

단일 거칠기 요소가 벤투리 캐비테이션에 미치는 영향

황종빈* · 신이수* · 김주하†

Effects of a single roughness element on Venturi cavitation

Jongbin Hwang*, Yisu Shin* and Jooha Kim†

Abstract In this study, we investigate the effects of a single roughness element on Venturi cavitation. The single roughness element of hemispherical shape is installed at the throat inlet of a Venturi tube. Since the wake behind the roughness element induces an additional pressure drop, cavitation inception occurs at a higher Cavitation number for the Venturi model with the single roughness element than for the Venturi model with no roughness. Cavitation bubbles form along the wake of the roughness element and lengthen in the streamwise direction as the Cavitation number decreases, forming a longitudinal cavitation. With a further decrease in the Cavitation number, the longitudinal cavitation bubble merges with the sheet cavitation initiated from the exit edge of the Venturi tube throat, followed by the shedding of cloud cavitation. The merging of the longitudinal cavitation and sheet cavitation is accompanied by a sudden decrease in the discharge coefficient and an increase in the pressure loss coefficient as it chokes the flow inside the Venturi tube.

Key Words : Cavitation (공동 현상), Venturi (벤투리), Roughness (거칠기), Flow visualization(유동 가시화)

기호설명

α : Venturi converging angle
 β : Venturi diverging angle
 γ : Venturi area ratio
 ρ : Liquid density
 ζ : Pressure loss coefficient

σ : Cavitation number
 A_{throat} : Venturi throat area
 C_D : Discharge coefficient
 W : Venturi width
 H : Venturi height
 L : Venturi length
 d : Single roughness element diameter
 P_{throat} : Pressure at Venturi throat
 P_{vapor} : Vapor pressure
 P_{in} : Pressure at Venturi inlet
 P_{out} : Pressure at Venturi outlet
 Q : Volume flow rate
 V_{throat} : Venturi throat flow velocity

† Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Associate Professor
E-mail: kimjooaha@unist.ac.kr

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

1. 서론

캐비테이션은 작동유체의 유속 증가에 따라 액체에서 압력강하가 발생해 압력이 포화증기압 이하로 낮아지면서 기포가 발생하는 현상을 말한다. 캐비테이션은 유체가 액체상태와 기체상태로 이루어져 있는 다상 유동 현상으로 수중익, 수중 프로펠러와 같은 유체기계나 오리피스(orifice), 벤투리(Venturi) 형상의 밸브나 관에서 흔히 관찰되는 유체역학적 현상이다. 유체기계 표면이나 단면적의 변화가 있는 관에서 캐비테이션에 의해 발생하는 기포는 기계나 벽 주위에서 붕괴되면서 충격파를 발생시켜 심각한 부식과 소음을 유발한다. 이러한 캐비테이션의 영향은 핵심부품과 장치의 성능 및 수명을 결정하는데 있어서 중요하게 고려해야 할 사항이다. 반면 수중익과 일부 유체기계 장치에서는 캐비테이션을 활용하여 항력 감소 또는 속도 증강효과⁽¹⁾를 얻을 수 있는데, 이처럼 캐비테이션이 발생하는 조건과 기포의 발달 양상에 따라 장점으로 적용될 수 있다. 각 장치마다 캐비테이션이 발생하는 조건과 기포의 발달 양상은 차이가 있으며, 이번 연구에서는 벤투리 형상의 관에서 발생하는 캐비테이션에 대해 살펴보고자 한다.

벤투리 관은 캐비테이션 현상이 발생하는 대표적인 유체장치로, 유체의 압력을 관의 일부 구간에서 변형하기 위해 관의 단면적이 수축 및 팽창하는 형상적 특징을 갖는다. 캐비테이션과 같은 이상 유동은 짧은 시간 동안 기포가 빠르게 거동하기 때문에 많은 연구자들이 초고속카메라를 이용한 비전 기반의 가시화를 통해 연구를 진행해왔다⁽²⁻⁵⁾. Fig. 1은 벤투리 관에서 발생하는 캐비테이션 현상을 도식화하여 나타낸 것이다. 벤투리 관내 단면적 변화로 인한 유속과 압력 변화는 유체의 연속 방정식과 베르누이 방정식을 통해 알 수 있으며, 단면적 감소로 인한 압력 강하는 벤투리 목(throat)에서 최대값을 갖는다. 벤투리 목에서 압력 강하로 인해 유체의 압력이 포화증기압 이하로 내려가면 캐비테이션이 발생하기 시작한다. Fig. 1에 모사된 바와 같이 벤투리 캐비테이션 구조는 벤투리 목에서

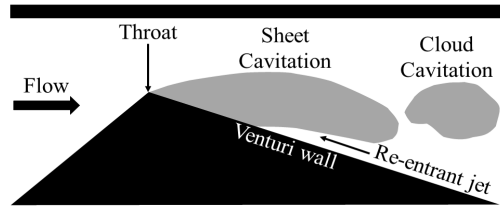


Fig. 1. Structure of the cavitation in Venturi

sheet cavitation과 cloud cavitation으로 구분할 수 있으며, re-entrant jet^(6,7)에 의해 sheet cavitation 끝단에서 cloud cavitation으로 발달된다.

