

반구형 용기부를 이용한 벤투리에서의 캐비테이션 제어

황종빈* · 신이수* · 김주하†

Control of cavitation in Venturi using hemispherical bump

Jongbin Hwang*, Yisu Shin* and Jooha Kim†

Abstract In this study, we investigated how the performance of a Venturi changes when a hemispherical bump is applied to the divergent part of the Venturi tube and what causes the performance difference. The Venturi-tunnel experiment was conducted in the Reynolds number range of $0.2 \times 10^5 - 1.2 \times 10^5$ and cavitation number range of 0.9 - 10. The bump was found to reduce the pressure loss coefficient and increase the discharge coefficient by shortening the cavitation length. The decrease in the cavitation length by the bump was explained by the strengthening of the re-entrant jet. The wake generated from the hemispherical bump seems to increase the adverse pressure gradient on the Venturi surface, thereby strengthening the re-entrant jet.

Key Words : Cavitation (공동 현상), Venturi (벤투리), Bump (용기부), Flow visualization(유동가시화)

기호설명

α : Venturi converging angle

β : Venturi diverging angle

γ : Venturi area ratio

ρ : Liquid density

μ : Dynamic viscosity of fluid

ζ : Pressure loss coefficient

σ : Cavitation number

Re : Reynolds number

A_{throat} : Venturi throat area

C_d : Discharge coefficient

w : Venturi width

H : Venturi inlet height

h : Venturi throat height

d : Diameter of hemispherical bump

P_{throat} : Pressure at Venturi throat

P_{vapor} : Vapor pressure

P_{in} : Pressure at Venturi inlet

P_{out} : Pressure at Venturi outlet

Q : Measured flow rate

V_{throat} : Venturi throat flow velocity

† Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Associate Professor

E-mail: kimjoocha@unist.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, M.S./Ph.D. combined course

1. 서론

벤투리는 유속을 바꾸어 압력을 조절하는데 사용되는 장치로 높은 범용성과 낮은 압력 손실 등의 장점으로 유체 시스템 전반에서 다양하게 활용되고 있다. 벤투리는 관의 단면적이 수축 및 팽창하는 형상적인 특징을 갖고 있으며 이를 통해 유체가 흐르는 속도를 측정하거나 유체 내의 특정 구간의 압력을 변형시킬 수 있다. 벤투리의 형상적 특징으로 인해 관 내부의 유체는 연속 방정식과 베르누이 원리에 따라 관의 단면적이 축소되는 수렴부에서 유속이 증가하며 이에 따른 압력강하가 발생한다. 이때 관의 단면적이 가장 작은 목에서 유속의 증가에 따른 압력강하가 최대가 되며 유체의 압력이 증기압 이하로 내려가면 캐비테이션이 발생하기 시작한다. 벤투리에서 발생하는 캐비테이션은 압력손실을 증가시켜 입구와 출구의 압력차를 크게 만들기 때문에 벤투리 장치의 측정 정확도를 떨어뜨릴 수 있으며, 나아가 벤투리를 통해 토출되는 유체의 양이 감소하는 문제를 야기한다. 뿐만 아니라 캐비테이션에 의해 발생된 기포는 유체기계 표면이나 관 내부의 벽 주위에서 붕괴되면서 충격파를 발생시켜 심각한 부식과 소음을 동반한다^(1,2). 이러한 캐비테이션의 영향은 벤투리 뿐만 아니라 다양한 유체 기계 장치의 성능과 수명을 결정하는데 있어서 중요하게 고려해야 할 사항이다. 각 장치마다 캐비테이션이 발생하는 조건과 발달 양상은 차이가 있으며, 이번 연구에서는 벤투리에서 발생하는 캐비테이션에 대해 살펴보고자 한다. Fig. 1은 벤투리에서 발생하는 캐비테이션 현상을 도식화하여 나타낸 것이다. 벤투리에서 발생하는 캐비테이션은 유속 증가에 따라 관내 단면적이 가장 좁은 벤투리 목(throat)에서 박리지점의 형상과 관계없이 압력강하로 내부 압력이 유체의 증기압에 도달할 때 미세기포가 처음 발생되기 시작하며 해당 시점을 캐비테이션이 형성되는 지점(cavitation inception)이라 한다. 이때 형성된 기포들은 단일 기포 형상으로 형성과 동시에 후류로 진행된다. 캐비테이션 형성 지점보다 높은 유속 범위에서는 단일 기포와 증방향으로

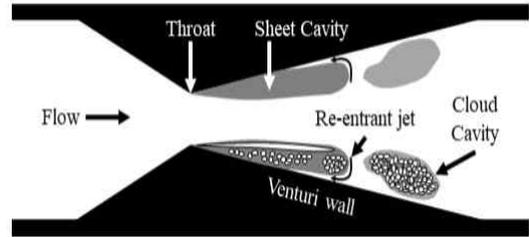


Fig. 1. Structure of the cavitation in Venturi

길게 늘어진 모양의 기포가 형성되고 여러 기포가 합쳐져 얇은 시트 형태의 sheet cavity가 유동 방향으로 확장되며 이후 sheet cavity 끝단에서 형성되는 재진입 제트(re-entrant jet)^(3,4)에 의해 sheet cavity가 cloud cavity로 천이 되는 과정을 거친다⁽⁵⁾.

