

공기유입구를 가진 벤츄리 형상의 기포발생기에서 토출되는 기포 유동 특성의 가시화 측정 분석

배현우* · 이승민* · 송문수** · 성재용[†]

Flow visualizations and analysis on characteristics of bubbly flows exhausted from a venturi-type bubble generator with an air vent

Hyunwoo Bae^{*}, Seungmin Lee^{*}, Moonsoo Song^{**} and Jaeyong Sung[†]

Abstract Flow visualizations have been carried out to analyze the characteristics of bubbly flows exhausted from a venturi-type bubble generator with an air vent. For various design parameters and operating conditions of the bubble generator, the images of bubbly flows was recorded using a high-speed camera and a microscope. Then the amount and size distribution of bubble was evaluated by an image processing technique. The results show that for increasing the amount of bubble, it is more effective to reduce the venturi throat than to enlarge the air vent diameter. If the water flow rate increases, the bubble generation rate increases but reaches a status of saturation, whose condition depends on Reynolds number at a given air vent diameter. The bubble size increases as the diameter of venturi throat decreases and Reynolds number increases. However, the air vent diameter is not a significant factor on bubble size.

Key Words : Bubble generator (기포발생기), Venturi tube (벤츄리관), Bubble size distribution (기포 크기 분포), Area fraction (면적비), Sauter mean diameter (자우터 평균직경)

1. 서론

서로 다른 상(phase)인 액체와 기체를 혼합하

[†] Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail: jysung@seoultech.ac.kr

^{*} Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology

^{**} Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology (Undergraduate Student)

여 함께 수송하는 유체기계는 화학, 기계, 환경 등 많은 산업분야에서 다양한 용도로 널리 사용되고 있다. 유동중인 액체에 유입된 기체는 각 유체의 물성치와 내부유동장의 유동특성에 따라 슬러그(slug)나 기포화 된 형태인 기포수(bubble column) 등으로 분사된다. 기포수의 경우 연료나 액적의 분사 등 다양하게 사용되는데 특히, 마이크로 크기의 기포들로 분사되는 경우 마이크로 기포가 터질 때 발생하는 고압, 고온의 충격파를 이용하여 세정 및 살균 용도로 널리 사용된다⁽¹⁾. 따라서 적용분야에 적합한 기포수를 구현하기 위해서는 작동조건과 기포발생기의 형상에 따른

기포 크기 분포(bubble size distribution)를 이해하는 것이 중요하다.

액체와 기체의 혼합으로 기포수를 생성하는 장치로서 다양한 종류의 기포발생기가 연구되고 있다. Sadatomi 등⁽²⁾은 오리피스관에 구 모양의 물체를 유동로에 설계하여 공기가 유입되어 기포가 생성될 때 난류유동에 의하여 더욱 작게 깨질 수 있도록(break up)하는 장치를 제시하였다. Sadatomi 등⁽³⁾은 이후에 수행된 후속연구에서 공기가 유입되는 경로에 다공성 물질(porous)을 적용하여 미립화(atomization)된 공기가 액체에 유입될 수 있는 형태의 장치를 개발하였다. 또한 Gabbard⁽⁴⁾는 제논 기체를 유입하여 용융염(molten salt)를 제거할 수 있는 벤츄리 형상의 기포발생기를 연구하였다.

앞선 연구들은 공기유입구나 노즐 입구의 크기가 수 cm 정도로 큰 편이어서 mm 크기의 기포가 생성된다. 본 연구는 mm 크기의 기포수를 생성하여 구강 세정에 적용을 목적으로 한다. 본 연구의 이전연구⁽⁵⁾에서는 다공성 물질을 노즐 내부에 삽입하여 캐비테이션(cavitation)에 의한 기포수를 생성하였으나 기포의 양이 많지 않아 실용성이 떨어졌다. 따라서 본 연구에서는 벤츄리 형상에 공기유입구를 설치하여 액체 내에 기체가 혼입되는 방식을 채택하였다. 또한, 구강 세정에 적용하기 위해서는 전체적인 노즐의 크기가 mm 크기로 작은 소형 기포발생기의 설계가 필요하다.

