

벤츄리 노즐 출구 형상과 작동 조건에 따른 캐비테이션 기포 발생 특성 연구

오창훈* · 김준현** · 성재용[†]

Generation of emulsions due to the impact of surfactant-laden droplet on a viscous oil layer on water

Changhoon Oh^{*}, Joon Hyun Kim^{**}, Jaeyong Sung[†]

Abstract Three design parameters were considered in this study: outlet nozzle angle (30°, 60°, 80°), neck length (1 mm, 3 mm), and flow rate (0.5, 0.6, 0.7, 0.8 lpm). A neck diameter of 0.5 mm induced cavitation flow at a venturi nozzle. A secondary transparent chamber was connected after ejection to increase bubble duration and shape visibility. The bubble size was estimated using a Gaussian kernel function to identify bubbles in the acquired images. Data on bubble size were used to obtain Sauter's mean diameter and probability density function to obtain specific bubble state conditions. The degree of bubble generation according to the bubble size was compared for each design variable. The bubble diameter increased as the flow rate increased. The frequency of bubble generation was highest around 20 μ m. With the same neck length, the smaller the CV number, the larger the average bubble diameter. It is possible to increase the generation frequency of smaller bubbles by the cavitation method by changing the magnification angle and length of the neck. However, if the flow rate is too large, the average bubble diameter tends to increase, so an appropriate flow rate should be selected.

Key Words : Bubble generation(기포 생성), Cavitation(공동 현상), Venturi nozzle(벤츄리 노즐), Probability density function(확률 밀도 함수)

1. 서론

기포는 붕괴 시 강한 산화력을 갖으며 제타포

텐셜(zeta potential)을 이용한 부유물 부착을 통해 오염물의 효과적인 처리가 가능하다. 이를 위한 기포 발생은 그 크기와 발생량의 특성에 따라 반도체 세정, 하수처리 등 여러 분야에서 적극 활용되고 있다⁽¹⁾. 최근에는 나노 및 마이크로 기포를 이용한 의료 분야 적용에도 큰 관심을 갖고 있다. 특히 치근관 치료의 경우 치근관이 마이크로 단위로 매우 가늘기 때문에 마이크로 기포를 이용한 세척은 큰 이점을 갖을 수 있다는 점에서 연구가 이루어지고 있다⁽²⁾.

[†] Department of Mechanical & Automotive Engineering, SeoulTech, Professor
E-mail: jysung@seoultech.ac.kr

^{*} Department of Mechanical & Automotive Engineering, SeoulTech, Undergraduate Student

^{**} NDT Research Center, SeoulTech, Research Professor

기포를 발생시키는 방법은 액체의 압력을 떨어뜨려 기포를 형성하는 공동현상(cavitation), 액체의 온도를 올려 기포를 생성하는 보일링(boiling), 그리고 외부 기체를 강제로 주입하여 만드는 인젝션(injection) 방식 등으로 구분할 수 있다. 보일링과 인젝션 방식은 큰 기포를 대량으로 만들기에는 유리하나 일정한 크기의 마이크로 기포를 만들기에는 적절하지 않다. 그에 반해 공동현상을 이용한 기포 생성은 벤츄리 노즐 목(throat)에서의 압력을 적절히 제어하면 소형 구조에서도 비교적 일정한 크기의 마이크로 기포를 생성할 수 있다.

벤츄리 노즐을 활용한 기포 발생에 관한 연구는 벤츄리 노즐에 압축기로 공기를 외부에서 강제로 주입하는 방법, 노즐 목에 공기 흡입구를 형성하여 노즐 목의 음압을 이용한 자흡식 방법, 그리고 노즐 목에서의 음압을 증기압 이하로 떨어뜨려 발생하는 공동 현상을 이용하는 방법이 있다.

압축기를 통하여 주입하는 방식의 연구에서 Fujiwara 등⁽³⁾은 공기-액체 혼합물을 벤츄리 노즐에 넣어 지름 약 100 μm 의 미세한 기포를 쉽게 발생시켰다. 그리고 Void fraction이 증가한다고 해서 생성된 기포의 크기가 증가하는 것은 아니었다. Zhao 등⁽⁴⁾은 벤츄리 노즐을 통해 기포 하나의 움직임을 관찰하였다. 확대관에서의 급격한 유속 감소는 생성된 기포의 붕괴를 이끌었고 유량의 증가 또한 같은 효과를 보였다.