벤투리에서 발생하는 캐비테이션에 대한 물리적 특성과 제어에 대한 선행 연구들은 주로 벤투리의 입출구 각도를 변형시키거나 벤투리 입구와 목의 단면적 비율을 변형하여 구조적으로 캐비테이션 발생을 억제하거나 제어하고자 하는 연구^(6,7)가 수행되었다. 그러나 벤투리의 구조 변형을 통한 제어는 매번 새로운 벤투리 장치를 제작하여 성능을 평가해야 할 뿐만 아니라 벤투리와 연결되는 관로와 같은 추가적인 부품들의 호환성을 고려한 추가적인 교체 작업이 수반되어야 한다. 이러한 점을 고려할 때 벤투리의 구조적인 제어 방법을 적용할 수 없는 경우 캐비테이션을 제어하는 다른 방법이 필요하다. 구조적인 제어 이외로 캐비테이션 제어 연구는 유체 기계 장치 표면의 형상을 바꾸는 방식으로 수행되어 왔다. 예를 들어, 표면 거칠기를 적용한 캐비테이션 제어 연구들은 주로 수중익⁽⁸⁻¹⁰⁾, 유압기계⁽¹¹⁾, 노즐⁽¹²⁾과 같은 유체 장치 표면에 장애물을 설치하거나 거칠기를 변형시켜 표면 형상이 캐비테이션에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 벤투리에서 캐비테이션 제어는 상술한 바와 같이 주로 구조적 변형을 통해 이뤄져왔으며, 상대적으로 벤투리의 표면 형상을 바꾸어 캐비테이션을 제어하기 위한 시도^(13,14)는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 벤투리에서 표면 형상 변화가 캐비테이션을 제어하는 기본적인 메커니즘을 확인하기 위해 반구형 용기부(bump)를 벤

투리의 발산부에 적용하여 이에 따른 벤투리에서의 압력손실 및 토출량의 변화를 관찰하고자 한다. 또한 캐비테이션과 같은 다상 유동은 기포가 빠르게 거동하기 때문에 많은 연구들이 초고속 카메라를 이용한 비전 기반의 가시화를 통해 연구를 진행해왔다⁽¹⁵⁻²¹⁾. 이번 연구에서도 기본 벤투리 모델과 반구형 용기부가 적용된 모델에 대해 유동 가시화를 실시하여 각 모델 별 캐비테이션 기포의 발달 양상의 차이를 파악하고자 한다.

2. 실험 모델 및 방법

2.1 캐비테이션 실험 장치 및 벤투리 모델

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 벤투리 캐비테이션 실험 장치를 도식화 하여 나타낸 것이다. 캐비테이션 발생 장치는 펌프(Wilo MHI-404)와 상류 및 하류 탱크, 벤투리가 연결되어 있으며 전체적으로 외부 압력으로부터 폐쇄된 시스템을 갖는다. 폐쇄된 시스템은 유속 제어에 따른 시스템 내부의 압력 변화만을 측정하기 위한 목적으로 설계되었다. 상류 및 하류 탱크에는 실험 전 작동 유체의 탈기와 안정화 과정을 관찰하기 위한 온도 센서, 용존 산소 측정 센서가 설치되어 있다. 또한 양쪽 탱크에 연결된 진공 탱크는 작

동 유체의 탈기과정 뿐만 아니라 실험 전 전체 시스템 압력을 음압으로 설정하여 펌프의 성능을 고려한 낮은 유속 조건에서도 상대적으로 적은 압력강하 만으로 벤투리에서 캐비테이션을 용이하게 발생시키기 위한 목적으로 사용되었다. 벤투리 입출구에 설치된 압력 센서는 캐비테이션 유동에 의한 압력변화를 측정하며, 관로에 설치된 유량계는 펌프를 통한 유량을 측정할 수 있도록 하였다. 펌프의 성능을 고려한 벤투리 입구에서의 최대 유속은 1.2 m/s이다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 벤투리의 정면도와 평면도를 나타낸다. 벤투리의 길이와 너비는 각각 400 mm, 20 mm이다. 벤투리 입구와 목의 면적비는 벤투리 목에서 도달할 수 있는 유속과 압력 범위에 영향을 주기 때문에 실험실 스케일의 펌프로 낮은 유속 조건에서도 벤투리 목에서 유체가 충분히 증기압 이하로 압력강하가 이뤄져 높은 유속에서 나타나는 캐비테이션 발달 과정과 동일한 현상을 관찰할 수 있도록 설계하였다. 또한 수렴부와 발산부의 각도는 선행 연구⁽⁷⁾를 참고하였으며 발산부의 각도가 벤투리 수렴부와 목에서의 압력변화에 미치는 영향을 고려해 압력변화를 최소화하는 조건으로 설계하였다. 이때 벤투리 입구와 목의 높이는 각각 $H = 80$ mm, $h = 8$ mm로 그에 따른 면적비는 10:1이며 수렴부와 발산부

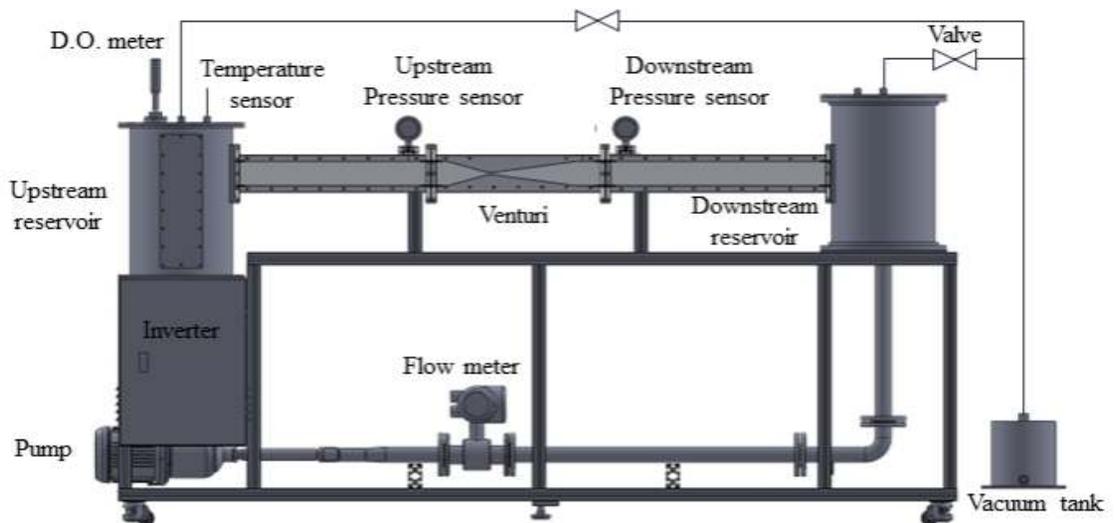


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental set-up for Venturi cavitation