벤투리 캐비테이션 현상의 물리적 특성과 제어에 대한 사전 연구들은 주로 관의 입출구 각도를 변형시키거나 단면 형상을 변형하여 구조적으로 캐비테이션을 제어하는 연구^(8,9)가 수행되었다. 그러나 벤투리 관에서 구조적인 변형을 통한 캐비테이션 제어를 위해서는 벤투리에 연결되는 추가적인 관로의 구조 변화도 이뤄져야 하며, 해당 과정에서 유체기계의 전체 시스템 성능에도 변화가 발생할 수 있다. 이러한 점을 고려할 때 벤투리의 구조적인 제어 방법을 적용할 수 없는 경우에서 캐비테이션을 제어하는 방법이 필요하다. 구조적인 제어 이외로 표면 거칠기를 적용한 캐비테이션 제어의 선행연구들은 주로 수중익(hydrofoil)^(10,11), 유압기계(hydraulic-machine)⁽¹²⁾, 노즐(nozzle)⁽¹³⁾과 같은 유체 장치에서 수행되었으며, 장치 표면에 구멍을 내거나 장애물을 설치하여 표면 거칠기가 캐비테이션에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 상술한 바와 같이 벤투리 장치에서 구조적인 변화를 통한 캐비테이션을 제어하기 위한 연구는 활발하게 이루어지고 있으나, 상대적으로 표면 거칠기를 벤투리 장치에 적용하여 제어하기 위한 시도^(14,15)는 많지 않다. 표면 거칠기가 캐비테이션을 제어하는 기본 매커니즘을 확인하기 위해 본 연구에서는 단일 거칠기 요소를 벤투리 목에 적용하여 이에 따른 벤투리 관에서 발생하는 물리적 특성의 변화를 비교하고, 기본 벤투리 모델과 단일 거칠기 요소가 적용된 모델에 대해 유동 가시화를 실시하여 각 모델 별로 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 발생 장치를 도식화하여 나타낸 것이다. 캐비테이션 발생 장치는 펌프와 상류 및 하류 탱크, 벤투리가 연결되어 전체적으로 폐쇄된 시스템을 갖는다. 폐쇄된 시스템은 펌프를 통한 유량 제어에 따른 압력 변화만으로 캐비테이션 수를 측정하기 위한 목적으로 설계되었다. 벤투리를 기준으로 양쪽 탱크에는 초기 전체 시스템 압력을 제어하기 위한 진공펌프가 연결되어 있으며 온도 센서와 용존 산소 측정센서가 설치되어 있다. 또한 벤투리 입출구에 설치된 압력 센서는 캐비테이션 유동에 의한 압력변화를 측정하며 관로에 설치된 유량계를 통해 유량을 측정할 수 있도록 하였다. 펌프의 성능을 고려한 벤투리 입구에서 도달 가능한 최대 유속은 1.2 m/s이다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 벤투리 관의 정면도와 평면도를 나타낸다. 벤투리의 길이, 너비, 높이는 각각 400mm, 20mm, 80mm이며 입출구 각도는 16°, 8°로 입출구 단면적과 벤투리 목의 단면적비는 10:1이다. 벤투리 입구와 목의 면적비와 입출구 각도는 벤투리 목에서 도달할 수 있는 유속과 압력 범위에 영향을 주며 낮은 유량 조건에서도 벤투리 목에서 유체의 증기압 이하로 압력강하가 이뤄져 캐비테이션을 발생시킬 수 있는 조건으로 설계되었다. 또한 실험 전 초기 전체 시스템 압력을 진공펌프를 통해 낮추어 유량에 따른 압력강하가 상대적으로 적

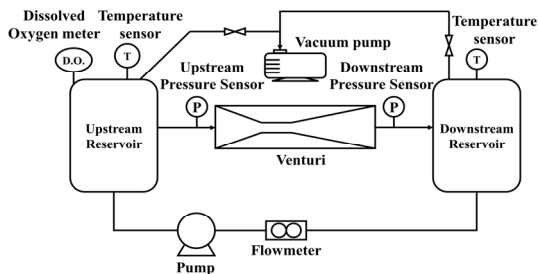


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for Venturi cavitation

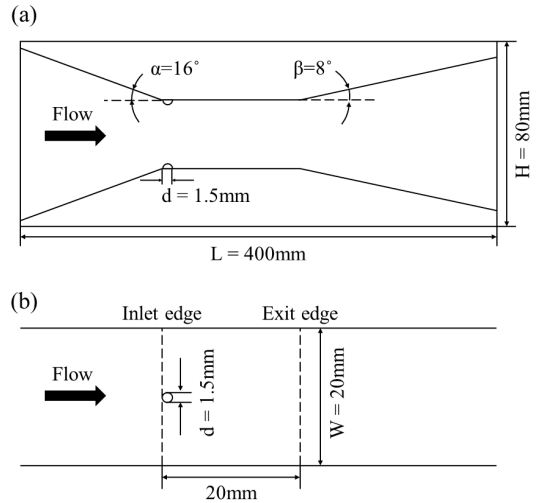


Fig. 3. Geometry of the Venturi with single roughness element (a) Front view, (b) Top view. The Figures are not to scale.