본 연구의 목적은 공기유입구가 형성된 벤츄리 구조의 소형 기포발생기에 대하여 설계 인자와 작동 조건이 기포의 크기 및 기포량에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 다양한 형태의 기포발생기를 제작하고, 노즐에서 토출되는 기포수를 초고속 카메라와 현미경을 이용하여 가시화한다. 가시화 영상을 기반으로 기포 크기 및 기포량을 측정 분석하여 기포가 생성되는 특성을 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 기포발생기 및 실험 조건

Fig. 1은 실험에 사용된 벤츄리 형상의 기포발생기 노즐의 형상이다. 노즐 입구(inlet)로 주입된 물이 좁아지는(converging) 유로를 따라 벤츄리 목(throat)을 지나면서 물의 압력이 음압으로 떨어진다. 벤츄리 목에 형성된 공기유입구는 대기와 연결되어 있으며, 목에서의 음압에 의해 공기가 유입되어 물과 섞이면서 기포를 발생시킨다. 좁은 목에서 생성된 기포는 압력이 높아지는 확대관(diverging)을 지남에 따라 가압 되면서 더욱 작은 미세기포가 되어 대기 중으로 토출된다. 이러한 방식의 기포발생기는 입구 직경과 벤츄리 목의 직경의 비율, 공기유입구의 크기와 개수 등의 다양한 설계요소에 따라 토출 특성이 결정된다⁽⁶⁻⁷⁾. 본 연구에서는 여러 설계요소 중 공기유입구의 직경(d_{air})과 벤츄리 목의 직경(d_{th})을 설계 변수로 설정하여 각각 2가지 씩 총 4가지 type의 기포발생기를 제작하였다. 또한 기포발생기로 유입되는 물의 유량(Q_{water})은 400, 500, 600 ml/min로 총 3가지를 적용하였다. 그 외의 설계요소인 노즐 입구 직경은 $D = 2.5$ mm, 벤츄리 축소관의 각도는 21° , 벤츄리 목의 길이는 목의 직경과 같다 ($L = d_{th}$). 가압구간인 확대관은 90° 의 급속 확대 형태로 제작하였으며, 확대관에서 토출구까지의 길이는 40 mm이다. 토출구의 직경은 입구 관 직경과 동일하다. Table 1은 기포발생기의 type별 설계변수와 작동 조건을 나타내고 있다.

본 연구의 실험조건에서 중요한 무차원 수는 레이놀즈수 Re (Reynolds number)와 웨버수 We (Weber number)이며, 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho_l U_{th} d_{th}}{\eta} \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho_a U_{th}^2 d_{air}}{\sigma} \quad (2)$$

여기서 ρ_l , ρ_a 는 각각 액체 및 기체의 밀도, U_{th} 는 벤츄리 목에서의 액체의 유속, d_{th} 는 벤

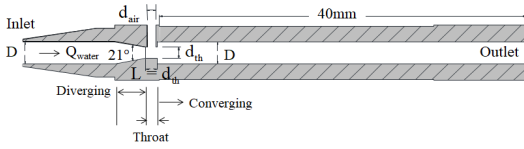


Fig. 1. Geometry of a bubble generator

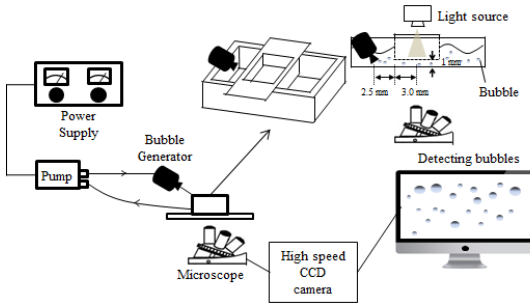


Fig. 2. Experimental setup for visualizing micro bubbly flows

츄리 목의 직경, d_{air} 는 공기유입구의 직경, η 는 점성 계수, σ 는 표면장력계수이다. 본 실험에서는 Re 수의 범위가 $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^4$ 이며, We 수의 범위는 $10^4 \leq We \leq 1$ 이다.