자흡식을 이용한 기포 발생 연구에서 Afisna 등⁽⁵⁾은 벤츄리 노즐 (30°입구 각도와 20°출구 각도를 가진 10mm 출구 직경)과 흡입구를 통하여 유체에 공기를 추가하여 150~500 μm 크기의 기포를 생성하였다. Juwana 등⁽⁶⁾의 연구에서는 기체가 흡입되는 유량이 증가하면 기포의 평균 크기가 증가하였고, 액체의 유량이 증가하면 기포의 평균 크기가 감소하였다. 또한 낮은 기체 유량과 함께 감소된 액체 유량은 확률 밀도함수의 피크값을 감소시켰다. Sakamatapa 등⁽⁷⁾의 결과에서는 마이크로 기포의 크기는 액체의 유량이 증가할수록 감소했고 양은 증가하였다. 목 직경 30 mm에서 얻어진 기포의 크기는 50~130 μm 였

다. Bac 등⁽⁸⁾은 목의 직경을 작게 하는 것이 공기 유입구를 크게 하는 것보다 기포량을 증가시키는데 효과적이라는 것을 밝혔고, 주어진 유량에서 벤츄리 목이 좁을수록 큰 기포가 생성되었다. Lee 등⁽⁹⁾은 기하학적 매개변수와 기포생성에 관한 연구를 수행하였다. 공기 주입구 지름과 개수, 벤츄리의 발산각을 주요 인자로 설정했다. 이 중 발산각이 가장 중요한 인자로서 발산각 증가는 기포 크기를 줄일 수 있었다. Li 등⁽¹⁰⁾의 연구에서도 출구의 각도가 난류생성의 큰 영향을 끼치며 기포의 크기를 조절하는 가장 중요한 인자임을 밝혔다.

공동현상을 이용한 기포 발생 연구로 Brandner 등⁽¹¹⁾은 오리피스를 이용하여 마이크로 기포를 생성하였다. 목 직경 0.5 mm의 오리피스를 사용하였고, 이 연구에서 가장 많은 분포를 보여준 기포 크기는 25-30 μm 이었다. Li 등⁽¹²⁾은 벤츄리 노즐의 형상에 따라 공동현상 발생 정도를 파악하였다. 목과 유로의 비율과 출구의 각도가 공동현상 발생에 가장 주요한 인자인 것을 밝혔고, 효과적인 공동현상 발생을 위해선 출구각을 낮추어 단상 유동의 저항을 줄이는 것이라고 했다. Brinkhorst 등⁽¹³⁾은 두가지 형상의 벤츄리 노즐에의 이상유동(two-phase flow)을 관찰하였다. 그 결과 Herschel 벤츄리 노즐이 Toroidal 벤츄리 노즐보다 더 안정적이고 지속적인 유량을 제공할 수 있었다.

이처럼 대부분의 연구는 압축기와 자흡구에 의한 추가적인 공기주입을 통해 기포를 생성하는 것이었다. 공기 주입구를 이용하는 기술은 누수나 오염의 염려가 있고, 오리피스를 통한 공동현상은 다양한 형상 변화가 어렵다. 벤츄리를 통한 공동현상 연구의 경우 형상에 따라 목에서 발생하는 압력강하와 공동현상 발생정도를 분석하는 연구가 주를 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 추가적인 공기 주입 방식 없이 공동현상만을 이용하여 벤츄리 노즐의 형상과 작동 조건에 따라 생성된 기포의 특성과 발생빈도를 연구하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험 설계 및 장치 구성

Fig. 1은 실험에서 사용한 벤츄리 노즐 형상이다. 축소관 구간을 지나면서 유체를 가속시켜 노즐 목이 끝나는 확대구간을 중심으로 캐비테이션을 발생시키는 목적을 위해 구성되었다. 서론의 이전 연구들로부터 밝힌 벤츄리 형태의 특성을 고려하여 이 들간의 주요 인자가 소형 벤츄리 형상 조건에서 공동현상을 이용하여 기포 형성에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 2는 기포 발생용 실험 장치의 개략도이다. 직렬구동펌프를 통하여 수조의 용액을 벤츄리 노즐을 통과시키고, 이때 발생된 기포를 포함한 혼합액은 가시화 측정 구간인 사각형 챔버 영역을 거쳐 다시 수조로 순환된다. 펌프 흡입

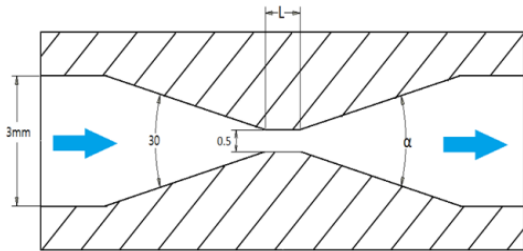


Fig. 1. Design of the cavitation venturi to generate microbubble

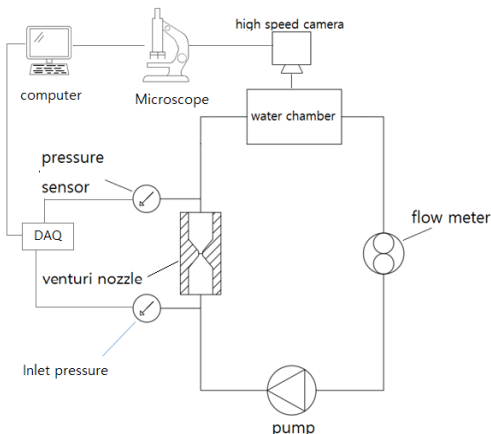


Fig. 2. Schematic of the experimental setup of the bubble generator

관에 유량계를 설치하고 펌프 내부의 토출밸브를 조절하여 유량을 조절하였다. 벤츄리 노즐 입출구에 압력계를 설치하여 노즐 전후 차압을 측정하였다.