어도 유체의 압력이 증기압 아래로 내려가 캐비테이션을 용이하게 발생시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 단일 거칠기 요소에서 발달하는 후류를 캐비테이션 제어에 이용하고자 하였다. 따라서 간단한 형상을 가지면서도 상대적으로 큰 후류를 형성하는 구 형태의 거칠기를 벤투리에 적용하였으며, 거칠기 요소를 벤투리 표면에 안정적으로 부착하기 위해 반구 형태의 단일 거칠기 요소를 사용하였다. 단일 거칠기 요소의 후류가 경계층에 묻히는 것을 막기 위해 반구의 직경($d = 1.5 \text{ mm}$)은 벤투리 목에서 발달하는 경계층 두께보다 크도록 설정하였으며, Fig. 3에 도시한 바와 같이 벤투리 목이 시작되는 모서리에 접하면서 너비 방향으로 중앙에 위치하도록 설치하였다. 선행연구^(9,16)에 따르면 벤투리 목의 길이에 따른 관 전체의 압력 손실은 미미한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 단일 거칠기 요소에서 발달하는 후류를 활용하기 위해, Fig. 3(b)에 도시한 바와 같이 벤투리 목의 길이를 $10d$ 이상으로 충분히 길게 하였다. 본 연구에서는 단일 거칠기 요소가 없는 기본 벤투리와 단일 거칠기 요소를 적용한 벤투리 모델을 대상으로 논의를 진행하고자 한다.

2.2 실험 방법

2.2.1 벤투리 캐비테이션 실험

캐비테이션 실험은 Fig. 2에 도시화된 벤투리 캐비테이션 발생 장치에서 진행되었으며 초기 전체 시스템 압력을 0.5 bar로 설정하여 낮은 유량에서 발생하는 작은 압력강하만으로도 캐비테이션을 발생시킬 수 있도록 설정하였다. 캐비테이션은 작동유체의 종류, 온도, 용존산소의 양에 따라 물리적 특성과 기포의 발달에 차이가 발생한다고 보고되었다.^(17,18) 이러한 점을 고려하여 작동유체는 온도 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 물을 사용하였으며, 용존산소에 의한 영향을 줄이기 위하여 진공펌프로 전체 시스템 압력을 음압으로 유지하는 과정을 통해 용해된 용존산소를 제거하여 매 실험 전 용존산소량이 2 mg/L 이하가 되도록 하였다.

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

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

$$\zeta = \frac{P_{in} - P_{out}}{\frac{1}{2}\rho V_{throat}^2} \quad (3)$$

캐비테이션 현상은 유체의 증기압력에 대한 벤투리 목에서 측정된 압력사이의 비율과 유속으로 정의되는 무차원수인 캐비테이션 수(σ)로 나타낼 수 있다.(Eq. 1) 이때 유체의 연속 방정식과 베르누이 방정식을 기반으로 벤투리 입구에서 측정된 압력과 유량을 통해 벤투리 목에서의 압력과 유속을 구할 수 있다. 벤투리 캐비테이션 실험은 펌프의 출력을 2 L/min 간격으로 점진적으로 증가시키면서 진행되었으며 최대출력에서 기본 벤투리와 단일 거칠기 모델 각각에 대한 캐비테이션 수는 0.96과 1.06으로 측정되

었다. 물의 밀도와 증기압은 물과 증기 성질에 대한 국제 협회 문헌을⁽¹⁹⁾ 참고하여 실험이 진행된 온도에 해당하는 값을 보간하여 사용하였다. 유량계수와 압력손실계수는 선행 연구^(20,21)에서 비 캐비테이션(non-cavitation) 및 캐비테이션 조건을 모두 포함하는 범위에서 벤투리의 구조적 성능을 연구하는데 사용되는 것으로 보고되었다. 벤투리는 입구와 출구에서의 압력비를 기반으로 캐비테이션이 발생하지 않을 때 벤투리 목을 통과하는 유체의 유량이 출구 압력에 상관없이 일정해지는 원리를 이용하여 유체 시스템의 유량제어에 사용된다. 이상적인 벤투리에서의 유량은 단면적 변화와 상관없이 일정한 값을 가져야 하지만 마찰손실 등으로 인하여 실제 측정되는 유량은 이상적인 값보다 작기 때문에 유량계수의 개념을 도입하여 Eq. 2을 사용하여 계산할 수 있다. Eq. 3은 압력손실계수로 벤투리, 오리피스, 밸브와 같은 관유동에서 유압 구성 요소의 저항을 특성화 하는데 사용되는 무차원 수이다. 여기서 P_{in} 과 P_{out} 은 벤투리 입구와 출구에 위치한 압력센서에서 측정되며 V_{throat} 은 Eq. 1과 동일한 방식으로 계산하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 실험이 수행된 캐비테이션 수 범위에서 기본 벤투리 모델과 단일 거칠기 모델의 유량계수와 압력손실계수를 계산하여 비교하였다.

