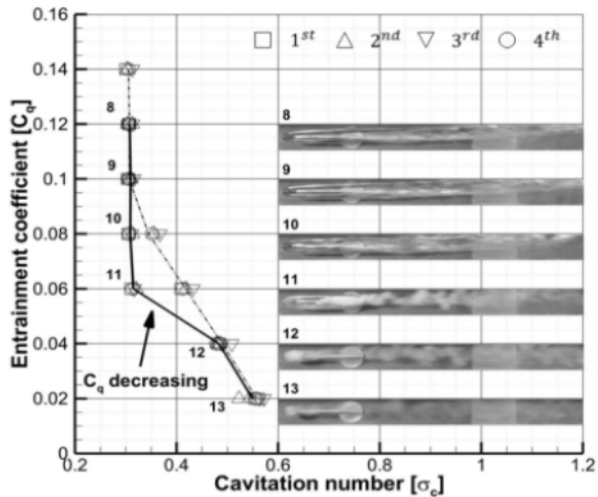
환기 초공동 실험에 있어서 공기 분사량은 가장 중요한 요인이며, 실험을 효율적으로 수행하기 위해서는 특정 속도, 압력 조건에서 분사량을 증가 또는 감소시켜가며 수행해야 한다. 이를 위해서는 같은 속도, 압력, 분사량 조건에서 반복적으로 실험을 하더라도 동일한 현상을 재현할 수 있어야 한다. 또한 터널을 가동하기 시작한 후부터 멈출 때까지 지속적으로 실험을 수행할 때, 이전 단계의 분사량에 의해 형성된 유동장(속도, 및 압력)이 안정되게 유지되다가 분사량을 변화시켜 교란을 주면 분사량의 증가 또는 감소조건과 이전단계의 유동장이 현 단계의 유동장에 영향을 미치므로 이에 대한 확인도 필요하다.

이를 위해 본 환기 초공동 실험에 대한 반복성(repeatability)과 이력성(hysteresis)을 확인하고자 하였다. Fig. 8는 직경 15 mm 원판 캐비테이터를 대상으로 유동속도 8 m/s에서 공기 분사

량 계수를 0.02부터 0.14까지 0.02 간격으로 증가(Fig. 8(a))시킨 후 다시 감소(Fig. 8(b))시키는 실험을 4번 반복하여 수행한 결과와 각 분사량 조건에서 공동 형상 및 반복 수행된 실험으로부터 구한 환기 공동수를 평균하여 실선과 일점쇄선으로 나타내었다.



(a) Increasing entrainment coefficient



(b) decreasing entrainment coefficient

Fig. 8 Hysteresis of ventilated cavitation in experiment

C_q 에 대한 반복 실험에서 환기 공동수가 거의 동일하게 나타남을 볼 수 있으며, 평균에 대한 각 실험의 환기 공동수 차이의 제곱평균은 약 1.3%이고 환기 공동이 어느 정도 발달한 분사량 계수 0.06 이상에서는 약 1%로 나타났으므로 본 실험은 환기 초공동 실험을 수행하기에 충분한 반복성을 갖는 것으로 판단하였다. 한편, 분사량 계수가 0.04 ~ 0.10 사이에서는 분사량이 증가 또는 감소하는 경우에 환기 공동수의 차이가 크게 발생하는 이력현상(hysteresis)이 나타났으며, 분사량을 증가시킨 경우의 분사량 계수 0.10 (Fig. 8(a), 5) 이상에서는 환기 공동수가 일정하고, 대부분의 표면이 깨끗한 환기 공동이 발생함을 볼 수 있다. 반면 분사량을 감소시키는 경우에는 분사량 0.06 (Fig. 8(b), 11)

까지도 환기 공동수가 일정하고, 깨끗한 환기 공동으로 나타나고 있다. 특히 Fig. 8(a)의 4와 Fig. 8(b)의 10은 분사량 계수 뿐 아니라 분사량도 같지만 환기 공동수 및 공동 형상의 차이는 크다. 이에 대한 명확한 원인 규명은 현재로서는 어렵지만 이미 형성된 환기 공동에서 분사량을 감소시킬 때, 그 형상을 유지하고 있던 공동 내부 공기량이 유출되지 않고 공동 내부에 머무르면서 분사량의 감소만큼 공동 끝 유출량이 감소한 것으로 볼 수 있으며, 이는 공동 주위 물 유동의 관성과 물과 공기가 접한 경계면에서의 표면장력 그리고 공동이 형상을 유지하려고 하는 관성 등이 복합적으로 영향을 준 것으로 추측된다. 본 연구에서는 공기 분사량을 증가시켜 가며 수행한 실험 결과를 바탕으로 분석하였다.

3.3.2 차폐효과

일반적으로 캐비테이션 터널에서의 실험은 터널 벽에 의한 차폐 효과와 압력 강하를 동반하며, 압력 강하의 경우 모형의 길이가 짧은 경우 미치는 영향은 미미하지만 차폐 효과는 공동수나 공동 형상에 매우 큰 영향을 준다. Fig. 9에는 캐비테이터 및 초공동에 의해 차폐되는 터널 시험부의 모식도를 나타내었다. 주유동이 캐비테이터 및 초공동을 지나면서 압력은 낮아지고 유속(U_c)은 증가하게 되는데, 차폐 효과가 어느 정도 이상되면 초공동 주위 대부분의 영역에서 속도가 빨라지는 효과가 나타나며, 공동수 및 공동 형상에 있어서 무한 영역 조건과는 차이가 있으므로 캐비테이션 터널에서의 실험 결과를 실제 설계에 반영하기 위해서는 차폐 효과를 반드시 고려해야한다.