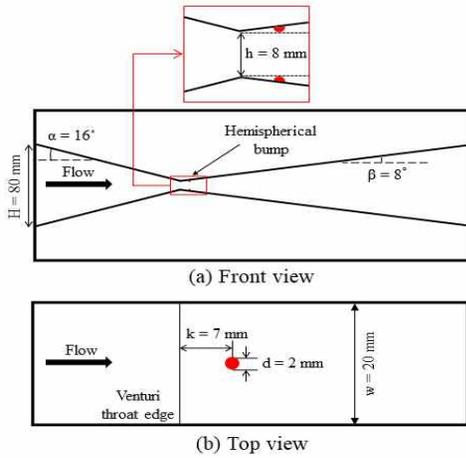


Fig. 3. Geometry of the Venturi with hemispherical bump: (a) Front view, (b) Top view.

각도는 각각 $\alpha = 16^\circ$, $\beta = 8^\circ$ 이다. 벤투리 목 구조는 캐비테이션이 발생하는 지점을 고정하고자 뾰족한 모서리를 갖도록 설계하였다. 본 연구에서는 용기부에서 발달하는 후류를 캐비테이션 제어에 이용하고자 하였다. 따라서 간단한 형상을 가지면서도 상대적으로 큰 후류를 형성하는 반구(hemisphere) 형태의 용기부를 벤투리에 적용하였으며, 지나치게 큰 후류의 형성으로 인해 오히려 캐비테이션이 촉진되는 것을 피하면서도 재진입 제트(re-entrant jet)와 비슷한 크기의 후류를 형성하도록 지름 $d = 2 \text{ mm}$ 의 용기부를 사용하였다. 용기부에 의한 단면적 비율(γ)의 변화를 고려하여 반구형 용기부를 설치한 지점의 단면적 비율이 벤투리 목에서의 단면적 비율보다 작아져 캐비테이션이 추가로 형성되는 것을 방지하기 위해 벤투리 목에서부터 수평한 연장선에 접하면서 너비 방향으로 중앙에 위치하도록 반구형 용기부를 설치하였으며, 해당 위치는 벤투리 목 모서리로부터 $k = 7 \text{ mm}$ 지점이다. 본 연구에서는 용기부가 없는 기본 벤투리와 반구형 용기부를 적용한 벤투리 모델(이후 ‘범프(bump) 모델’이라 함)을 대상으로 논의를 진행하고자 한다.

2.2 실험 방법

2.2.1 캐비테이션 벤투리 성능 실험

캐비테이션에 따른 벤투리의 성능 변화 관찰을 위한 실험은 Fig. 2에 도시한 벤투리 캐비테이션 실험 장치에서 진행되었으며 초기 전체 시스템 압력은 0.5 bar로 설정하여 낮은 유속에서 작은 압력강하만으로도 캐비테이션을 발생시킬 수 있도록 설정하였다. 캐비테이션은 작동 유체의 종류, 온도, 용존 산소의 양에 따라 물리적 특성과 기포의 발달에 큰 차이가 발생한다고 보고되었다^(22,23). 이러한 점을 고려하여 작동 유체는 온도 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 물을 사용하였으며, 용존 가스에 의한 영향을 줄이기 위하여 진공펌프로 전체 시스템 압력을 음압으로 유지하는 과정을 통해 용해된 용존 산소와 기타 가스를 제거하는 탈기 과정을 거쳐 매 실험 전 용존산소량이 2.5 mg/L 이하가 되도록 하였다. 캐비테이션 현상은 유체의 증기압력에 대한 벤투리 목에서 측정된 압력사이의 비율과 유속으로 정의되는 무차원수인 캐비테이션 수(σ)로 Eq. 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{P_{throat} - P_{vapor}}{\frac{1}{2} \rho V_{throat}^2} \quad (1)$$

여기서 벤투리 목에서의 압력(P_{throat})과 유속(V_{throat})은 유체의 연속 방정식과 베르누이 방정식을 바탕으로 벤투리 입구에서 측정된 압력과 유량계에서 측정한 유량을 통해 구할 수 있다. 물의 밀도(ρ)와 증기압(V_{vapor})에 대한 정보는 물과 증기 성질에 대한 국제 협회 문헌⁽²⁴⁾을 참고하여 실험이 진행된 온도에 해당하는 값을 보간하여 사용하였다. 캐비테이션 벤투리 성능 실험은 펌프의 출력을 점진적으로 증가시키면서 진행되었으며 기본 벤투리와 범프 모델 각각에 대한 캐비테이션 발생 시점의 캐비테이션 수는 1.06과 1.07로 거의 동일하게 측정되었다. 레이놀즈 수는 벤투리 목에서의 유속과 목의 높이를 기준으로 Eq. 2와 같이 정의하였으며, 실험이 진행된 레이놀즈 수 범위는 $0.2 \times 10^5 - 1.2 \times 10^5$ 이다.

$$Re_{throat} = \frac{\rho V_{throat} h}{\mu} \quad (2)$$

캐비테이션에 의한 벤투리에서의 압력 손실과 토출량의 변화를 관찰하기 위해 압력손실계수(ζ)와 토출계수(C_d)를 사용하여 벤투리의 성능 변화를 관찰하는데 사용하였다. 압력손실계수와 토출계수는 선행 연구^(25,26)에서 비 캐비테이션(non-cavitation) 및 캐비테이션 조건을 모두 포함하는 범위에서 벤투리의 성능을 평가하는데 사용되었으며 각각의 계수는 Eq. 3과 Eq. 4를 통해 계산하였다.

$$C_d = \frac{Q\sqrt{1-\gamma^4}}{A_{throat}\sqrt{2\rho(P_{in}-P_{out})}} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{P_{in}-P_{out}}{\frac{1}{2}\rho V_{throat}^2} \quad (4)$$

여기서 P_{in} 과 P_{out} 은 벤투리 입구와 출구에 위치한 압력센서에서 측정되었다. 본 연구에서는 실험이 수행된 레이놀즈 수 범위에서 기본 벤투리 모델과 범프 모델의 유량계수와 압력손실계수를 계산하여 비교하였다.