기포를 내포한 유체가 빠르게 이동되기 때문에 고속카메라(SVSi, Southern Vision Systems Inc)로 110 frame/s로 촬영하였으며, 각 영상의 노출 시간(exposure time)은 2 μ s로 설정하여 정지된 기포 영상을 취득하였다. 장시간 생성되는 과정에서 빈도수가 낮은 크기가 작은 마이크로 버블은 붕괴되지 않고 순환 과정을 거치면서 재유입될 가능성이 있기 때문에 동일한 생성 조건과 측정 시간대를 유지하고자 했다.

현미경(Nikon Eclipse Ti) 배율은 x20을 사용하였으며, 현미경과 고속카메라를 통하여 가시적으로 유체를 바로 관찰하기 위해 두께 1 mm인 20 x 50 x 20 mm³의 투명 재질의 챔버가 사용되었다. 해당 배율에서 측정 범위는 1280 x 1025 pixel에서 관측되며 버블 크기는 10 ~ 100 μ m에서 인지 가능하다. 그러나 10 μ m 이하급에서는 x40 적용이 필요하다.

벤츄리의 출구 각도에 따른 기포 발생의 효과에 대한 변화를 보기 위해 크게 3 수준을 두고 형상 조건을 선정하였다. 따라서 출구 각도(α)는 30°, 60°, 80°로 그리고 목의 길이(L)는 1, 3 mm로 선정하였다. 입구 각도와 유로 직경 목 직경은 각각 30°, 3 mm, 0.5 mm로 고정하였다. 작동 조건은 유량으로 설정하였다. 압력은 DAQ(NI SCX-1000)를 이용하여 획득하였으며 사용된 압력계(Dwyer) 압력 범위는 0~10 MPa 이고 분해능은 0.01 MPa 이다.

Table 1. Design parameter(shape) of the venturi nozzle for bubble generation

Type	1	2	3	4	5	6
α (°)	30	60	80	30	60	80
L(mm)	1	1	1	3	3	3

Table 2. Design parameter(shape) of the venturi nozzle for bubble generation

Type	1	2	3	4	5	6
α (°)	30	60	80	30	60	80
L(mm)	1	1	1	3	3	3

2.2 획득 이미지 처리

획득한 기포 이미지로부터 Fig. 3과 같은 작업 절차를 거쳐 기포의 크기(직경)를 분석하기 위해 Matlab을 사용하였으며, 여기서 깊이 별 초점이 맞지 않아 이미지 내의 흐려진 기포 화상을 제거하기 위하여 Gaussian filter 를 사용하였다. 1차원의 가우스 함수를 이용하여 가우스함수와 가우스 1차 도함수로 이뤄진 2차원 가우스 커널을 생성하고, 이렇게 생성된 가우스 커널과 원본을 이진화시켜 얻어진 회색조 이미지를 합성곱하여 원본과 크기가 같은 사진을 도출하였다.

X, Y 방향의 기울기 이미지를 얻기 위해 커널을 전치하여 같은 과정을 반복 후 하나의 사진으로 만들어준다. 배경보다 기포가 뚜렷하게 어둡기 때문에 색 변화가 큰 부분은 급격한 기울기를 작은 부분은 완만한 기울기로 나타내며, 기울기에 따라 부분의 밝기가 변하기 때문에 임계값을 통하여 화상이 흐린 기포를 제거할 수 있다.

4방향의 경계를 감지하기 위해 원본 이미지를 색반전시켜 같은 과정을 진행하였다. 그 후 영상 팽창과 영상 침식함수를 이용하여 남은 노이즈를 제거하였고, sobel 함수를 이용하여 최종 경계를 탐지하였다.