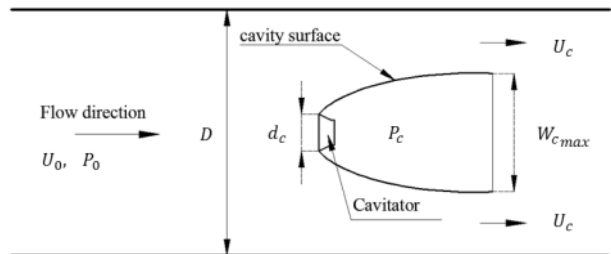


Fig. 9 Schematics of blockage effect in cavitation tunnel

Karlikov and Sholomovich (1966)은 차폐 효과가 있는 경우의 공동수와 무한영역에서의 공동수 사이의 관계를 무한영역에서의 항력과 공동수 사이의 관계가 차폐효과가 있는 경우에도 변하지 않는다는 가정 (Epshtein, 1966)을 바탕으로 식 (5)과 같이 유도하여 차폐 효과에 의한 최소공동수를 제시한 바 있다.

$$\sigma_{\infty} (\sqrt{1 + \sigma - \sigma_{\infty}} - 1) (\sqrt{1 + \sigma} - 1) (1 + \sigma_{\min}) \quad (5)$$

$$= (\sqrt{1 + \sigma_{\min}} - 1)^2 \{ \sqrt{1 + \sigma} (1 + \sigma_{\infty}) \sqrt{1 + \sigma - \sigma_{\infty}} - (1 + \sigma) \}$$

σ_{∞} 는 등가 무한영역에서의 공동수, σ_{\min} 은 터널에서의 최소 공동수, σ 는 터널 실험에서의 공동수이다. 공동수가 충분히 작은 경우에는 식 (6)과 같이 간단히 표현할 수 있으나 이는 $\sigma < 0.1$ 에 대해서 사용이 가능 할 것으로 사료된다.

$$\sigma_{\infty} = \frac{2\sigma^2 - \sigma_{\min}^2}{2\sigma} \quad (6)$$

무한영역과 터널 사이의 공동수 관계는 터널의 최소공동수를 알아야하며, 최소공동수는 차폐 정도에 따라 달라진다. 이는 실험이나 수치해석을 통해 얻을 수 있는데, Brennen (1969)은 포텐셜 이론을 기반으로 터널(D)과 캐비테이터(d_c)의 직경비(D/d_c)에 따른 공동유동 수치해석을 수행하여 최소공동수를 추정 한 바 있으며, Kawakami (2010)와 Schauer (2003)는 실험을 통해 Brennen의 결과가 타당함을 확인한 바 있다. Table 3은 직경비에 따른 Brennen의 최소공동수 결과이며, 이를 이용하여 거듭제곱 형태의 회귀분석으로부터 얻은 곡선 적합식을 함께 나타내었다.

Table 3 Minimum cavitation number according to blockage ratio from Brennen (1969)

D/d _c	σ _{min}	D/d _c	σ _{min}
10.5	0.202	5.0	0.495
7.5	0.295	4.4	0.596

Power curve fitting : σ_{min} = a(D/d_c)^b, a = 3.6416, b = -1.232

앞서 직경 15 mm 원판 캐비테이터를 대상으로 유동속도 8m/s에서 공기 분사량 계수를 변화시켜가며 수행한 실험 결과 (Fig. 8)에서 보는 바와 같이 분사량 계수가 증가하면서 환기 공동수는 점점 작아지다가 분사량 계수 0.1 이상에서는 더 작아지지 않고 약 0.3의 환기 공동수로 수렴되어 간다. 이를 최소공동수로 볼 수 있으며, 차폐 정도가 다른 직경 10mm의 캐비테이터를 대상으로 동일한 속도 및 분사량 계수로 실험을 수행하고, Fig. 10에 분사량 증가에 따른 공동수 변화를 터널-캐비테이터 직경비(D/d_c)에 대해 함께 나타내었다.

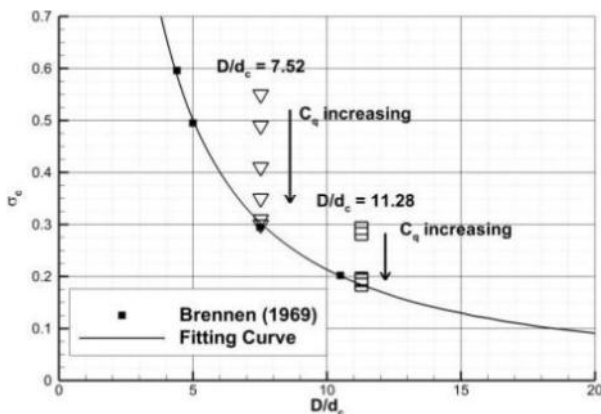


Fig. 10 Minimum cavitation number at two D/d_c

여기서 정사각형 단면인 본 터널 시험부에서의 직경비 D/d_c는 터널의 단면적(A₀)과 동일한 면적을 가지는 원단면의 직경을 등가로(A₀ = πD²/4) 가정하고 계산한 것이며, 직경 15 mm 원판 캐비테이터에 대한 직경비 D/d_c는 7.5, 10 mm는 11.3이다.

두 직경 모두 공기 분사량 계수가 증가하면서 환기 공동수는 점점 낮아지다가 분사량 계수가 증가해도 더 이상 낮아지지 않고 어느 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다. 본 실험의 최소공동수는 직경 15 mm의 경우 약 0.306이며, 10 mm의 경우 약 0.184로서 Brennen 결과의 적합식으로부터 얻은 0.303, 0.184와 비교하면 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 차폐 효과에 의한 최소공동수는 실제(무한영역) 조건에서는 나타나지 않지만, 단면적의 제한이 있는 캐비테이션 터널에서는 공동수의 한계 및 모형의 크기 결정 등에 있어서 단초를 제공하는 중요한 요소로 볼 수 있다. 또한 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 실험 결과를 무한영역에서의 정수로 변환할 수 있으므로 설계에 활용할 정보를 제공한다는 측면에서 최소공동수는 반드시 필요한 정보라 할 수 있다.