2.2.2 캐비테이션 유동 가시화 실험

벤투리 캐비테이션 유동 가시화 실험의 개략도를 Fig. 4에 도시하였다. 유동 가시화 실험은 2.2.1의 벤투리 캐비테이션 실험과 동시에 진행되었으며 캐비테이션 기포의 발생, 성장 및 소멸과정을 촬영하기위해 벤투리 정면과 상부에 각각 초고속 카메라(Front view : Phantom VEO, Top view : Phantom Miro M310)를 설치하여 촬영하였다. 기본 벤투리와 단일 거칠기 벤투리 모두 동일한 촬영 조건으로 촬영하였으며 이때 촬영한 가시화 영상의 해상도, 초당 프레임, 노출 시간은 각각 1280 x 456 pixel, 2000 fps, 40 μs 이다. 또한 정면부의 초고속 카메라와 상부의 초고속 카메라는 서로 동기화하여 동일한 순간

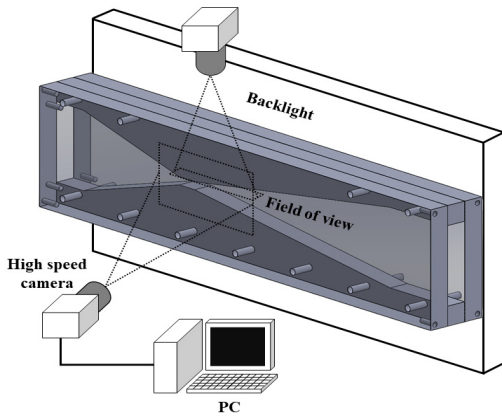


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup for the Venturi cavitation visualization

의 영상을 촬영할 수 있도록 설정하였다. 캐비테이션 기포를 촬영하기 위해 벤투리는 투명한 아크릴 소재로 제작하였으며, 벤투리 뒷배경에 면조명을 설치하여 발생된 기포가 아크릴을 통과하는 빛을 가리면서 생기는 그림자를 촬영하는 원리를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유량 계수 및 압력 손실 계수

Fig. 5는 기본 벤투리 모델과 단일 거칠기 모델의 캐비테이션 수(σ)에 따른 유량계수(C_D)와 압력손실계수(ζ)의 변화를 나타낸 것이다. 기본 벤투리 모델의 유량계수(Fig. 5(a)의 검정색 동그라미)는 높은 캐비테이션 수에서 약 2.0으로 일정하게 유지되며 캐비테이션 수가 감소함에 따라 $\sigma = 1.0$ 근처에서 급격히 감소한다. 유량계수의 변화와 캐비테이션 현상 사이의 관계를 살펴보기 위해 기본 벤투리 모델에서 캐비테이션이 시작되는 지점(cavitation inception)을 검정색 점선($\sigma = 0.98$)으로 표시하였다. 유량계수가 급격히 감소하기 시작하는 지점과 캐비테이션이 시작되는 지점이 거의 동일한 것을 볼 수 있으며, 이는 선행연구들^(21,22)과도 일치하는 결과이다. 이와 같은 특성은 캐비테이션이 시작됨에 따라 벤투리 목 이후에서 기포로 인해 유동이 질식

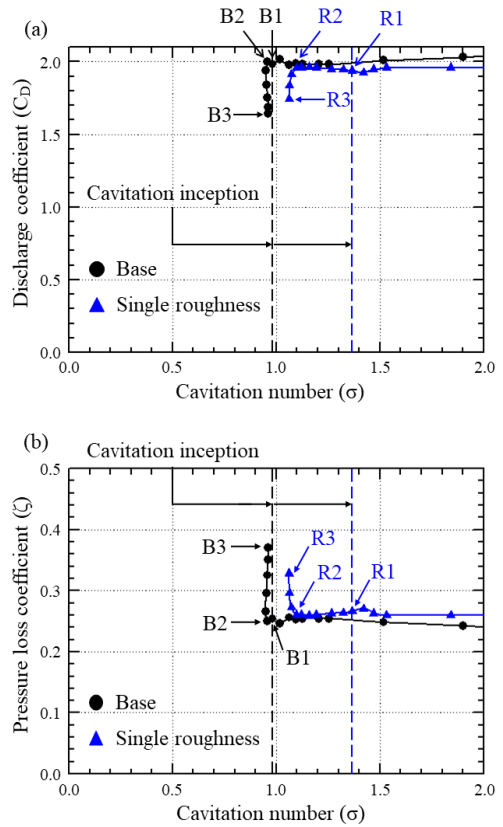


Fig. 5. Variation in the (a) discharge coefficient and (b) pressure loss coefficient with the cavitation.