2.2.2 캐비테이션 유동 가시화 실험

Fig. 4는 벤투리 캐비테이션 유동 가시화 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 유동 가시화 실험은 2.2.1의 캐비테이션 벤투리 성능 실험과 동시에 진행되었으며 캐비테이션 기포의 발생, 발달 및 소멸과정을 촬영하기 위해 벤투리 정면과 상부에 각각 초고속 카메라(Front view : Phantom VEO, Top view : Phantom Miro M310)를 설치하여 촬영하였다. 두 초고속 카메라는 서로 동기화하여 동일한 순간의 영상을 촬영할 수 있도록 설정하였다. 기본 벤투리 모델과 범프 모델 모두 동일한 촬영 조건으로 촬영을 진행하였으며, 이때 촬영한 가시화 영상의 해상도, 초당 프레임, 노출 시간은 각각 1280×600 (front view)/ 1280×400 (top view) pixel, 5000 fps, 30 μ s이다. 캐비테이션 기포를 촬영하기 위해서 벤투리는 투명한 아크릴로 제작하였으며, 카메라의 반대편에 LED 면조명을

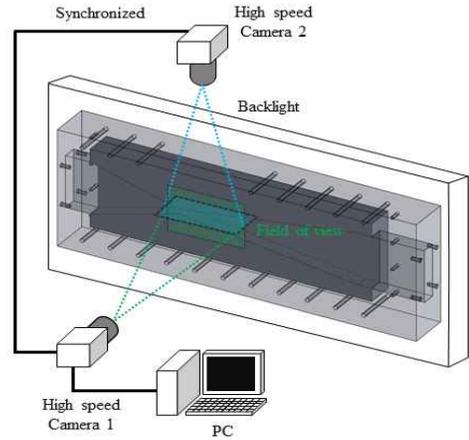


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental set-up for the Venturi cavitation visualization

설치하여 캐비테이션에 의해 형성된 기포가 아크릴을 투과하는 빛을 가리면서 생기는 그림자를 촬영하는 원리인 Shadow imaging 기법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력손실계수 및 토출계수

Fig. 5는 기본 벤투리 모델과 범프 모델의 유량과 레이놀즈 수(Re_{throat})에 따른 압력손실계수(ζ)와 토출계수(C_d)의 변화를 나타낸 것이다. 기본 벤투리 모델(Fig. 5(a)의 검정색 동그라미)과 범프 모델(Fig. 5(a)의 빨간색 세모) 모두 압력손실계수는 유량이 증가함에 따라 조금씩 감소하다가 $Q = 92$ L/min 근처에서 캐비테이션 발생과 동시에 급격히 증가한다. 압력손실계수의 변화와 캐비테이션 현상 사이의 관계를 살펴보기 위해 두 모델의 캐비테이션이 시작되는 지점(cavitation inception)을 파란색 점선으로 표시하였으며 거의 동일한 유량에서 캐비테이션이 시작됨을 알 수 있다. 비 캐비테이션 영역(non-cavitation region)에서는 벤투리의 입구와 출구의 압력차이가 크게 발생하지 않기 때문에 Eq. 3과 Eq. 4에 따라 유량이 증가할수록 토출계수가 증가하고 압력손실계수가 감소하는 경향을 보인다. 그러나 캐비테이션이

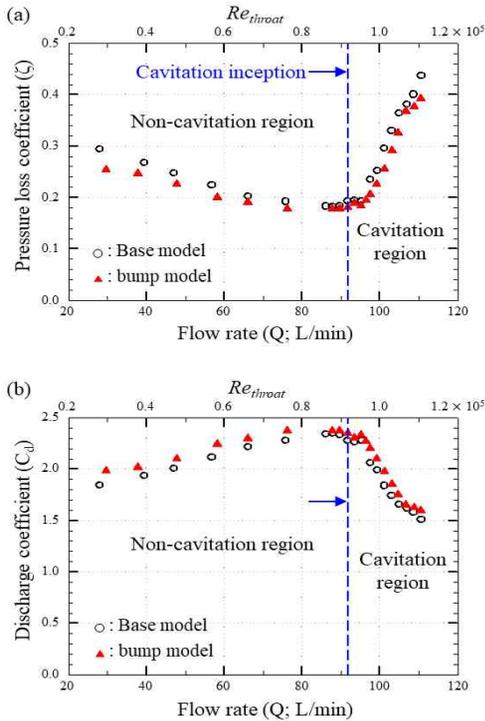


Fig. 5. Variations in the (a) pressure loss coefficient and (b) discharge coefficient with the flow rate.