3.3.3 부력의 영향(Froude수의 영향)

원판 캐비테이터의 초공동 유동에서 Froude 수가 20~30보다 큰 경우 중력 효과를 무시할 수 있다고 알려져 있다 (Semenenko, 2001; Savchenko, 2001). 하지만 자연 공동에 비해 비교적 낮은 속도에서도 초공동을 발생시킬 수 있는 환기 초공동은 낮은 Froude수로 인해 부력의 영향이 나타날 수 있다. 특히 실제 운항 조건보다 매우 낮은 속도에서 수행되는 캐비테이션 터널에서의 실험에서는 부력의 영향이 크게 나타날 수 있으므로 환기 초공동의 대표적인 형상들의 특징으로부터 부력의 영향(Froude수의 영향)을 살펴보았다.

환기 공동의 형상은 공동 끝에서 공기가 빠져나가는 유출 모드에 따라서 re-entrant jet, twin-vortex, pulsation 모드의 세 가지로 구분할 수 있고 이를 Fig. 11에 나타내었다.

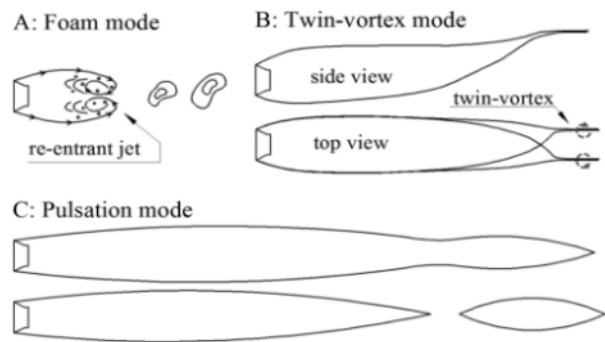


Fig. 11 Different modes of ventilated cavities

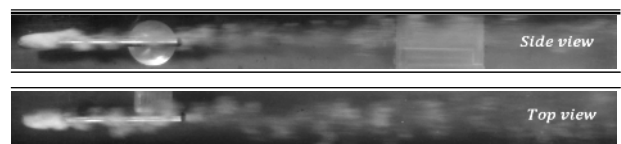


Fig. 12 Example of foam mode of ventilated cavitation

공동 꼬리 부분의 공기 유출이 re-entrant jet 모드(Fig. 11A)로 나타나는 포말형 환기 공동은 공동수가 비교적 큰 경우에 나타나며, Fig. 12에 보인 바와 같이 공동 끝부분의 와류를 따라 공동 내부로 공기가 재돌입하고 공동 내부에 공기와 물이 혼재되

어 포말로 관측된다 이 경우는 공기 분사량이 적고 비교적 Froude수가 작지만, 부력의 영향은 크지 않다.

환기 공동수가 작아서 공동이 길게 형성되는 경우에 Froude수가 작으면 비교적 부력에 의한 효과가 커서 공동 꼬리가 위로 상승하고, 두 갈래로 갈라지면서 공동 표면이 바깥방향으로 회전하는 twin-vortex 모드로 공기가 유출된다(Fig. 11B). Fig. 13에는 twin-vortex 환기공동 형상의 측면과 상면을 나타내었다. 측면에서는 공동의 꼬리가 위로 올라가는 것을, 상면에서는 twin-vortex가 형성되는 것을 볼 수 있다. 하지만 같은 공동수에서 Froude수가 증가하면 부력의 효과는 감소한다.

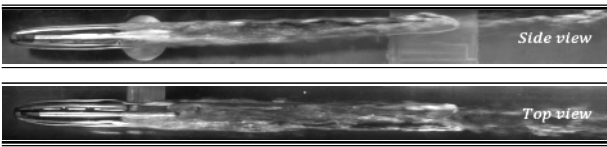


Fig. 13 Example of twin-vortex mode of ventilated cavitation

Fig. 14에는 직경 10 mm 원판 캐비테이터를 대상으로 동일한 환기 공동수에서 Froude수를 20.85~38.31 범위의 공동 형상을 나타낸 것이다. Froude수가 작은 경우에는 앞서 살펴본 바와 같이 공동 꼬리가 상승하고 공동이 비교적 깨끗한 형상으로 나타나고 있지만 Froude수가 증가하면서 공동의 길이는 점점 길어지고 공동 꼬리의 상승 정도는 감소하며, 또한 포말형으로 변화하고, 축대칭 형상에 근접해 간다.

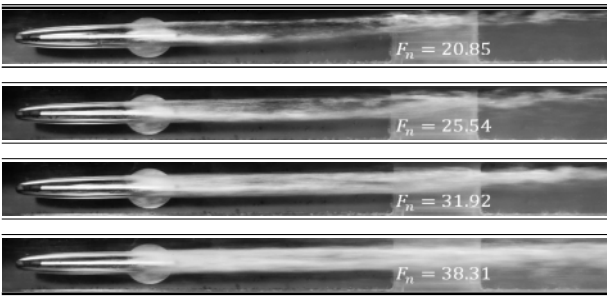


Fig. 14 Comparison of ventilated cavity shape according to Froude numbers due to buoyancy effect

한편, 환기 공동수가 충분히 낮아서 안정된 환기 공동이 발생된 이후 공기 분사량 계수를 증가시키는 경우에는 공동 끝이 유동방향의 전후로 변동하게 되는 비정상 pulsation 모드로 추가 공급된 공기가 공동 끝에서 유출된다(Fig. 11C). Fig. 15에는 pulsation 모드에서의 환기 공동 형상을 환기 초공동 길이가 최대 및 최소인 경우에 대해 나타내었다. 이러한 현상은 현재로서 명확히 원인을 규명하기는 어려우나, 자연 공동이 발생할 만한 조건에서 공기를 분사하면 추가 공급된 공기가 유출되는 과정에서 환기 초공동 꼬리에서의 비정상성(unsteadiness)에 기인한 공동의 기복형상(undulation shape)이 나타나고, 분사한 공기와 기화한 수증기가 혼재되어 공기의 높은 압력(약 100 KPa)과 상대

적으로 매우 낮은 수증기의 기화 압력(약 3 KPa)에 기인한 심한 압력변화가 동반되면서 발생한 현상으로 설명하는 견해도 있다 (Franc & Michel, 2005).