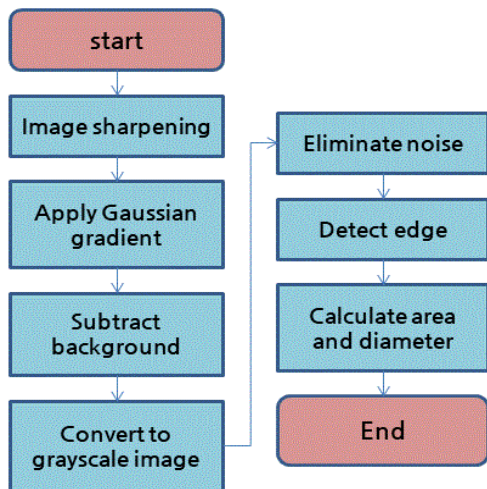


Fig. 3. Procedure diagram for processing acquired images

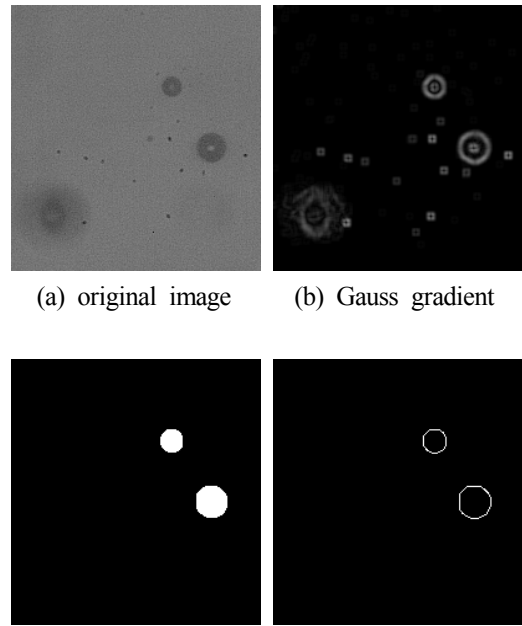


Fig. 4. Bubble detection procedure

Fig. 4는 Type 1의 벤츄리 형상조건에서 생성되는 기포를 포함하는 챔버 내의 유동 상태에 대하여 획득한 한 이미지를 앞서 말한 함수를 이용하여 기포들이 탐지되는 절차에 따라 가공했을 때 각각의 이미지들이다. 챔버 채널을 통하여 획득한 이미지인 Fig. 4(a)의 후처리에서 Fig. 4(b)는 이미지의 기포를 뚜렷하게 한 후 앞서 말한 가우스 함수를 이용해 경계를 감지하고 배경을 지웠다. 그 후 Fig. 4(c)의 흑백사진으로 변화해 노이즈를 제거한 후 Fig. 4(d)에서 최종 기포의 경계를 감지 하였다. 감지된 기포의 면적을 계산한 후 이 면적과 동치되는 원의 직경으로 계산하여 기포를 측정하였다. 이때 scale bar를 이용하여 동등한 조건에서의 이미지를 획득하여 얻은 pixel당 길이를 산출하여 reference 값으로 적용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

Fig. 5는 유량율을 500 ml/min에서 800 ml/min 까지 증가시키는 동안 벤츄리 입출구측에서 획득된 압력 차의 데이터이다. 압력 차는 유량율이

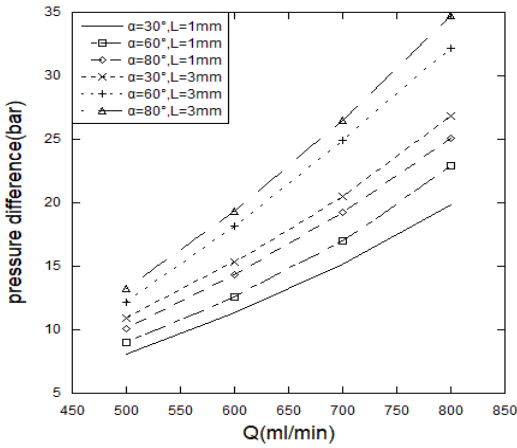


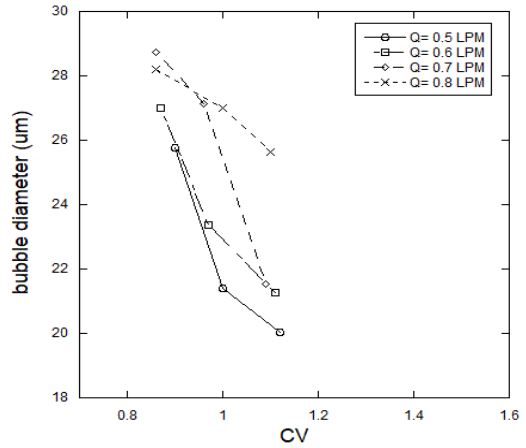
Fig. 5. The graph of the pressure difference between the entrance and discharger.

증가할수록 거의 선형적으로 증가하였다. 또한 출구 각도가 증가할수록 급격한 확장에 의해 압력이 증가하였다. 다른 조건인 출구 각도가 동일할 때는 목 길이가 길수록 압력 차가 높았다. 유체가 지나가야 할 부분이 길어져 마찰저항이 선형적으로 증가하기 때문이다. 이로 인해 벤츄리 입구의 유량을 일정하게 공급하기 위해서는 공급압력이 목 길이 증가와 함께 증가하게 된다. 출구측 압력은 모든 조건에서 동일하게 0.5 bar의 압력 분포를 보여주었다.