시작됨에 따라 캐비테이션이 발생하는 영역에서 (cavitation region)는 기포로 인해 유동이 질식(choking)되어 벤투리 입출구의 압력차가 증가하고 이에 따라 압력손실계수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 토출계수 또한 캐비테이션이 시작됨에 따라 기포에 의한 벤투리 내부의 유효 단면적이 줄어들어 토출계수가 급격하게 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 경향은 선행연구들^(26,27)과 일치하는 결과이나 벤투리 입출구의 단면적 비율, 수렴부와 발산부의 각도, 목의 형상 등에 따라 벤투리의 입출구 압력에 영향을 미치는 것을 고려할 때 압력손실계수와 토출계수의 값에서 차이가 존재할 수 있다. 비 캐비테이션 영역($Q < 92$ L/min)에서 범프 모델의 압력손실계수는 기본 벤투리 모델에 비해 평균적으로 약 7% 감소하며, 캐비테이션 영역($Q > 92$ L/min)에서는 약 13% 감소한다. 이와 반대로 범프 모델의 토출계수는 기본 벤투리 모델에

비해 비 캐비테이션 영역에서 약 4%, 캐비테이션 영역에서 약 8% 증가하였다. Kadivar 등⁽²⁸⁾은 캐비테이션 제어에서 표면 거칠기가 흡입부의 국부적인 압력을 증가시켜 캐비테이션을 억제함을 보고한 바 있다. 이번 연구 결과에서는 반구형 용기부로 인해 벤투리 목에서 국부적인 압력 증가로 벤투리의 입구와 목 사이의 압력차가 줄어들어 질식에 의한 벤투리 입구에서 압력 증가가 억제되는 것으로 보인다. 따라서 비 캐비테이션 영역에서 범프 모델이 기본 벤투리 모델 보다 벤투리 입구에서 유동이 질식되는 현상이 억제되어 압력손실계수가 줄어들고, 반대로 토출계수가 증가하는 것을 확인하였다. 캐비테이션 영역에서는 반구형 용기부에서 후류가 생성되면서 국부적으로 추가적인 압력 강하가 발생해 캐비테이션 발달 과정에서 재진입 제트에 미치는 영향과 관계가 있는 것으로 보이며, 3.2에서 유동 가시화 결과를 바탕으로 이에 대해 좀 더 자세히 살펴볼 것이다.

3.2 유동 가시화

본 절에서는 캐비테이션 영역에 속하는 $Re_{throat} = 1.08 \times 10^5$ 에 대한 기본 모델과 범프 모델의 유동 가시화 결과를 토대로 캐비테이션 발생량과 기포의 발달 과정의 차이에 대해 논의하고자 한다. Fig. 6은 기본 모델과 범프 모델에서 sheet cavity로부터 천이된 cloud cavity가 떨어져 나가기 직전의 정면과 평면의 순간 이미지들을 나타낸다. 하얀색 점선과 노란색 점선은 각각 기본 모델과 범프 모델에 대한 캐비티의 가장자리 위치를 나타낸다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 범프 모델에서 발달하는 캐비티는 기본 모델에 비해 상당히 짧은 것을 알 수 있다. 벤투리 너비 방향의 캐비티 분포 양상은 Fig. 6(b)의 평면 이미지를 통해 확인할 수 있다. 기본 모델과 범프 모델 모두 너비 방향으로 거의 일정한 캐비티 분포를 보이며, 이를 통해 용기부는 유동방향의 캐비티 길이를 줄이는 역할을 하지만 너비방향의 캐비티 분포에는 거의 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 캐비테이션 발생량을 보다 정량적으로 비교하기 위

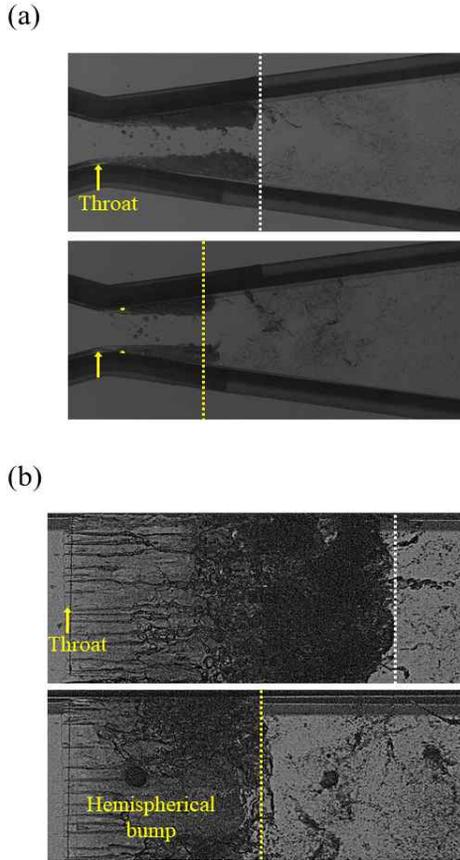


Fig. 6. Instantaneous high-speed images ((a) front view and (b) top view) for the base model (top) and bump model (bottom) at $Re_{throat} = 1.08 \times 10^5$.

해 Matlab을 이용한 이미지 후처리를 수행하였다. 촬영 영상의 모든 프레임은 각 픽셀마다 색상 정보를 포함하는 행렬이라는 점에 기초하여 편의를 위해 RGB 컬러 이미지에서 회색조 이미지로 변환하였으며, 회색조 이미지를 구성하는 각 픽셀마다의 회색도(gray level) 표준편차는 Zhu 등⁽²⁹⁾에서 수행한 이미지 처리 기법과 동일하게 수행되었다. 이미지 후처리를 통한 표준편차를 나타내는 이미지를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 x_{base}/h 와 x_{bump}/h 는 각각 벤투리 목에서부터 표준편차가 가장 큰 지점까지의 무차원화된 길이를 나타내며, 해당 길이는 캐비테이션 길이(cavitation length)로 이후 기본 벤투리 모델과 범프 모델의 캐비테이션 발생량을 비교하기 위해

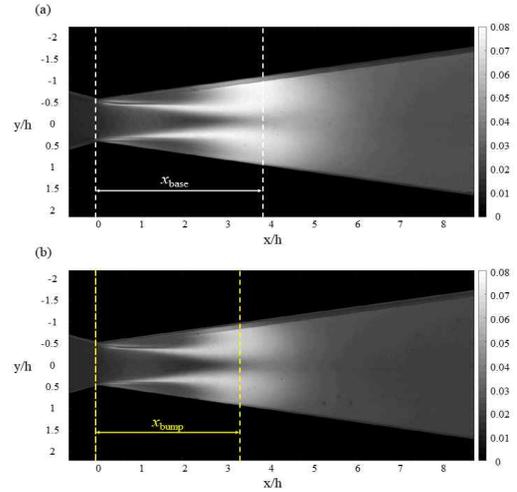


Fig. 7. Standard deviation of normalized images for the (a) base model and (b) bump model at $Re_{throat} = 1.08 \times 10^5$.