Table 1. Design parameters and operation conditions

Type	d_h	d_{air}
Type 1	1.25 mm	1.0 mm
Type 2	1.25 mm	0.5 mm
Type 3	1.75 mm	1.0 mm
Type 4	1.75 mm	0.5 mm

Q_{water}		
400 ml/min	500 ml/min	600 ml/min

Fig. 2는 기포발생기를 구동하여 기포수를 생성하고 이를 가시화하기 위한 실험장치의 개략도이다. 기포수는 물로 채워진 챔버 내부로 분사되는데, 챔버 내부에 높이 1 mm의 채널을 형성하고 채널 내부로 기포 유동이 흐르도록 하였다. 얇은 채널 내부를 지나는 기포수를 할로겐 광원과 10배율 렌즈의 현미경(Nikon, Eclipse Ti-U), 그리고 고속카메라(Phantom, Miro M110)를 이용하여 200 frame/s로 촬영하였다. 관측 영역은 1280 x 800 pixels의 해상도를 가지며, FOV(field of view) 면적은 3.89 mm²이다. 생성된 기포는 실험 조건

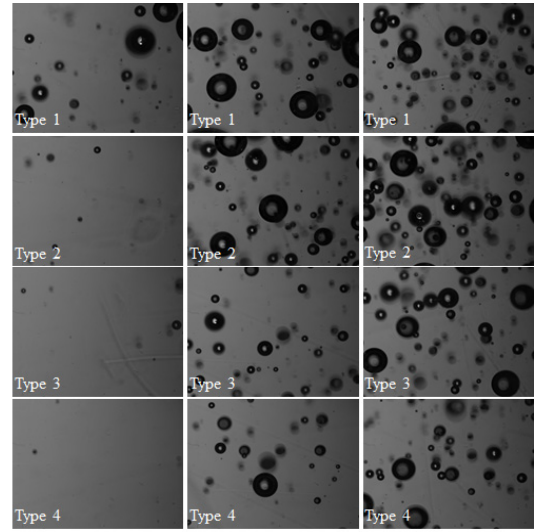


Fig. 3. Images of bubbly flows according to the type of the bubble generator and water flow rate; Q_{water} = (a) 400 ml/min, (b) 500 ml/min, (c) 600 ml/min

에 따라 1 ~ 2 m/s로 관측 영역을 아주 빠르게 통과하므로 이를 순간적으로 잔상없이 선명하게 촬영하기 위하여 카메라의 노출 시간(exposure time)은 2 ms로 매우 짧게 설정하였다. 본 실험 장치를 통해 관측할 수 있는 가장 작은 크기의 기포의 크기는 약 2 mm이며 가시화된 이미지의 기포는 scale factor를 사용하여 실제 크기로 환산하였다.

2.2 기포량 및 기포 크기 측정

기포수 내에 존재하는 기포의 양은 측정된 영상에서 관측영역 대비 기포가 차지하는 면적의 비를 통해 구하였다. 엄밀하게는 물과 기포의 체적비인 volume fraction을 계산하여야 하나 현미경을 이용한 3차원 측정이 어려우므로 본 연구에서는 다음과 같이 정의된 면적비(area fraction)로 기포량을 평가하였다.

$$\text{Area fraction} = \frac{\sum \pi d_i^2}{A} \quad (3)$$

여기서 A 는 관측 영역의 면적이다. 기포의 양이 많을 경우 영상에서 겹쳐지는 기포가 존재하기 때문에 area fraction이 volume fraction과 다를 수 있다. 본 연구에서는 이를 최소화하기 위해 관측부의 채널 높이를 1 mm로 얇게 설계하여 영상의 수직방향 변화를 줄였다.