(choking)되기 때문에 발생하는 것에 기인하며, 이로 인해 벤투리 입출구 간의 압력차도 급격히 증가하여 Fig. 5(b)에 도시한 것과 같이 기본 벤투리 모델의 압력손실계수도 캐비테이션 시작과 함께 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

한편, 단일 거칠기 모델은 기본 벤투리 모델과는 다른 특성을 보인다. Fig. 5(a)의 파란색 세모는 단일 거칠기 모델의 유량계수 변화를 나타낸다. 단일 거칠기 모델의 유량계수는 높은 캐비테이션 수에서 약 2.0으로 유지되며, 이는 기본 벤투리 모델과 유사한 결과이다. 캐비테이션 수가 감소함에 따라 단일 거칠기 모델에서는 $\sigma = 1.1$ 근처에서 유량계수가 급격히 감소하며, 감소하는 기울기는 기본 모델과 비슷하다. 유량계수가 급격히 감소하기 시작하는 캐비테이션 수는 단일 거칠기 모델이 기본 벤투리 모델에 비

해 0.1 정도 높다. 흥미로운 점은 단일 거칠기 모델에서 캐비테이션이 시작하는 지점($\sigma = 1.36$; 파란색 점선)은 유량계수가 감소하기 시작하는 지점과 큰 차이를 보인다는 것이다. 즉, 단일 거칠기 모델에 대해 캐비테이션은 $\sigma = 1.36$ 에서 시작하지만 유량계수의 급격한 감소는 $\sigma \gg 1.1$ 에서 나타난다. 이는 단일 거칠기 모델에서 발생하는 기포는 캐비테이션 초기 단계에서는 벤투리 성능에 미치는 영향이 미미하며 유속의 증가에 따른 캐비테이션의 발달도 기본 벤투리에 비해 천천히 진행된다는 것을 의미한다. 유속의 증가(또는 캐비테이션 수의 감소)에 따른 캐비테이션의 구체적인 발달과정은 3.2에서 좀 더 자세히 살펴볼 것이다. Fig. 5(b)의 파란색 세모는 단일 거칠기 모델의 압력손실계수 변화를 나타낸다. 압력손실계수도 캐비테이션이 시작되는 캐비테이션 수보다 0.25 정도 낮은 캐비테이션 수에서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

3.2 유동 가시화 결과

본 절에서는 캐비테이션 기포의 발달 과정을 단계적으로 살펴보기 위해 캐비테이션이 시작하는 지점(Fig. 5 B1, R1; B와 R은 각각 기본 벤투리 모델과 단일 거칠기 모델을 의미함), 유량계수와 압력손실계수의 급격한 변화가 시작되는 지점(Fig. 5 B2, R2), 유량계수가 최소(또는 압력손실계수가 최대)가 되는 지점(Fig. 5 B3, R3)에서 기본 벤투리 모델과 단일 거칠기 모델에 대한 유동 가시화 결과를 논의하고자 한다.

3.2.1 기본 벤투리 모델

Fig. 5의 B1 - B3에 해당하는 캐비테이션 수에서의 정면과 평면에 대한 유동 가시화 결과를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 6의 노란 화살표와 Fig. 7의 노란 점선은 벤투리 목에서 입출구의 모서리를 나타낸다. B1에서 캐비테이션 기포는 벤투리 목의 입구 쪽 모서리에서 얇은 시트(sheet) 형태로 형성(Fig. 6(a))되며 발생한 시트 캐비테이션은 벤투리 목의 입출구의

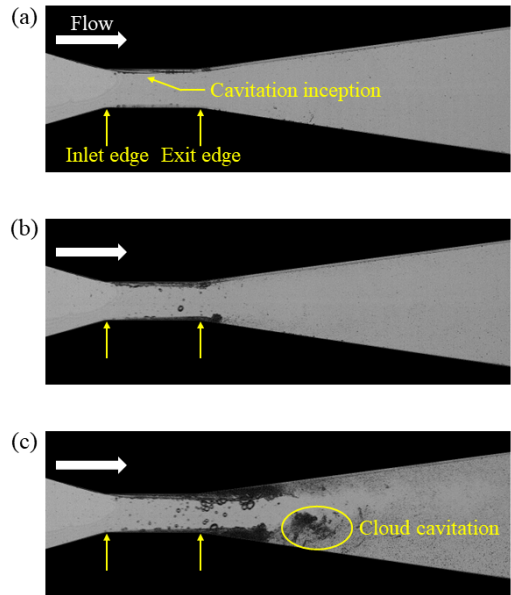


Fig. 6. Instantaneous image in the front view of the base Venturi model at (a) B1 ($\sigma = 0.982$), (b) B2 ($\sigma = 0.958$), and (c) B3 ($\sigma = 0.96$).

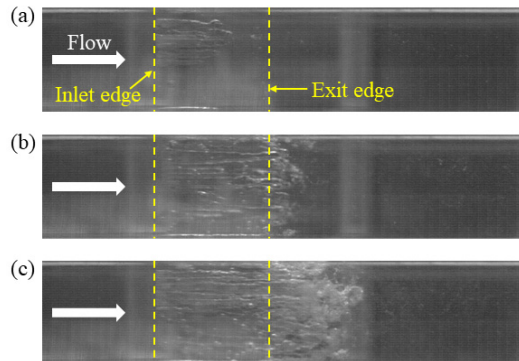


Fig. 7. Instantaneous image in the top view of the base Venturi model at (a) B1 ($\sigma = 0.982$), (b) B2 ($\sigma = 0.958$), and (c) B3 ($\sigma = 0.96$).