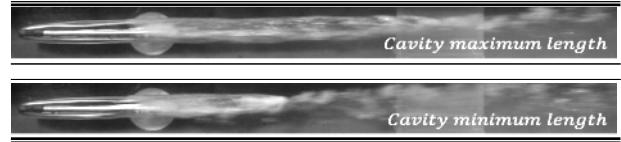


Fig. 15 Example of pulsation mode of ventilated cavitation

3.4 환기 초공동에 미치는 분사량과 Froude수의 영향

공기 분사량과 Froude수가 환기 초공동에 미치는 영향을 조사하기 위해 직경 15 mm, 10 mm의 원판 캐비테이터를 대상으로 공기 분사량 계수와 유입속도 변화에 따라 실험을 수행하였다. 속도별로 공기 분사량 계수를 변화시켜가며 환기 공동내부압력을 계측하였고, 직경 15 mm, 10 mm에 대한 환기 공동수를 Fig. 16과 Fig. 17에 각각 나타내었다.

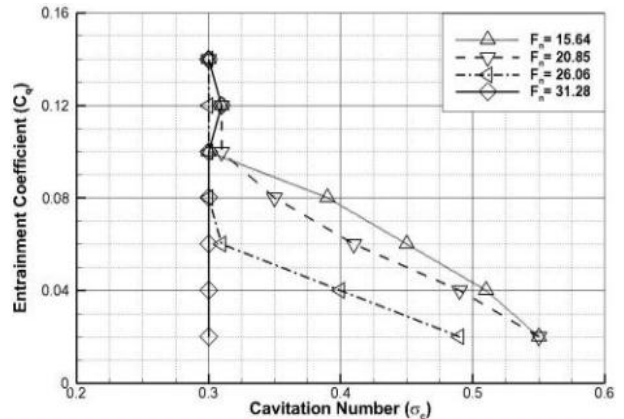


Fig. 16 Characteristics of ventilated cavitation number according to entrainment coefficients with various Froude number for 15 mm cavitator

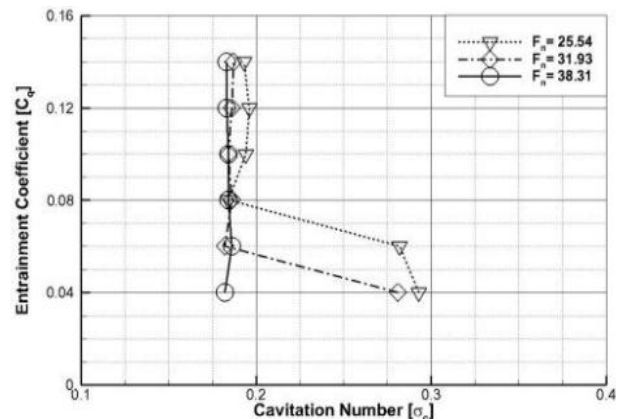


Fig. 17 Characteristics of ventilated cavitation number according to entrainment coefficients with various Froude number for 10mm cavitator

공기 분사량 계수가 증가하면서 환기 공동수는 낮아지고 결국 분사량 계수를 증가시켜도 더 이상 낮아지지 않는 최소공동수에 도달하게 된다. 직경 10 mm와 15 mm의 최소공동수는 각각 0.18과 0.3로 나타나고 있으며, 터널-캐비테이터 직경비 D/d_c 가 각각 11.3, 7.5이므로 앞서 차폐효과에 대해 살펴본 바와 같이 D/d_c 가 큰 경우 최소공동수가 작게 나타나고 있다. Froude수가 증가할수록 최소공동수에 도달하는 분사량 계수는 작아지고, 가장 큰 Froude수에서는 가장 작은 분사량 계수에서 바로 최소공동수가 나타난다.

이는 높은 Froude수에서는 유속이 빠르고 터널에서의 기준 압력이 낮기 때문에 자연 공동이 발생할 만큼 이미 공동수가 작아져 있으므로 환기 공동을 발생시키기 위한 환기 공동수 감소가 쉽게 이루어지기 때문으로 볼 수 있다.

공기 분사량에 따른 환기 공동 형상 변화를 살펴보기 위해 Fig. 18에 직경 15 mm, $F_n = 26.06$ (속도 10m/s)인 경우에 대해 공기 분사량 계수에 따라 형성되는 환기 초공동 형상의 측면과 상면을 나타내었다. 분사량 계수가 증가하면서 환기 공동수는 감소하며 분사량 계수 0.06에서 최소공동수에 근접한다.