기포의 크기는 가시화 영상에서 기포의 경계를 영상처리 기법으로 찾아내고, 영상에서의 픽셀 크기로부터 scale factor를 곱하여 물리적인 크기를 산출하였다. 자세한 영상처리 방법은 본 연구의 이전 연구⁽⁸⁾를 참고하기 바란다. 생성된 기포수의 기포 크기 분포를 나타내기 위하여 여러 가지 값들이 사용되고 있다. 그 중 기포수를 해석하는데 가장 많이 사용되는 값인 산술평균 직경 D10(arithmetic mean diameter)과 자우터 평균 직경 D32(Sauter mean diameter), 그리고 체적 중간직경 $D_{v,0.5}$ (volume median diameter)이다. 산술 평균과 자우터 평균은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Arithmetic mean diameter } D10 = \frac{\sum_i^n n_i d_i}{\sum_i^n n_i} \quad (4)$$

$$\text{Sauter mean diameter } D32 = \frac{\sum_i^n n_i d_i^3}{\sum_i^n n_i d_i^2} \quad (5)$$

여기서 d_i 는 i 번째 기포의 직경을 의미하고, n_i 는 d_i 크기를 가지는 기포의 개수이다. 체적중간직경은 기포 크기 분포에 대한 확률밀도함수(probability density function)에서 총 분포함수의 면적 100 %를 기준으로 적분된 함수값이 50 %가 되는 지점을 기포의 크기로 정한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 기포발생기의 각 type별로 서로 다른 물의 유량에서 토출되는 기포수를 가시화한 영상이다. Fig. 3(a)-(c)는 각각 400, 500, 600 ml/min

인 경우를 나타내는데, 대체적으로 물의 유량이 증가함에 따라 기포의 양이 증가한다. 또한 공기 주입구의 직경이 같은 경우를 비교하였을 때 벤츄리 목의 직경이 작은 type 1과 type 2에서 기포가 더욱 많이 생성된다. 이러한 결과는 벤츄리 목에서 형성되는 음압의 차이에 의한 것으로, 물의 유량이 많고 목의 직경이 작을수록 목에서의 유속이 빨라 음압이 크게 형성되기 때문이다. 음압이 크면 대기중의 공기가 공기유입구를 통해서 더 많이 유입되고 그에 따라 기포의 양이 증가한다. 하지만 기포발생기에서 분사되는 기포의

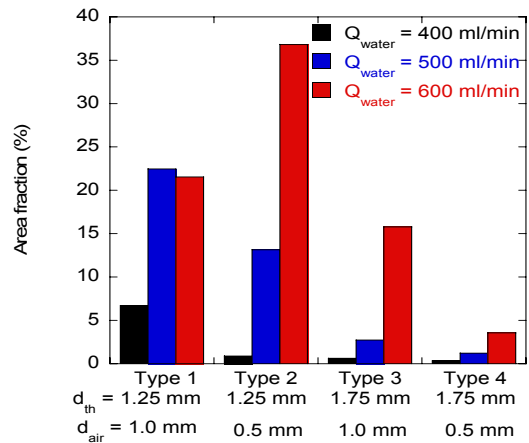


Fig. 4. Area fraction of bubble with respect to liquid phase

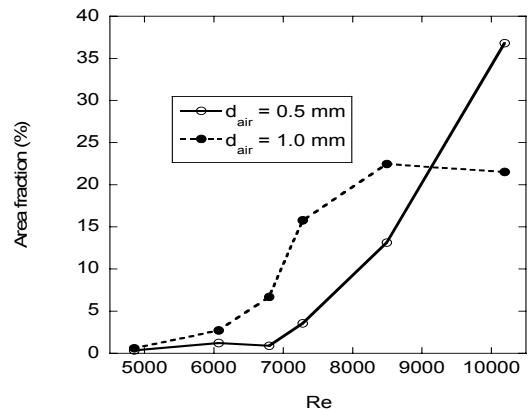


Fig. 5. Variations of bubble area fraction according to Reynolds number at the venturi throat