모서리 사이 구간에서 머무는 것(Fig. 7(a))을 확인할 수 있다. 벤투리 입구의 유속이 증가함에 따라 B2에 도달하면 벤투리 목의 입구 쪽 모서리에서 발생하는 시트 캐비테이션은 두께가 약간 증가(Fig. 6(b))하면서 출구 쪽 모서리까지 발달(Fig. 7(b))한다. 유속이 최대일 때(B3) 시트 캐비테이션은 입구 쪽 모서리부터 출구 쪽 모서리

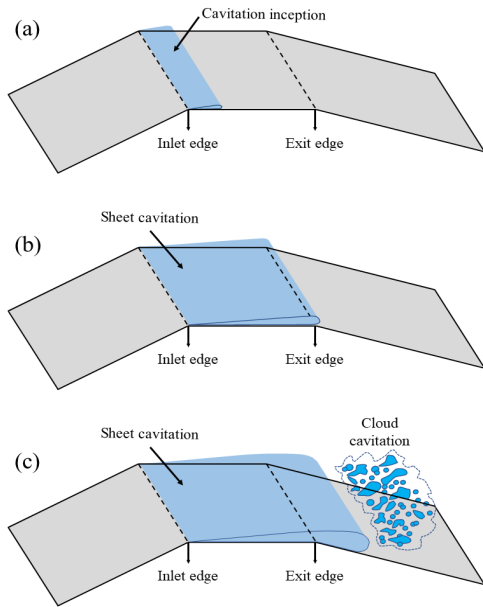


Fig. 8. Cavitation development structure of base Venturi model at (a) B1 ($\sigma = 0.982$), (b) B2 ($\sigma = 0.958$), and (c) B3 ($\sigma = 0.96$).

이후까지 확장(Fig. 7(c))되면서 두께가 눈에 띄게 증가(Fig. 6(c))하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 B3에서는 시트 캐비테이션이 떨어져 나가면서 구름 형태의 캐비테이션 (cloud cavitation)이 발생하는 것을 볼 수 있다.

위에 설명한 기본 벤투리 모델의 캐비테이션 발달 과정을 Fig. 8에 도식화하였다. 기본 벤투리 모델의 캐비테이션은 벤투리 목의 입구 쪽 모서리에서 시작(Fig. 8(a))되며 유속이 증가함에 따라 매우 빠르게 출구 쪽 모서리까지 발달(Fig. 8(b))한다. 벤투리 목의 입구에서 출구까지 발달하는 동안 캐비테이션은 얇은 시트 형태를 유지하기 때문에 벤투리의 유효 단면적을 거의 변화시키지 않으며, 따라서 유량계수(Fig. 5(a))와 압력손실계수(Fig. 5(b))에 미치는 영향도 미미하다. 유속이 더욱 증가하면 시트 캐비테이션은 벤투리의 확산부까지 길어지며, 역압력 구배에 의해 떨어져나가면서 구름 형태의 캐비테이션으로 발달(Fig. 8(c))한다. 이는 벤투리의 유효 단면적을 크게 감소시켜 유량계수의 감소(Fig. 5(a))와 압력손실계수의 증가(Fig. 5(b))를 수반한다.

3.2.2 단일 거칠기 모델

Figs. 9와 10은 단일 거칠기 모델의 R1 - R3에 해당하는 캐비테이션 수에서의 정면과 평면에 대한 유동 가시화 결과를 나타낸다. R1에서 캐비테이션 기포는 벤투리 목 입구에 설치된 거칠기 기로부터 형성(Fig. 9(a))되기 시작한다. 이 때, Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 캐비테이션은 단일

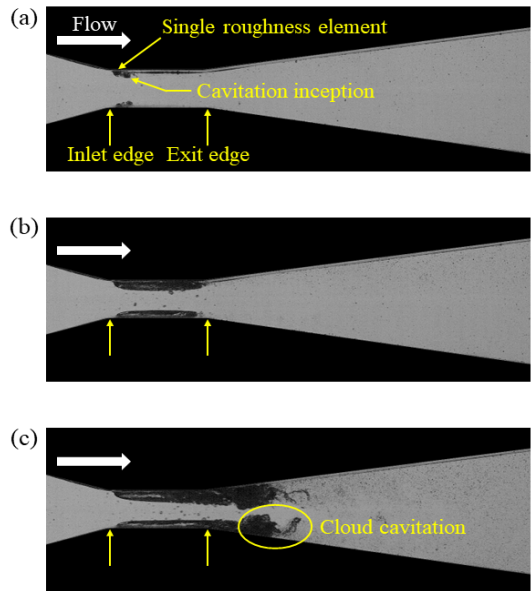


Fig. 9. Instantaneous image in the front view of the single roughness model at (a) R1 ($\sigma = 1.366$), (b) R2 ($\sigma = 1.122$), and (c) R3 ($\sigma = 1.061$).