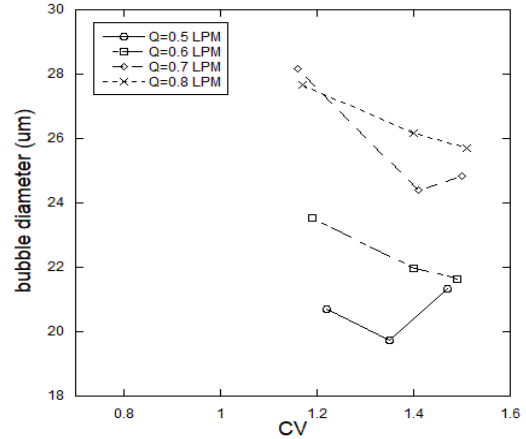
벤츄리 노즐에서 기포 시작(inception), 성장(growth), 붕괴(collapse) 동안의 공동현상이 기포 생성에 영향을 주기 때문에 캐비테이션 수(CV)로 기포와의 관계를 살펴보았다. 캐비테이션 수는 유체의 증기압 P_v 와 입구측 압력 P_{in} 그리고 목에서의 유체 속도 v_{th} 와 밀도 ρ 를 통하여 계산되며 식(1)으로 표현된다. 그리고 v_{th} 는 식(2)의 유량을(\dot{Q})과 목 직경(d_{th})에 의해 정의된다.

$$CV = \frac{P_{in} - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_{th}^2} \quad (1)$$

$$v_{th} = \frac{\dot{Q}}{\frac{1}{4} \pi d_{th}^2} \quad (2)$$



L = 1 mm



L = 3 mm

Fig. 6. Bubble diameter concerned with cavitation number

여기서 증기압은 혼합물이기 때문에 라울의 법칙(Raoult's Law)을 이용해 구하였다.

Fig. 6에 CV와 Matlab으로 구한 기포의 산술 평균직경의 관계를 도식화하였다. 여기서 동일한 유량별로 다른 출구 각도에 의해 차압의 변화가 존재하거나 동일한 출구 각도에서 다른 유량별로 운동에너지 차이에 의해 CV 수가 변화했다. 현재 주어진 운전 조건 범위 내에서 확인되는 CV 수 변화 범위에서는 CV 수가 크면(큰 주변 압력 또는 작은 유속) 캐비테이션에 의한 버블의 평균 크기가 작게 생성되는 것을 알 수

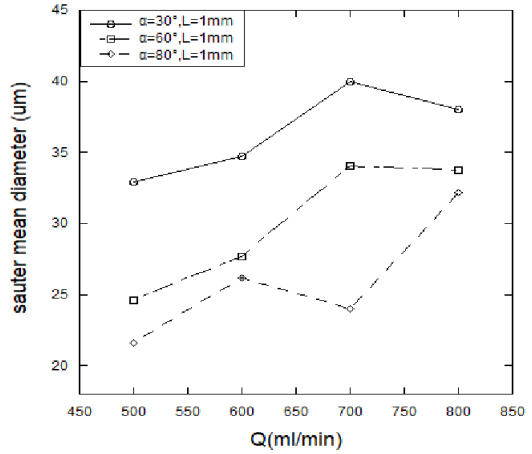
있다. 캐비테이션 기포가 나타나기 시작한 후 캐비테이션 수기 증가하면 캐비테이션 강도 및 캐비테이션 침식에 영향이 나타나게 되는데 우리의 관찰에서는 출구 각도를 키우면서 캐비테이션 수를 증가했을 때 생성되는 평균 버블의 크기는 작아지는 경향이 있었다. CV 수가 비슷할 때는 유량이 작아질수록 평균 직경이 증가하였다. CV 수는 유량에 따라서 변화가 적었고 출구 각도가 커질수록 같이 커졌으며 목의 길이가 길수록 높은값을 보였다.

특정 흐름에서 CV가 감소함에 따라 초기 캐비테이션 수에 해당 되는 특정 값에서 공동화하면서 관찰되며 CV가 더 감소하면 증기 기포의 수와 크기가 증가하게 된다. 식(1)에서 P_{in} 은 기포를 둘러싼 액체의 국부적 압력에 관여되며 폭발적인 캐비테이션 성장이 발생하기 위해 P_v 보다 작아야 한다.