사용하였다. $Re_{throat} = 1.08 \times 10^5$ 에서 범프의 설치로 인해 캐비테이션 길이가 약 13% 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 범프가 캐비테이션 발생량을 줄이는 역할을 함을 의미하며 범프에서 발생하는 후류의 영향으로 시트 캐비테이션(sheet cavitation) 끝단에서 형성되는 재진입 제트(re-entrant jet)가 강화되어 구름 캐비테이션(cloud cavitation)으로 빠르게 천이되는 것으로 보인다. 이는 Fig. 10의 유동 가시화 결과에서 자세히 논의하고자 한다. 레이놀즈 수에 따른 캐비테이션 발생량의 변화를 살펴보기 위해 벤투리 윗면과 아랫면에서의 캐비테이션 길이를 Fig. 8에 도시하였다. 캐비테이션 길이는 캐비테이션 발생지점(cavitation inception)에서는 큰 차이를 보이지 않으나, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 범프 모델의 캐비테이션 길이가 기본 모델에 비해 짧게 측정되는 경향을 보였다. 용기부 설치로 인한 캐비테이션 길이의 감소는 벤투리 윗면과 아랫면에서 공통적으로 확인되었으며, 실험이 진행된 레이놀즈 수 범위에서 평균적으로 약 12% 감소하였다. 용기부가 캐비테이션 길이를 축소시키는 메커니즘을 이해하기 위해 벤투리에서 sheet cavitation이 발달하는 과정과 구조를 Fig. 9에 도시하였다. 벤투리 목의 낮은 압력과 출구의 높은 압력으로

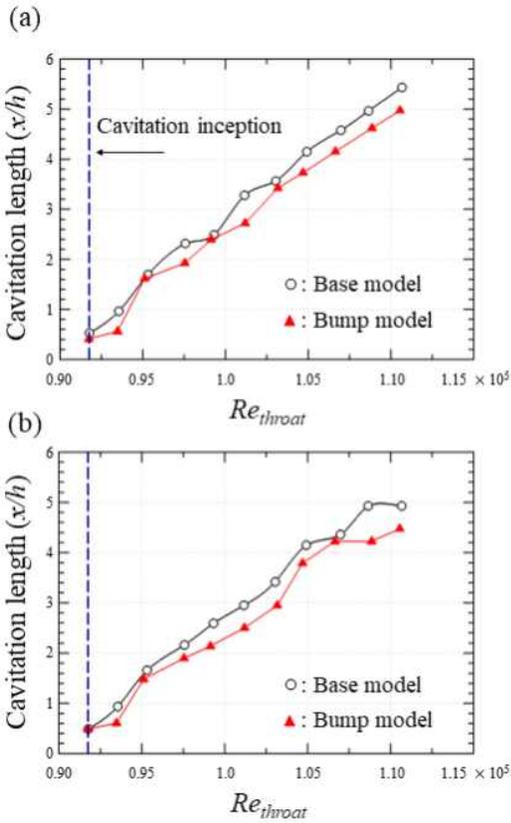


Fig. 8. Variation in the cavitation length with the Reynolds number on the (a) top and (b) bottom surfaces.

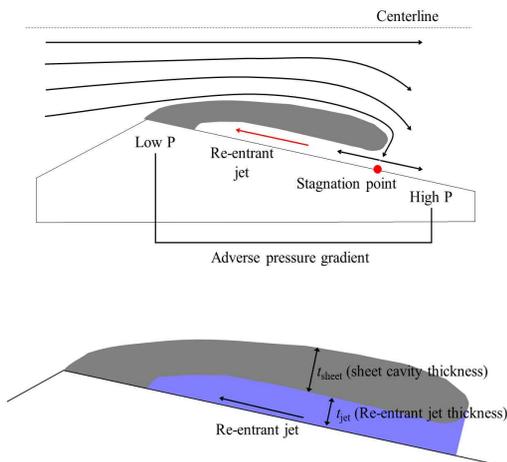


Fig. 9. Development process of sheet cavitation in Venturi.

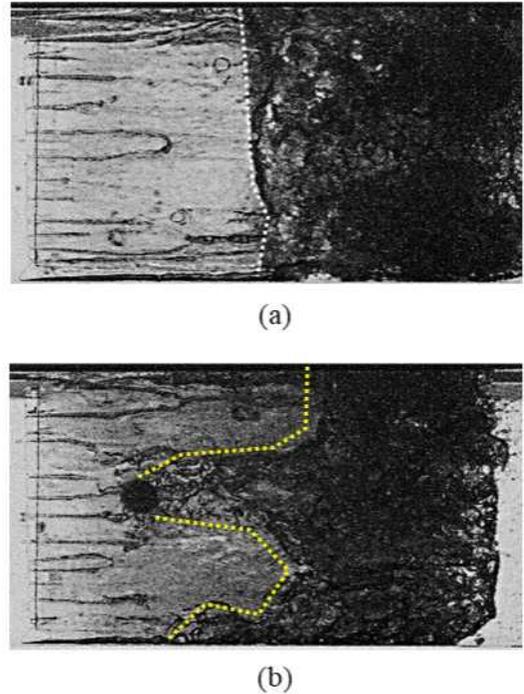


Fig. 10. Instantaneous high-speed images for the (a) base model and (b) bump model at $Re_{throat} = 1.08 \times 10^5$.