직경은 목에서의 음압의 크기와는 무관하다. 정확한 분석을 위하여 촬영된 영상으로부터 기포 크기를 구하고, 벤츨리 형상과 유량조건에 따른 기포 크기 분포를 분석하는 것이 필요하다.

Fig. 4는 각 type에 대해 기포량을 나타낸 것으로 2차원 영상을 기반으로 계측하였기 때문에 기포량을 volume fraction 대신 area fraction으로 표시하였다. 이 그림에서 유량이 500 ml/min 이하 일 때는 목 직경이 작고 공기유입구 직경이 큰 type 1에서 기포량이 가장 많았다. 이는 목 직경이 작을수록 음압의 크기가 커지고, 공기유입구의 직경이 클수록 유입되는 공기유동의 저항이 줄어들기 때문이다. type 2와 type 3을 type 1과 비교하면, type 1에서 공기유입구를 줄인 type 2의 기포량이 목 직경을 늘인 type 3보다 많게 나왔다. 이는 목 직경을 작게 하는 것이 공기유입구를 크게 하는 것보다 기포량을 증가시키는 데 효과적임을 의미한다. 한편, 물의 유량이 600 ml/min로 늘어나면 type 1의 기포량보다 type 2의 기포량이 오히려 더 크게 나타났다. 그 이유는 type 1에서 물의 유량이 증가하면 기포량이 늘어나지만 일정값 이상이 되면 물의 유량이 증가해도 기포량이 더 늘어나지 않는 포화(saturation) 현상이 발생하기 때문이다. 이러한 포화 조건은 벤츨리 목에서의 Re 수와 공기유입구의 크기에 의해 결정된다. 이를 확인하기 위해서 Fig. 5에서는 벤츨리 목에서의 Re 수에 따른 기포량의 변화를 공기유입구 직경이 0.5 mm와 1 mm인 경우에 대해 각각 비교하였다. 이 그림에서 Re 수가 증가하면 기포량이 증가하는 것을 볼 수 있지만, 공기유입구의 직경이 1.0 mm 일 때는 Re 수가 9,000이상이면 포화상태가 되어 더 이상 기포량이 증가하지 않는 현상을 확인할 수 있다. 반면, 공기유입구 직경이 0.5 mm인 경우는 본 실험의 최대 Re 수인 10,000까지는 포화가 일어나지 않았으며, 포화상태에 도달하는 Re 수 조건은 공기유입구 직경에 의존함을 알 수 있다.