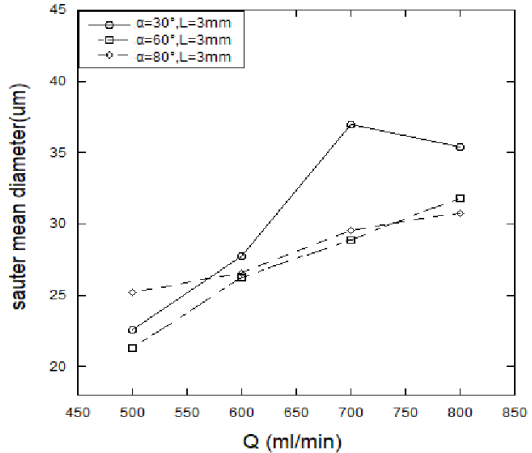
CV 수는 모든 흐름에 대해 계산할 수 있으며, 흐름이 캐비테이션을 생성하기 시작하는 CV수를 임계(초기) CV 수이다. 그러나 임계 CV수준보다 큰 수준에서 모든 기포는 불안정해지고 폭발적으로 성장하며 공동화되는 반면 임계 크기 수준에서는 수동적으로 반응하여 눈에 보이지 않는 크기로 존재하게 된다. 현재 설계 모델에서 얻어지는 기포의 크기가 평균적으로 20 ~ 40 μm 에서 이루어지고 있으며 기포의 크기와 활성화되는 CV 수에 따라 달라지며 이것은 압력이 감소함에 따라 캐비테이션 흐름에서 관찰되는 기포 수가 증가하는 것을 설명한다.

Fig. 7은 Sauter 평균 직경 (Sauter mean diameter, SMD)을 나타낸 그래프이다. 앞서 살펴본 확률 밀도함수가 정규분포를 따르지 않기 때문에 Sauter 평균 직경을 구하였다. 이 값은 직경은 체적과 표면적의 비로 실제 입자와 동일한 표면적을 가진 구체의 평균 직경을 의미한다. 계산 시 큰 기포에 적용되는 가중치가 더 높다.

$$SMD = \frac{\sum n_i * d_i^3}{\sum n_i * d_i^2} \quad (3)$$



L = 1 mm

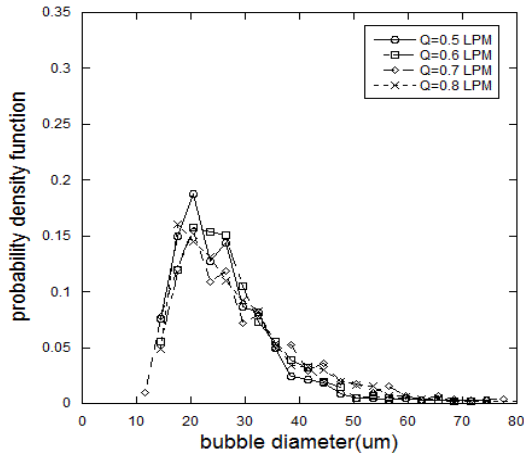


L = 3 mm

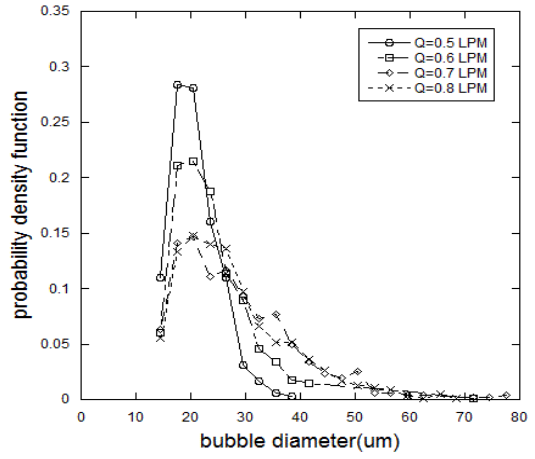
Fig. 7. The average bubble depending on the flow rate and shape.

위의 식 (3)의 d_i 는 i 번째 기포의 평균직경이고 n_i 는 i 번째 기포의 개수이다.

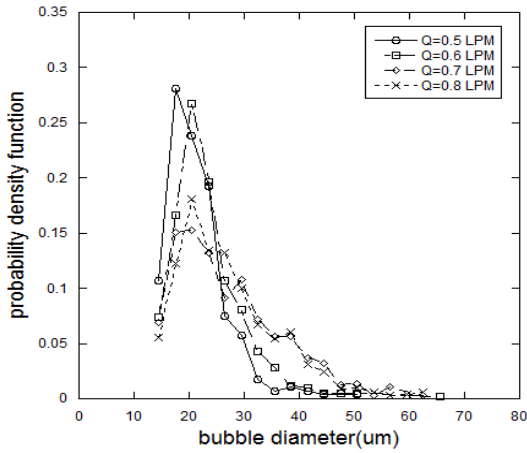
이 값은 유량 증가에 대해 대체적으로 증가하는 경향을 보였지만 출구 각도가 30°인 경우에는 1, 3 mm 모두 800 ml/min에서 감소하였다. 동일 조건에서 목의 길이가 짧을수록 각도가 작을수록 값이 증가하였다. 또한 1 mm, 80°, 700 ml/min 유량에서 갑자기 감소하였다. 그 이유는 Fig. 8의 확률밀도그래프에서 확인할 수 있는데 다른 케이스의 같은 유량에서와 달리 20 μm 전후의 기포에서의 밀도값이 높았기 때문이다.