인해 벤투리 발산부에서는 역압력 구배가 발생하며, 이로 인해 유동이 벤투리의 정체점에 도달한 후 벤투리 벽면 근처에서 유동방향과 반대로 흐르는 재진입 제트(re-entrant jet)가 형성된다. Callenaere 등⁽³⁾은 캐비테이션 길이가 재진입 제트의 두께(t_{jet})에 반비례하며 sheet cavity의 두께(t_{sheet})에 비례함을 보고한 바 있다. 이는 재진입 제트가 강할수록 캐비테이션 길이가 짧아짐을 의미한다. Fig. 10은 재진입 제트에 의해 sheet cavity가 cloud cavity로 천이 되는 과정에서 기본 벤투리 모델과 범프 모델의 순간 이미지를 나타낸다. 기본 모델의 경우(Fig. 10(a)), 재진입 제트가 유동 반대 방향(왼쪽)으로 발달함에 따라 sheet cavity(밝은 영역)가 cloud cavity(어두운 영역)로 천이되는 것을 볼 수 있다. 즉, 재진입 제트는 sheet cavity와 cloud cavity의 경계를 나타내는 점선의 위치까지 침투하고 있다. 이 때 재진입 제트의 발달 정도는 너비 방향으로 거의 동일하다. 반면 범프 모델의 경우(Fig. 10(b)), 재진입 제

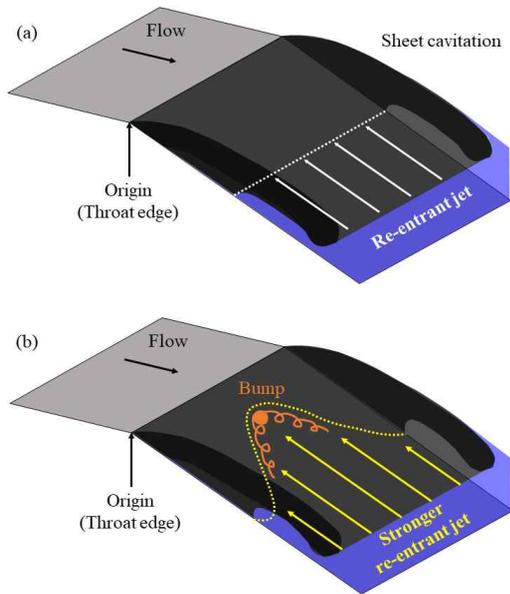


Fig. 11. Development of the re-entrant jet for the (a) base model and (b) bump model.

트는 용기부의 후류를 따라 상류방향으로 더 빠르게 발달하는 것을 볼 수 있다. 이는 용기부의 후류가 재진입 제트를 강화시킴을 의미한다.

앞서 서술한 재진입 제트의 발달 양상을 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11(a)의 기본 벤투리 모델의 경우 sheet cavity 끝단에서 재진입 제트가 너비 방향으로 균일하게 형성된다. 반면 Fig. 11(b)의 범프 모델의 경우 반구형 용기부에서 발생하는 후류로 인해 국부적으로 압력강하가 발생하여 벤투리 표면 근처의 역압력 구배가 상대적으로 커지게 되고, 이로 인해 반구형 용기부 뒤쪽으로 상대적으로 강한 재진입 제트가 발달하는 것으로 보인다. 반구형 용기부에 의해 강화된 재진입 제트는 캐비테이션 길이를 감소시키며, 이로 인해 캐비테이션 발생량이 줄어들어 3.1에서 확인한 바와 같이 압력손실계수가 감소하고 토출계수는 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 벤투리 관의 발산부에 반구형 용기부를 적용했을 때 벤투리의 성능이 어떻게

달라지는지 살펴보고, 성능 차이의 원인이 되는 캐비테이션 발달의 차이점을 알아보았다. 반구형 용기부를 적용하면 벤투리의 압력손실이 줄어 들고 토출량이 증가하는 것을 확인하였으며, 이러한 성능 개선 효과는 캐비테이션 발생량의 감소에 기인한다. 용기부에 의한 캐비테이션 발생량의 감소는 재진입 제트의 강화에 의한 것으로 설명되었으며, 반구형 용기부에서 발생하는 후류로 인해 벤투리 발산부 표면의 역압력 구배가 증가하여 재진입 제트가 강화되는 것으로 보인다.

캐비테이션 현상은 다양한 유체기계의 운용 환경 및 조건에 따라 구동 목적을 달성하기 위해 활용될 수도 있고 오히려 목적 달성을 방해하는 요인이 될 수도 있다. 따라서 캐비테이션을 촉진 또는 억제하기 위한 제어방법론을 확보하는 것이 중요하다. 이번 연구에서 살펴본 반구형 용기부는 캐비테이션 발달과정에서 재진입 제트의 발달을 제어하여 캐비테이션을 저감시키는 점에서 캐비테이션 제어의 중요한 메커니즘을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 추후 다양한 유동 가시화 기법을 적용하여 재진입 제트의 강화에 따른 제트 두께의 변화를 자세히 살펴보고 실제 공학문제에 적용할 수 있는 가능성을 높이기 위해 용기부의 크기 및 개수, 배열 형태 등이 캐비테이션에 미치는 영향을 살펴보는 것도 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 집단연구지원사업(2021R1A4A1032023)을 통해 한국연구재단의 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Petkovšek, M. and Dular, M., 2013, "Simultaneous observation of cavitation structures and cavitation erosion," *Wear.*, Vol.300(1-2), pp.55~64.
- 2) Dular, M., & Petkovšek, M. (2015). On the mechanisms of cavitation erosion—Coupling high speed videos to damage patterns. *Experimental*