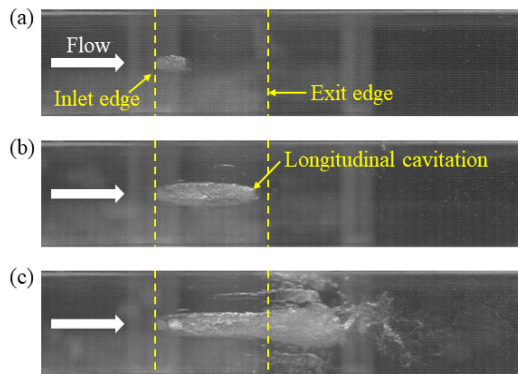


Fig. 10. Instantaneous image in the top view of the single roughness model at (a) R1 ($\sigma = 1.366$), (b) R2 ($\sigma = 1.122$), and (c) R3 ($\sigma = 1.061$).

거칠기 요소 뒤쪽에 국부적으로 발생하며, 거칠기 요소가 없는 지역에서는 캐비테이션이 발생하지 않는다. 이는 반구 형태의 거칠기 요소 뒤에 후류가 생성되면서 국부적으로 추가적인 압력 강하가 발생하기 때문이다. 거칠기 요소가 추가적인 압력 강하를 유도하기 때문에 단일 거칠기 모델(Fig. 10(a))이 기본 벤투리(Fig. 7(a))보다 더 높은 캐비테이션 수(더 낮은 유속)에서 캐비테이션이 시작하도록 유도한다. 유속이 증가함에 따라 캐비테이션은 벤투리 목 출구까지 발달(Fig. 9(b))한다. 캐비테이션이 R1에서 R2까지 발달하는 동안 기포는 거칠기 요소의 후류 영역에 국한되어 발생하기 때문에 유동방향으로 길쭉한 형태(longitudinal cavitation; Fig. 10(b))를 갖는다. 단일 거칠기 모델에서 발생하는 종방향 캐비테이션은 거칠기 요소의 크기와 비슷한 두께를 가지며, 기본 벤투리에서 발생하는 시트 캐비테이션보다 약 1.75배 더 두껍다. 유속이 더욱 증가하여 R3에 도달하면 거칠기로부터 형성된 캐비테이션은 벤투리 확산부까지 확장(Fig. 9(c))되며 Fig. 6(c)와 유사한 형태의 구름 캐비테이션이 관찰된다. R3에서 캐비테이션은 거칠기 후류에서 발달하는 종방향 캐비테이션과 벤투리 목 모서리에서 발달하는 시트 캐비테이션이 중첩되는 형태(Fig. 10(c))로 발생한다. 흥미로운 점은 기본 벤투리에서는 목 입구 모서리부터 시트 캐비테이션이 시작(Fig. 7(c))하지만 단일 거칠기 모델에서는 목 출구 모서리부터 시트 캐비테이션이 시작(Fig. 10(c))한다는 것이다. 이는 단일 거칠기 요소가 시트 캐비테이션의 시작 위치를 하류방향으로 지연시키는 역할을 한다는 것을 의미한다.

위에 설명한 단일 거칠기 모델의 캐비테이션 발달 양상을 Fig. 11에 도식화하였다. 단일 거칠기 모델의 캐비테이션은 벤투리 목에 설치된 거칠기에서 시작(Fig. 11(a))되며 유속이 증가함에 따라 종방향으로 발달하여 벤투리 목 출구까지 닿는다(Fig. 11(b)). 이후 종방향 캐비테이션은 벤투리 목 출구 모서리에서 발생하는 시트 캐비테이션과 중첩되며 벤투리 확산부에서 구름 캐비테이션으로 발달한다(Fig. 11(c)). 구름 캐비테

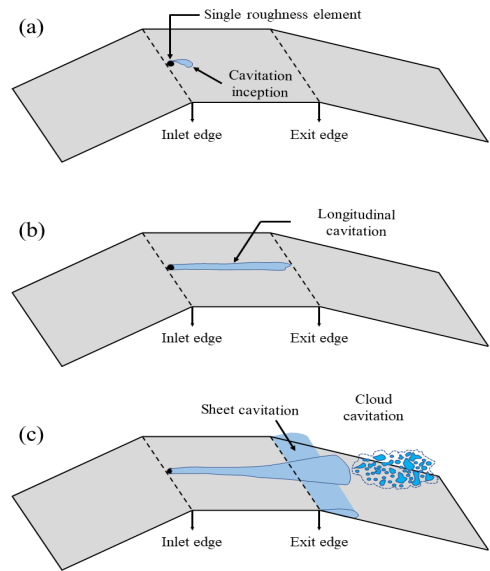


Fig. 11. Cavitation development structure of the single roughness model at (a) R1 ($\sigma = 1.366$), (b) R2 ($\sigma = 1.122$), and (c) R3 ($\sigma = 1.061$).