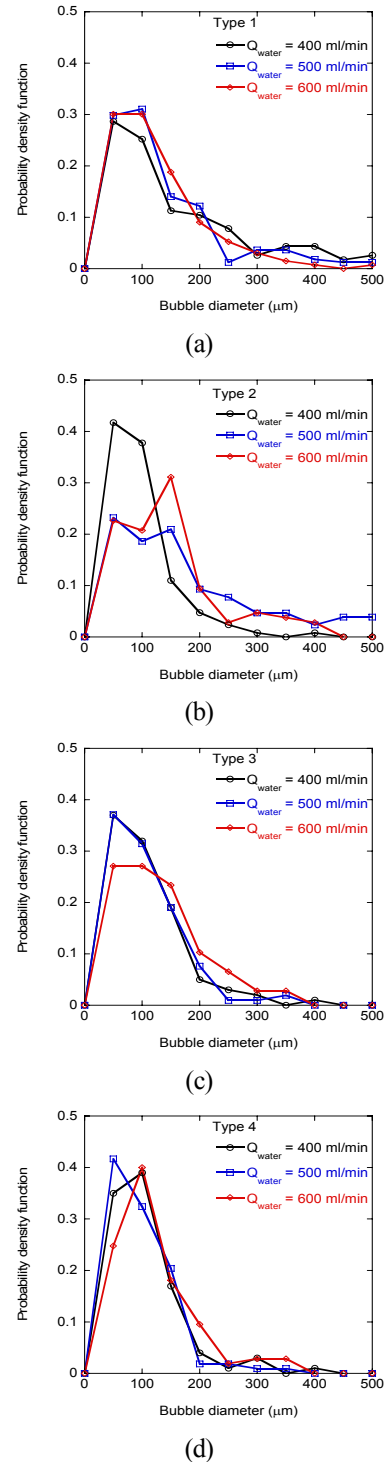


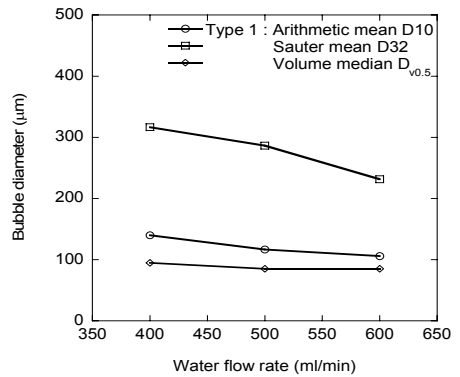
Fig. 6. Bubble size distributions for each type of bubble generator; (a) type 1, (b) type 2, (c) type 3, (d) type 4

Fig. 6에서는 각 type 별로 유량에 따른 기포 크기의 분포를 확률밀도함수(probability density function)로 나타내었다. 본 실험에서 사용된 4가지 type에 대해 100 mm 전후의 기포가 가장 많이 생성되고, 200 mm 이상 크기의 기포는 그 수가 급격히 감소하는 모습을 보인다. 기포 크기에 대한 확률밀도함수는 대부분 경우 특정 기포 크기에서 단일 피크를 가지지만, type 2의 경우는 단일 피크가 아닌 이중 피크를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 생성된 기포들이 유동 중에 주위 기포들과 합쳐지는 융합(coalescence)현상에 의한 것으로 기포 발생 후 이동하면서 기포의 거동 특성이 변하기 때문이다⁹⁾. 한편, 200 mm 이상 크기의 기포는 대부분의 경우 전체 기포 수의 10 % 정도 차지하지만 type 2 경우 물의 유량이 500 ml/min가 되면 이 비율이 25 % 까지 올라간다. 200 mm 이상의 큰 기포는 벤츄리관의 목이 좁은 type 1과 type 2에서 더 많이 생성되었으며, 이러한 결과는 목이 좁을수록 더욱 많은 공기가 공기유입구로 유입되기 때문이다. 즉, 물의 유량은 정해져 있는데 목이 좁을수록 공기 유량이 늘어나면서 큰 기포가 생성되는 것으로 판단된다.

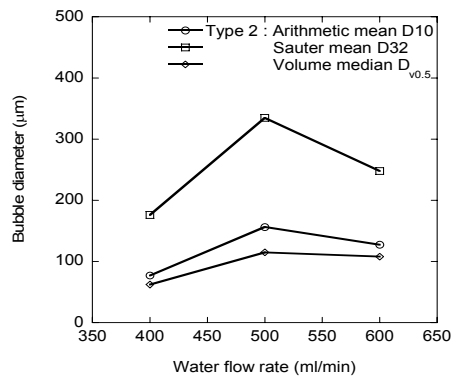
공기 흡입구를 가진 기포발생기는 복잡한 메카니즘에 의해 기포의 크기나 양이 결정되므로 확률밀도함수 하나만으로 기포 크기에 대한 특성을 논의하기 어렵다. 따라서 각 경우에 대해 기포 크기에 대한 다양한 평가방법을 적용하여 Fig. 7에서 비교하였다. 2장에서 설명하였던 기포 크기 평가방법으로 D10, D32, $D_{v0.5}$ 지수를 계산하였으며, 각 type에 대해 유량에 따른 이들 지수의 변화를 살펴보았다. Figure 5에서 이 세 가지 지수의 값은 $D_{v0.5}$, D10, D32 순으로 크게 나타나는데, 그 이유는 수식 (4)와 (5)에서 알 수 있듯이 기포의 크기를 계산함에 있어 큰 기포에 적용되는 가중치가 $D_{v0.5}$, D10, D32 순으로 커지기 때문이다. 따라서 대부분의 기포가 작음에도 불구하고, 상대적으로 크기가 큰 기포가 포함되어 있을 경우 D32 값이 높게 나타나게 된다.