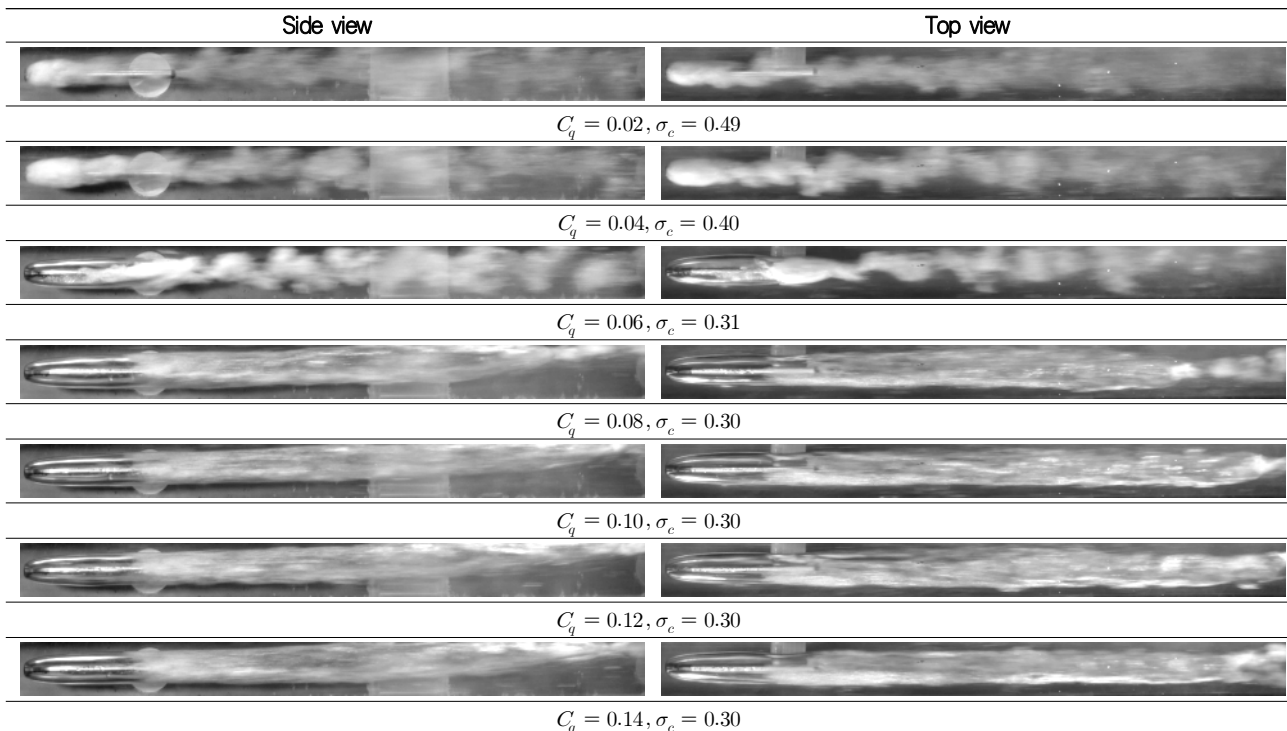


Fig. 18 Evolution of cavity shape according to increase of entrainment at $F_n = 26.06$

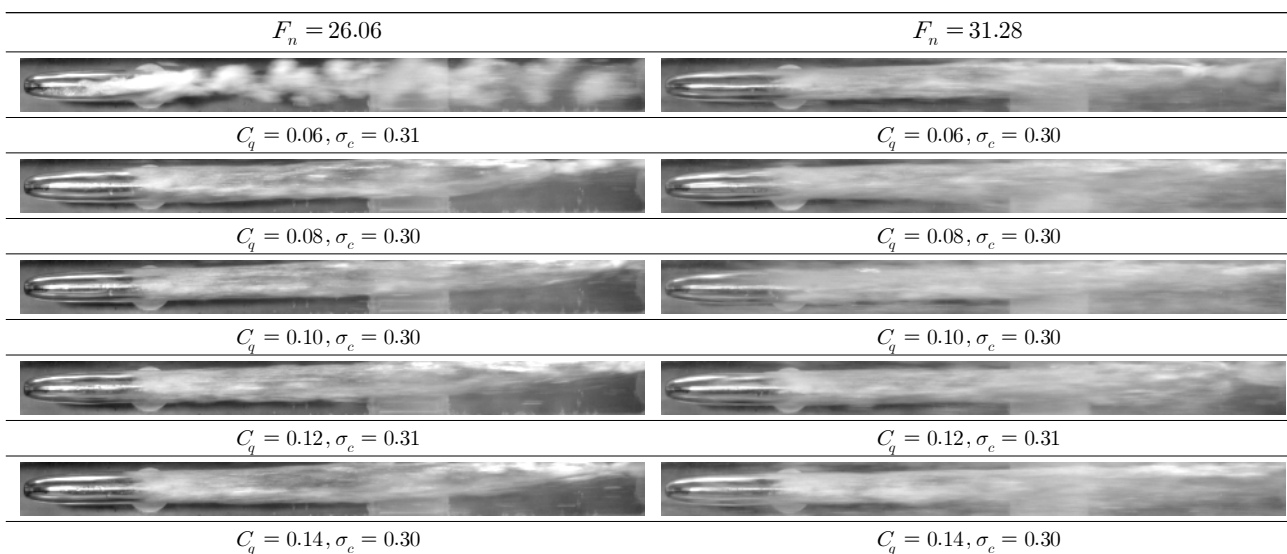


Fig. 19 Comparison of cavity shape between two F_n according to entrainments

분사량 계수가 작을 때 포말형 환기 공동이 형성되며, 분사량 0.06에서 깨끗한 환기 공동으로 급격한 변화가 있다. 또한 분사량 0.08에서 환기 공동의 길이가 급격히 증가하고 있으며 이후 분사량이 증가하여도 환기 공동의 형상이 거의 변화가 없으나 최소공동수에 도달한 이후 공기 분사량 계수가 증가하면서 공동 끝에서의 pulsating 모드는 관찰할 수 있었다. 한편, 공동 꼬리 형상은 위로 상승하지만 공동의 길이가 길고, twin-vortex 모드는 나타나지 않는 것을 확인하였다.

환기 공동 형상에 대한 Froude수 영향을 살펴보기 위해 Fig. 19에는 직경 15 mm에 대해 Froude수 26.06과 31.28을 비교해서 분사량에 변화에 따른 환기 공동 형상을 나타내었다. Froude수가 큰 경우 더 낮은 공기 분사량에서 최소공동수에 도달하며, 환기 공동 꼬리 형상의 상승이 작아진다. 또한 공동의 길이가 길어지고, 꼬리 형상의 폭이 두꺼워짐을 볼 수 있다.