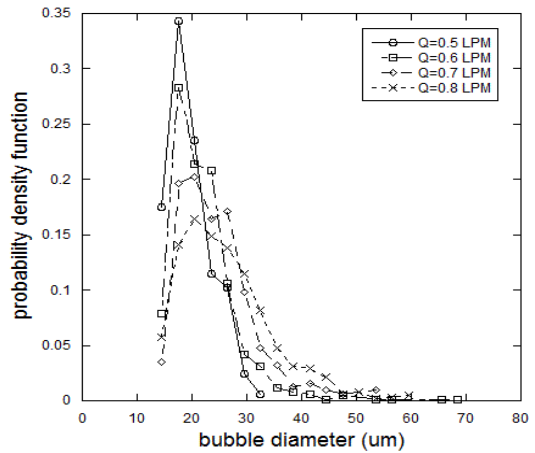
$\alpha = 30^\circ, L = 1 \text{ mm}$



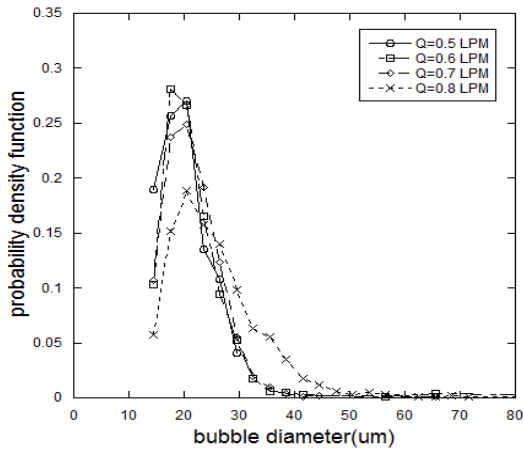
(d) $\alpha = 30^\circ, L = 3 \text{ mm}$



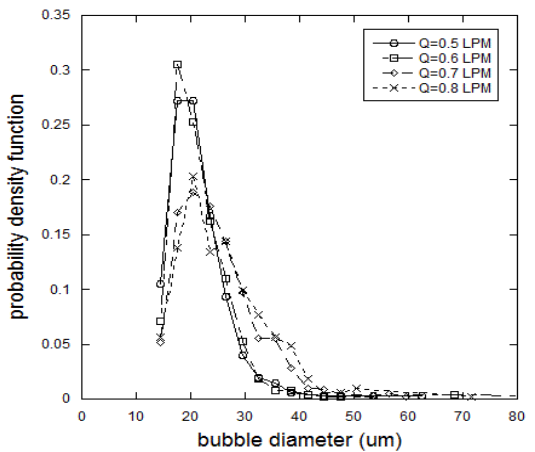
$\alpha = 60^\circ, L = 1 \text{ mm}$



(e) $60^\circ, L = 3 \text{ mm}$



(c) $\alpha = 80^\circ, L = 1 \text{ mm}$



(f) $\alpha = 80^\circ, L = 3 \text{ mm}$

Fig. 8. Probability density function for each case

Fig. 8은 형상 조건에 의해 발생한 버블 크기별 확률밀도 그래프이다. 여기서 0.5 mm 벤츄리 목 직경을 갖을 때 생성되는 기포는 형상 조건과 작동 조건에 큰 영향을 받지 않고 20 μm 기포 크기의 빈도가 가장 높은 것을 알 수 있다. 전반적으로 유량이 증가할수록 20 μm 빈도가 낮아지고 30 μm 이상의 기포의 빈도수가 점차 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 유량이 증가와 관계되는 압력이 높아짐과 더불어 CV 수가 커지면서 직경이 큰 기포들이 생성되기 때문이라고 판단된다.

또한 동일조건에서 출구 각도가 커질수록 기포크기에 대한 피크값의 빈도수가 같이 증가했다. 그리고 5 mm 오리피스 직경이 적용된 참고 문헌^[11]에서 나타난 버블 크기 25 ~ 30 μm에 비해 넓은 출구 각도와 목의 길이 적용으로 버블 크기의 산포 범위가 10 ~ 80 μm 으로 나타나지만 출구 각도가 커지고 유량율을 증가시키면 15 ~ 40 μm 범위 내로 안정적으로 수렴 접근하고 있음을 알 수 있다.

그리고 동일조건에서 목의 길이가 증가하면 역시 증가했다. 따라서 수 마이크로 크기의 기포 생성을 위해서는 각도를 증가시키고 길이를 증가하되 과도한 유량은 지양해야 할 것이다. 그러나 미세한 기포 사용 목적을 위한 실은 조건의 소형 벤츄리 노즐을 이용하는 캐비테이션 흐름을 유도하는 구조만으로는 해당 크기의 기포 생성 한계가 확인되며 이를 극복하기 위해서는 기공(pore)의 요소가 필요해 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 캐비테이션 흐름이 유도되는 0.5 mm 목 직경의 벤츄리 노즐에서 작동조건과 형상에 따라 발생하는 기포의 이미지 처리를 통하여 평균직경과 밀도함수 그리고 캐비테이션 수를 구하였다. 이를 토대로 다음의 결과를 확인하였다.