- Thermal and Fluid Science, 68, 359-370.
- 3) Callenaere, M., Franc, J., Michel M. and Riondet M., 2001, "The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet," J. Fluid Mech., Vol. 444, pp.223~256.
 - 4) Stanley, C., Barber, T. and Rosengarten, G., 2014. "Re-entrant jet mechanism for periodic cavitation shedding in a cylindrical orifice," Int. J. Heat Fluid Flow., Vol.50, pp.169~176.
 - 5) Pelz, P. F., Keil, T. and Groß, T. F., 2017, "The transition from sheet to cloud cavitation," J. Fluid Mech., Vol.817, pp.439~454.
 - 6) Simpson, A. and Ranade, V. V., 2019, "Modeling hydrodynamic cavitation in venturi: Influence of venturi configuration on inception and extent of cavitation," AIChE. J., Vol.65(1), pp.421~433.
 - 7) Li, M., Bussonnière, A., Bronson, M., Xu, Z. and Liu, Q., 2019, "Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles," Miner. Eng., Vol.132, pp.268~274.
 - 8) Kadivar, E., Timoshevskiy, M. V., Pervunin, K. S. and el Moctar, O., 2020, "Cavitation control using cylindrical cavitating-bubble generators (CCGS): Experiments on a benchmark CAV2003 hydrofoil," Int. J. Multiph. Flow., Vol.125, pp.103186.
 - 9) Kawanami, Y., Kato, H., Yamaguchi, H., Tanimura, M. and Tagaya, Y., 1997, "Mechanism and control of cloud cavitation," J. Fluids Eng., Vol.119(4), pp.788~794.
 - 10) Coutier-Delgosha, O., Devillers, J. F., Leriche, M. and Pichon, T., 2005, "Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation," J. Fluids Eng., Vol.127(4), pp.726~733.
 - 11) Li, Y., Chen, H., Wang, J. and Chen, D., 2010, "Effect of grooves on cavitation around the body of revolution," J. Fluids Eng., Vol.132(1).
 - 12) Arndt, R. E. and Ippen, A. T., 1968, "Rough surface effects on cavitation inception," J. Basic Eng., Vol.90(2), pp.249~261.
 - 13) Stutz, B., 2003, "Influence of roughness on the two-phase flow structure of sheet cavitation," J. Fluids Eng., Vol.125(4), pp.652~659.
 - 14) Danlos, A., Ravelet, F., Coutier-Delgosha, O. and Bakir, F., 2014, "Cavitation regime detection through Proper Orthogonal Decomposition: Dynamics analysis of the sheet cavity on a grooved convergent-divergent nozzle," Int. J. Heat Fluid Flow., Vol.47, pp.9~20.
 - 15) Bae, H. W., Lee, S. M., Song, M. S. and Sung, J. Y., 2019, "Flow visualizations and analysis on characteristics of bubbly flows exhausted from a venturi-type bubble generator with an air vent," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol.17(1), pp.60~68.
 - 16) Choi, C. H., Choi, S. W. and Song, S. M., 2017, "Design and Performance Evaluation of Visualization System for Measuring the Void Fraction of Two-phase Flow," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol.15(1), pp.11~18.
 - 17) Kim, G. R., Choi, S. W., Kim, Y. K. and Kim, K. C., 2012, "Measurement of Bubble Diameter and Rising Velocity in a Cylindrical Tank using an Optical Fiber Probe and a High Speed Visualization Technique," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol.10(2), pp.14~19.
 - 18) Kim, S. M., Jeong, W. T. and Kim, K. C., 2010, "Visualization Study on Kinematics of Bubble Motion in a Water Filled Cylindrical Tank," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol.8(3), pp.41~48.
 - 19) Yi, J. J., Kim, M. J., Paik, B. G. and Kim, K. C., 2022, "A study on the shape of supercavitation center line change according to the gravity and angle of attack effect," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol.20(1), pp.18~28.
 - 20) Park, S. C., Kim, D. Y., Choi, S. H., Lee, C. H., Lim, Y. H., Lee, C. Y., Lee, Y. W. and Yu, D. I., 2023, "Hydrodynamic effects of heater

- lengths on pool boiling critical heat flux,” *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol.21(1), pp.67~73.
- 21) Moon, E. S. and Kim, D. G., 2010, “Interaction between a rising toroidal bubble and a free surface,” *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol.8(3), pp.41~48.
- 22) Zuo, Z., Zhang, H., Ren, Z., Chen, H. and Liu, S., 2022, “Thermodynamic effects at Venturi cavitation in different liquids,” *Phys. Fluids*, Vol.34(8), pp.083310.
- 23) Zhang, H., Zuo, Z., Mørch, K. A. and Liu, S., 2019, “Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics,” *Phys. Fluids*, Vol.31(9), pp.097107.
- 24) Cooper, J. R. and Dooley, R. B., 2007, “Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam,” *International Association for Properties of Water and Steam*, Lucerne, Switzerland, 2007.
- 25) Rudolf, P., Hudec, M., Gríger, M. and Štefan, D., 2014, “Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations,” *In. EPJ. Web of conferences.*, Vol.67, pp.02101, EDP Sciences.
- 26) Bermejo, D., Escaler, X. and Ruíz-Mansilla, R., 2021, “Experimental investigation of a cavitating Venturi and its application to flow metering,” *Flow Meas. Instrum.*, Vol.78, pp.101868.
- 27) International Organization for Standardization, 2003, “Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-section Conduits Running Full: Mesure de Débit Des Fluides Au Moyen D'appareils Déprimogènes. Inseres Dans Des Conduites en Charge de Section Ciculaire. General Principles and Requirements,” *International Organization for Standardization*.
- 28) Kadivar, E., Timoshevskiy, M. V., Pervunin, K. S. and el Moctar, O., 2020, “Cavitation control using cylindrical cavitating-bubble generators (CCGs): Experiments on a benchmark CAV2003 hydrofoil,” *Int. J. Multiph. Flow.*, Vol.125, pp.103186.
- 29) Zhu, J., Wang, S. and Zhang, X., 2020, “Influences of thermal effects on cavitation dynamics in liquid nitrogen through venturi tube,” *Phys. Fluids*, Vol.32(1), pp.012105.