Table 4 Categorization of ventilated cavitation mode for 15 mm cavitator (: Pulsation mode, : Twin-vortex mode, : Foam mode)

		Cavitation number						
F_n	C_q	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
	15.64		0.452	0.410	0.339	0.267	0.135	0.153
20.85		0.458	0.379	0.289	0.211	0.145	0.146	0.144
26.06		0.386	0.270	0.150	0.137	0.137	0.143	0.144
31.28		0.144	0.139	0.138	0.137	0.143	0.145	0.139

Table 5 Categorization of ventilated cavitation mode for 10 mm cavitator (: Pulsation mode, : Foam mode)

		Cavitation number					
F_n	C_q	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
	25.54		0.231	0.217	0.090	0.103	0.106
31.93		0.215	0.087	0.093	0.089	0.092	0.094
38.31		0.086	0.091	0.089	0.089	0.087	0.087

한편, Table 4와 5에는 각각 직경 15 mm, 10 mm 원판 캐비테이터에 대해 Froude 수와 공기분사량계수에 따른 무한영역에서의 공동수를 나타내었고, 관측된 모드에 따라 음영으로 표시하였다. 대체로 Froude 수와 공기분사량계수가 작은 경우는 re-entrant jet 모드(Fig. 11A)의 포말형 공동이, 그 반대의 경우는 pulsation 모드(Fig. 11C)가 관측되었으며, 직경 15 mm에서 Froude 수가 작고 공기분사량계수가 큰 경우 일부 twin-vortex 모드(Fig. 11B)가 관측되었다. Froude 수 증가 또는 공기분사량 계수 증가에 따라 주로 re-entrant jet 모드에서 pulsation 모드로

전환되며, 직경 15 mm의 Froude 수 31.28과 10 mm의 31.93을 비교해 보면 직경이 큰 경우 보다 작은 공기분사량계수에서 모드 변환이 일어남을 알 수 있다.

위와 같이 공기 분사량 계수와 Froude수의 영향을 차폐효과와 더불어 환기 공동수 및 최소공동수 변화를 통해 살펴보았다. 분사량 증가에 따라 환기 공동수는 감소하다가 분사량 계수를 증가시켜도 더 이상 감소하지 않는 최소공동수에 도달하며, 최소공동수는 차폐정도가 작을수록 즉 터널-캐비테이터 직경비 D/d_c 가 클수록 작음을 알 수 있었다. 환기 초공동 형상의 경우 환기 공동수가 작아지면서 차폐효과로 인해 급격한 형상변화가 발생하는 천이구간이 있고, 최소공동수에 도달하면 분사량 계수를 증가시켜도 거의 형상이 변하지 않음을 확인하였다.

3.5 환기 초공동 형상

3.5.1 환기 초공동 형상 정의

공동의 길이 및 폭 계측을 위한 좌표계는 xy 좌표계로서 캐비테이터 앞면과 중심축이 만나는 점을 원점으로 하여 주 유동방향을 양의 x 축, 연직 상방을 양의 y 축으로 하며, 캐비테이터 직경은 d_c , 공동의 길이는 L_c , 최대 폭은 W_c 으로서 공동의 최대 폭이 계측하고자 하는 폭이다.

한편 축대칭 초공동의 길이 및 폭을 정의하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 먼저, Fig. 20(a)에 보인 바와 같이 공동의 형상을 타원체로 가정하고, 공동의 최대 폭의 위치를 기준으로 캐비테이터 중심으로부터 최대 폭이 되는 위치까지의 거리를 공동 길이의 반으로 정의(Definition-A)하는 방법이 있다. 이 방법은 공기 유출 모드(3.3.3절)에 따라서 환기 공동 꼬리 형상이 변화하여 명확한 정의가 어렵다는 측면과 공동 형상을 타원형으로 가정하는 포텐셜 이론의 타당성 그리고 환기 공동 폭이 꼬리에 비해 안정적으로 형성되는 특성 때문에 유용한 방법으로 인식되어 왔으며, Self and Ripken (1955)과 Kawakami (2010)는 A 방법을 이용하여 2~3장의 사진 계측으로부터 유용한 정보를 제공한 바 있다. 하지만 이러한 방법은, 이후에 살펴보겠지만, 최소공동수에 도달한 후에 공기분사량을 증가시킬 때 환기 공동의 최대 폭은 일정하지만 길이는 증가하는 현상에 대해서는 논의를 어렵게 하므로 환기 공동의 길이를 직접 계측해야할 필요가 있다. 이를 위해 Fig. 20(b)과 같이 공동의 전체 형상을 정의하고(Definition-B), 최대 폭과 최대길이를 찾는 B 방법을 도입하였다.

B 방법을 활용함에 있어서 환기 공동의 꼬리 형상을 명확하게 정의하기 어려운 환기 공동의 특성 때문에 정확한 길이 계측을 위해서는 꼬리 닫힘 형상을 도출하는데 주의가 필요하다. 본 연구에서는 앞서 2.2절에서 설명한 바와 같이 환기 공동 형상을 도출하였으며, 보다 엄밀한 형상계측을 위해서 향후 초고속 카메라 등을 이용한 조사가 요구된다.

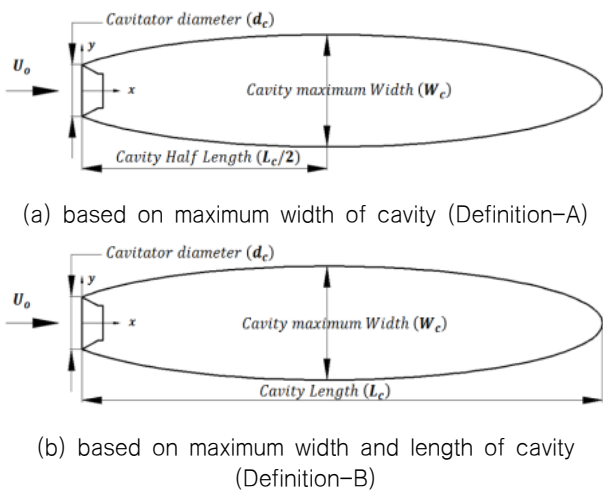


Fig. 20 Definition of cavity shape

3.5.2 길이 및 폭 계측 결과

직경 10 mm, 15 mm 원판 캐비테이터의 실험 결과로부터 최대 폭을 기준(Definition-A)으로 하는 A 방법과 형상 자체를 기준(Definition-B)으로 하는 B 방법으로 환기 공동의 길이 및 폭을 도출하여 Fig. 21과 Fig. 22에 무한영역에서의 공동수에 대한 길이 및 폭을 각각 나타내었다. 계측된 공동 형상과 4장의 각 사진과의 편차는 제곱 평균으로 최대 폭은 약 3%, 길이는 7% 이다. 무한영역에서의 공동수는 실험결과로 나타난 최소공동수를 이용하여 식 (5)으로부터 변환하였으며 실선은 무한영역에서 초공동 길이 및 폭에 대한 Reichardt's (Knapp, et al., 1979)의 준경험식으로서 식 (7) 및 (8)과 같다.