이션은 단일 거칠기 모델의 경우 종방향 캐비테이션 발달에서 발달하는 구름 캐비테이션과 벤투리 목의 출구 모서리에서 생성된 시트 캐비테이션 발달에서 발달하는 구름 캐비테이션이 중첩되어 상대적으로 종방향 캐비테이션 후류 쪽에 집중되어 나타나며(Fig. 10(c)), 이는 기본 벤투리 모델에서 벤투리 목의 입구 모서리를 따라 횡방향으로 균일하게 발달하는 시트 캐비테이션 발달에서 발달하는 구름 캐비테이션(Fig. 7(c))과 비교할 때 차이를 갖는다. 종방향 캐비테이션의 두께는 기본 벤투리 모델에서 발생하는 시트 캐비테이션보다 두껍지만 거칠기 요소의 후류를 제외한 영역에서는 캐비테이션이 발생하지 않기 때문에 유량계수(Fig. 5(a))와 압력손실계수(Fig. 5(b))에 미치는 영향은 미미하다. 단일 거칠기 모델의 목에서 발생하는 종방향 캐비테이션은 기본 벤투리의 목에서 발생하는 시트 캐비테이션 보다는 느리게 발달하기 때문에 캐비테이션 시작 이후 더 넓은 범위의 캐비테이션 수에서 유량계수와 압력손실계수가 거의 일정하게 유지(Fig. 5)된다. 유속이 더욱 증가하면

거칠기에서 발생하는 종방향 캐비테이션이 벤투리 목 출구 모서리에서 발생하는 시트 캐비테이션과 합쳐지며, 구름 캐비테이션으로 발달하면서 유량계수를 감소시키고 압력손실계수를 증가시킨다.

4. 결론

본 연구에서는 벤투리 관에 단일 거칠기 요소를 적용했을 때 캐비테이션의 특성이 어떻게 바뀌는지 알아보았다. 단일 거칠기 요소를 적용하면 벤투리 내부의 유속 증가에 의한 압력 강하 외에도 거칠기 자체에서 발생하는 후류로 인해 추가적인 압력 강하가 유도되어 더 높은 캐비테이션 수에서 기포가 발생함을 확인하였다. 단일 거칠기의 후류에서 시작되는 캐비테이션은 유속이 증가함에 따라 종방향으로 발달하며, 이때 거칠기의 후류를 제외한 지역에서는 기포가 발생하지 않기 때문에 벤투리 성능에 미치는 영향은 미미했다. 기본 벤투리와 단일 거칠기 모델은 시트 캐비테이션이 발생하는 위치에서 가장 큰 차이를 보였으며, 기본 벤투리는 목의 입구 모서리에서 시트 캐비테이션이 시작되는 반면 단일 거칠기 모델에서는 목의 출구 모서리에서 시트 캐비테이션이 시작되었다. 높은 유속에서 목 출구에서 생성된 시트 캐비테이션은 단일 거칠기에서 생성된 종방향 캐비테이션과 합쳐지며 구름 캐비테이션으로 발달하고, 그에 따라 유량계수를 감소시키며 압력손실계수를 증가시키는 경향을 확인하였다.

캐비테이션 현상은 다양한 유체기계의 운용 환경 및 조건에 따라 임무수행에 악영향을 주거나 오히려 도움이 될 수도 있다. 따라서 캐비테이션을 촉진 또는 지연시키기 위한 제어방법론을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구에서 살펴본 단일 거칠기 요소는 캐비테이션의 시작을 촉진시키는 한편 캐비테이션이 시작된 이후 시트 캐비테이션을 거쳐 구름 캐비테이션으로 발달하는 것을 지연시킨다는 점에서 캐비테이션 제어의 중요한 메커니즘을 제공할 수 있다. 실제 공학문제에 적용할 수 있는 가능성을 높이기 위

해 단일 거칠기 요소의 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) Ceccio, S. L., 2010, "Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 42, pp.183~203.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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).
 - 13) Arndt, R. E. and Ippen, A. T., 1968, "Rough surface effects on cavitation inception," *J. Basic Eng.*, Vol.90(2), pp.249~261.
 - 14) Stutz, B., 2003, "Influence of roughness on the two-phase flow structure of sheet cavitation," *J. Fluids Eng.*, Vol.125(4), pp652~659.
 - 15) 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.
 - 16) Bashir, T. A., Soni, A. G., Mahulkar, A. V. and Pandit, A. B., 2011, "The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol.89(6), pp.1366~1375.
 - 17) 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.
 - 18) Zhang, H., Zuo, Z., Mørch, K. A. and Liu, S., 2019, "Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics," *Phys. Fluids*, Vol.31(9), pp.097107.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) Bermejo, D., Escaler, X. and Ruiz-Mansilla, R., 2021, "Experimental investigation of a cavitating Venturi and its application to flow metering," *Flow Meas. Instrum.*, Vol.78, pp.101868.
 - 22) 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 Criculaire. General Principles and Requirements," International Organization for Standardization.