1) 입출구 압력차는 목의 길이가 길수록 확대각도가 클수록 선형적으로 증가하였다.

- 2) 0.5 mm의 목 직경에서 각도와 목의 길이에 관계없이 20 μm 전후의 모드값을 갖었다. 피크값은 출구의 각도가 증가할 수록 유량이 감소할수록 증가하였고 목의 길이가 길어지면 같이 증가하였다.
- 3) Sauter 평균직경은 유량에 따라 증가하였으며, 각도가 동일 하다면 대체적으로 목의 길이가 짧을 때 더 높은 값을 보여주었다.
- 4) 같은 목 길이에서 유량이 일정할 때 CV수는 작을수록 기포의 평균직경이 증가했다.

마이크로 기포 중에서도 작은 기포의 생성 빈도를 늘리고자 한다면, 확대각도와 목의 길이의 변경으로 가능하다. 그러나 유량은 너무 크면 오히려 기포의 평균 직경이 증가하고 펌프의 부하가 커지므로 펌프의 조건에 맞춰 적절한 유량을 선정하여야 한다.

후 기

이 연구는 2022년 한국연구재단 개인기초연구사업(기본연구) 과제번호 2022R1F1A1071016의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- 1) Dular, M., Griessler-Bulc, T., Gutierrez-Aguirre, I., Heath, E., Kosjek, T., Klemenčič, A. K., Oder, M., Petkovšek, M., Rački, N., Ravnikar, M., Šarc, A., Širok, B., Zupanc, M., Žitnik, M. and Kompare, B., 2016, "Use of Hydrodynamic Cavitation in (waste)Water Treatment," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 29, pp.577~588.
- 2) Sung, G., Sung, J. and Lee, M. H., 2016, "Development and Performance Test of a Micro Bubble Irrigation System for Root Canal Cleaning of Tooth," *Journal of The Korean Society of Visualization*, Vol. 14(1), pp.40~45.
- 3) Fujiwara, A., Takagi, S., Watanabe, K. and Matsumoto, Y., 2003, "Experimental Study on the New Micro-Bubble Generator and Its

- Application to Water Purification System,” ASME FEDSM’03 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference USA, FEDSM 2003-45162, pp.469~473.
- 4) Zhao, L., Mo, Z., Sun, L., Xie, G., Liu, H., Du, M. and Tang, J., 2017, “A Visualized Study of the Motion of Individual Bubbles in a Venturi-Type Bubble Generator,” *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 97, pp.74~89.
 - 5) Afisna, L. P., Juwanac, W. E., Indarto, Deendarlianto and Nugroho, F. M., 2017, “Performance of Porous-Venturi Microbubble Generator for Aeration Process,” *Journal of Energy Mechanical Material and Manufacturing Engineering*, Vol. 2(2), pp.73~80.
 - 6) Juwana, W. E., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Budhijanto, W., Indarto and Deendarlianto, 2019, “Hydrodynamic Characteristics of the Microbubble Dissolution in Liquid Using Orifice Type Microbubble Generator,” *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 141, pp.436~448.
 - 7) Sakamatapan, K., Mesgarpour, M., Mahian, O., Ahn, H. S. and Wongwises, S., 2021, “Experimental Investigation of the Microbubble Generation Using a Venturi-Type Bubble Generator,” *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 27, 101238.
 - 8) Bae, H., Lee, S., Song, M., Sung, J., 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.8~15.
 - 9) Lee, C. H., Choi, H., Jerng, D-W., Kim, D. E., Wongwises, S. and Ahn, H. S., 2019, “Experimental Investigation of Microbubble Generation in the Venture Nozzle,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 136, pp.1127~1138.
 - 10) Li, J., Song, Y., Yin, J. and Wang, D., 2017, “Investigation on the Effect of Geometrical Parameters on the Performance of a Venturi Type Bubble Generator,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 325, pp.90~96.
 - 11) Brandner, P. A., Wright, G., Pearce, B., Goldsworthy, L. and Walker G. J., 2010, “An Experimental Investigation of Micro Bubble Generation in a Confined Turbulent Jet,” 17th Australasian Fluid Mechanics Conference Auckland.
 - 12) 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,” *Minerals Engineering*, Vol. 132, pp.268~274.
 - 13) Brinkhorst, S., von Lavante, E. and Wendt, G., 2015, “Numerical Investigation of Cavitating Herschel Venturi-Tubes Applied to Liquid Flow Metering,” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 43, pp.23~33.