$$\frac{L_c}{d_c} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.70\sigma)} \times \frac{W_c}{d_c} \quad (7)$$

$$\frac{W_c}{d_c} = \left[\frac{C_D(\sigma)}{\sigma(1 - 0.132\sigma^{\frac{1}{2}})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

여기서 L_c 는 공동 길이, W_c 는 공동 최대 폭, $C_D(\sigma)$ 는 원판 캐비테이터의 항력계수로서 식 (9)와 같다.

$$C_D(\sigma) = C_{D0}(1 + \sigma) \quad (9)$$

C_{D0} 는 공동수가 0인 경우의 항력계수로서 0.8053 (Knapp, et al, 1970)을 사용하였다.

무한영역에서의 공동수로 변환한 경우 15 mm 직경의 최소공동수는 약 0.14, 10 mm 직경은 약 0.10 이다. 공동수가 큰 경우에는 두 방법에서의 길이는 대체적으로 일치하지만 공동수가 가장 작은 경우에는 큰 차이를 보이고 있는데, A방법에서의 길이가 준경험식 (Knapp, et al., 1979)과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 폭의 경우에는 두 방법 사이에 큰 차이는 없고, 준경험식

(Knapp, et al., 1979)과도 잘 일치함을 볼 수 있다. A 방법의 결과가 준경험식과 잘 일치한다는 것은 차폐효과가 있는 축대칭 유동에서도 무한영역에서의 항력계수와 공동수와의 관계가 변하지 않는다는 가정(3.3.2절)이 타당함을 시사한다. 한편 B방법의 경우에 A방법에 비해 최소공동수에서의 편차가 큰 편인데, 이는 차폐효과로 공동의 길이가 급격하게 길어진 현상과 Froude수가 작을수록 부력의 영향으로 꼬리부분이 상승하여 환기 공동의 유효길이가 작아졌기 때문으로 이해할 수 있다.

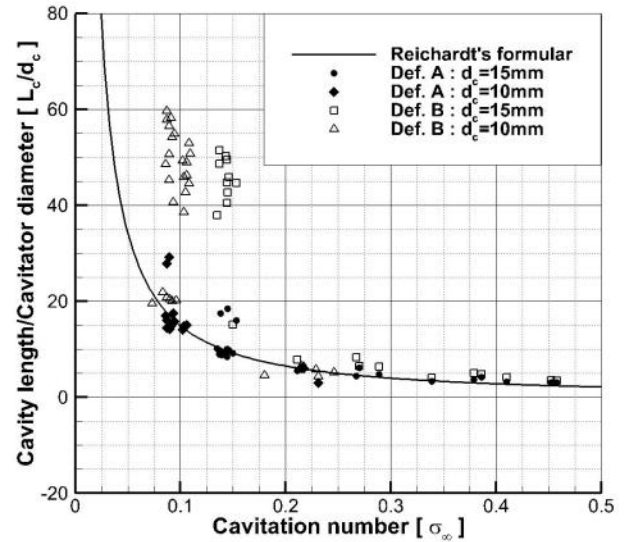


Fig. 21 Ventilated cavity length for cavitation number in unbounded flow

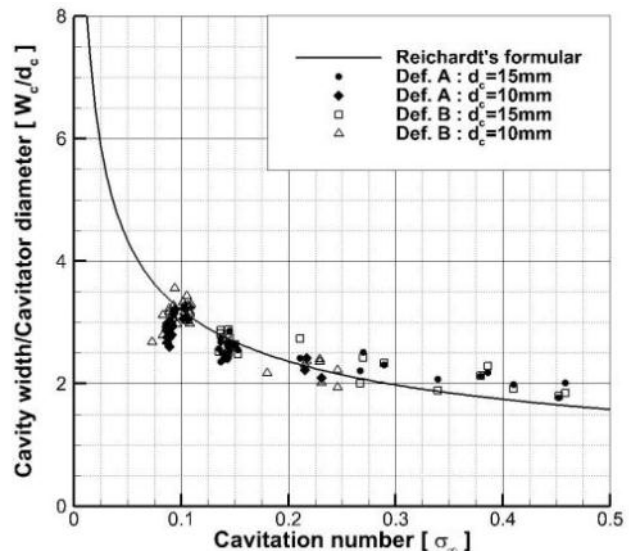


Fig. 22 Ventilated cavity width for cavitation number in unbounded flow

상기와 같이 환기 초공동의 길이 및 폭을 두 가지 정의 방법에 따라 계측하였고, 무한영역에서의 공동수로 변환하여 준경험식 (Knapp, et al., 1979)과 비교하였다. 공동 형상 자체를 기준으로 하는 방법(B 방법)은 차폐효과로 인해 최소공동수에 도달한

후 증가하는 분사량 계수에 따라 길이가 커지는 현상에 대한 설명이 가능하다는 측면에서 유효하다 할 수 있다. 최대 폭을 기준으로 하는 방법(A 방법)은 편차가 비교적 크지 않다는 측면에서 강건한 방법으로 볼 수 있으며, 무한영역에서의 공동수로 확장했을 때 준경험식과 잘 일치하고 초공동의 길이를 보수적으로 추정하기 때문에 설계에 있어서 유용한 방법이 될 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 캐비테이션 터널에서의 환기 초공동 실험을 위한 모형, 급기장치, 압력계, 공동 형상계측 등 전체적인 실험 시스템을 구축하였고, 환기 초공동 특성을 확인하였다. 공기 분사량 및 Froude수에 따른 환기 공동수 변화를 통해 실험의 반복성이 우수하고, 분사량 증감에 따른 이력현상이 나타남을 확인하였다. 또한 차폐효과에 의해 분사량 계수를 증대시켜도 환기 공동수가 감소하지 않는 최소공동수가 존재하고, 부력에 의해 나타나는 환기 초공동 형상 특성을 확인하였다.

공기분사량계수, Froude 수 및 차폐효과가 환기 공동수 및 최소공동수에 미치는 영향을 살펴 보았다. 분사량 증가에 따라 환기 공동수는 감소하다가 분사량 계수를 증가시켜도 더 이상 감소하지 않는 최소공동수에 도달하며, 최소공동수는 차폐정도가 작을수록 즉, 터널-캐비테이터 직경비 D/d_c 가 클수록 작음을 알 수 있었다. 환기 초공동 형상의 경우 환기 공동수가 작아지면서 차폐효과로 인해 급격한 형상변화가 발생하는 천이구간이 있고, 최소공동수에 도달하면 분사량 계수를 증가시켜도 거의 형상이 변하지 않으나 작은 길이 변화를 확인하였다.

환기 초공동의 길이 및 폭을 두 가지 정의 방법에 따라 계측하였고, 무한영역에서의 공동수로 변환하여 무한영역에서의 초공동 형상에 관한 준경험식과 비교하였다. 공동 형상 자체를 기준으로 하는 방법(B 방법)은 차폐효과로 인해 최소공동수에 도달한 후 증가하는 분사량 계수에 따라 길이가 커지는 현상에 대한 설명이 가능하다는 측면에서 유효하다 할 수 있다. 최대 폭을 기준으로 하는 방법(A 방법)은 편차가 비교적 크지 않다는 면에서 강건한 방법으로 볼 수 있으며, 무한영역에서의 공동수로 확장했을 때 준경험식과 잘 일치하고 초공동의 길이를 보수적으로 추정하기 때문에 설계에 있어서 유용한 방법이 될 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 캐비테이션 터널에서의 환기 초공동 실험에서 나타나는 환기 초공동 유동 특성과 공기 분사량 계수 및 Froude수에 따른 환기 초공동 형상 특성에 관한 기초자료를 확보하였다. 향후 환기 초공동을 이용한 수중운동체 설계에서 요구되는 공기 분사량 추정 방법과 환기 공동수 및 Froude수와 관련된 데이터베이스 확보가 요구된다.

후 기

본 연구는 “초공동 수중운동체”의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, B.K. Lee, C.S. & Kim, H.T., 2010. Experimental and Numerical Studies on Super-cavitating Flow of Axisymmetric Cavitator. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(1), pp.39-44.
- Ahn, B.K. Lee, T.K. Kim, H.T. & Lee, C.S., 2012. Experimental Investigation of Supercavitating Flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(2), pp.123-131.
- Brennen, C., 1969. A Numerical Solution of Axisymmetric Cavity Flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 37, pp.671-688.
- Campbell, I.J. & Hilborne, D.V., 1958. Air entrainment behind artificially inflated cavities. *Second Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington, D.C., U.S.A, 25-29 August 1958, pp.467-481.
- Epshtein. L.A., 1966. Minimal cavitation number and cavity width in plane and axisymmetric channels. *Fluid Dynamics*, 1(5), pp. 54-56.
- Franc, J.P. & Michel, J.M., 2005. *Fundamentals of Cavitation*. Kluwer Academic Publishers: Netherlands.
- Karlikov, V.P. & Sholomovich, G.I., 1966. Method of Approximate Account for the Wall Effect in Cavitation Flow Around Bodies in Water Tunnels. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza. Izdatel'stvo Nauka*, 1(4), pp.89-93.
- Kawakami, E.G., 2010. *Investiation of the Behavior of Ventilated Supercavities*. M.S. thesis. Minneapolis: University of Minnesota.
- Kim, B.J. Jung, S.W. Ahn, B.K. & Kim. H.T., 2014. An observation of ventilated supercavitation of disk cavitator. *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Busan, Korea, 22-23 May 2014, pp.1309-1314.
- Kim, H.T. & Lee, H.B., 2014 A Numerical Analysis of Gravity and Free Surface Effects on a Two-Dimensional Supercavitating Flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.435-449.
- Knapp, R.T. Daily, J.W. & Hammit, F.G., 1979. *Cavitation*. IOWA: Institute of Hydraulic Research.
- Kim, J.H. Jang, H.G. Ahm, 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, S.H. & Kim, K.W., 2014. Study on Dynamics modeling and Depth Control for a Supercavitating underwater Vehicle in Transition Phase. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), pp.88-98.
- Lee, H.B. Choi, J.K. & Kim, H.T., 2013 Numerical Analysis of Supercavitating Flows of Two-Dimensional Simple Bodies. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.436-449.
- May, A., 1975. *Water entry and the cavity-running behavior of missiles*, Naval Sea Systems Command, Hydroballistics Advisory Committee Technical Report 75-2. National Technical Information Service U. S. Department of commerce: Hydroballistics Advisory Committee.
- Michael, P.K. Jules, W.L. & Robert, F.K., 2009. Air entrainment Mechanisms from Artificial Supercavities: Insight based on numerical simulations. *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation CAV2009*. Ann Arbor, Michigan, USA, 17-22 August 2009, pp.1-14.
- Savchenko, Y.N., 2001. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies. *RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows"*, VKI in Brussels, Begium, 12-16 Feburary 2001, pp.4-1-4-24.
- Schauer, T.J., 2003. *An Experimental Study of a Ventilated Supercavitating Vehicle*. M.S. thesis. Minneapolis, USA: University of Minnesota.
- Self, M.W. & Ripken, H.F., 1955. *Steady-State Cavity Studies in a Free-Jet Water Tunnel, Report No. 47*. University of Minnesota, USA: St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
- Semenenko, V.N. 2001. Artificial supercavitation. physics and calculation. *RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows"*, Brussels, Belgium, 2001, pp.11-1-11-33.
- Spurk, J.H., 2002. On the gas loss from ventilated supercavities. *Acta Mechanica*, 155, pp.125-135.