Fig. 7(a)의 type 1의 경우 물의 유량이 증가하면서 D10과 $D_{v0.5}$ 값은 미세하게 감소하는데 반

해 D32 값은 크게 줄어든다. 한편, Fig. 7(b)의 type 2는 물의 유량이 증가하면서 D10과 $D_{v0.5}$ 값은 약간 증가하고 D32 값은 크게 증가하였다가 다시 감소하는 특성을 보인다. type 1과 type 2는 벤츄리 목 직경은 1.25 mm로 동일하고 공기유입구 직경의 차이만 있음에도 불구하고 기포 크기 분포에 있어서는 매우 상이한 결과를 보인다. 이 두 가지 type에 대해서 유량에 따른 기포 크기가 정반대의 경향이 나타나는 가장 큰 이유는 300 mm 이상의 큰 기포의 분포가 정반대이기 때문이다. Fig. 6(a)와 (b)에서 보면 type 1은 유량이 증가하면서 300 mm 이상의 큰 기포의 비율이 줄어든다. 반면 type 2는 유량이 500 ml/min일 때 큰 기포의 비율이 가장 많고, 400 ml/min일 때 그 비율이 가장 작다. 전체 확률밀도함수에서 큰 기포가 차지하는 비율의 절대값은 작지만 기포 크기를 평가하는 지수에는 매우 중요한 영향을 미침을 알 수 있다.



(a)



(b)

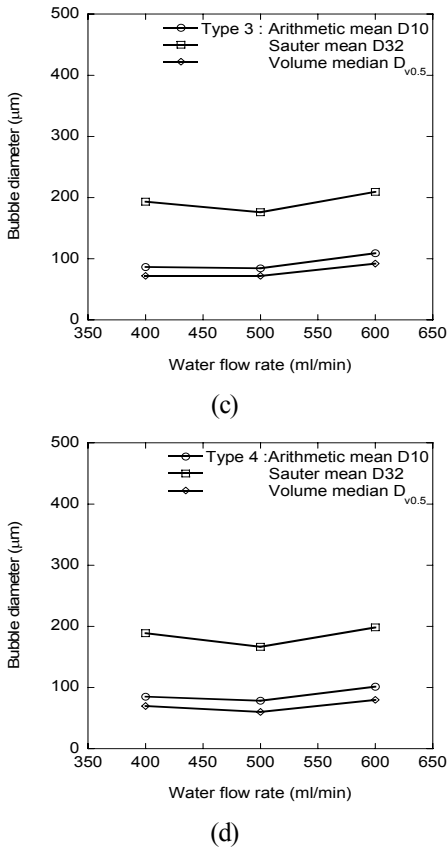


Fig. 7. Bubble diameter according to the evaluation methods for each type of bubble generator; (a) type 1, (b) type 2, (c) type 3, (d) type 4

Fig. 7(c)와 (d)는 목 직경이 좀 더 큰 1.75 mm로 동일하고 공기유입구의 직경이 다른 경우이다. 이 그림에서는 3가지 기포 크기 평가방법의 결과에 큰 차이가 없다. 또한, 유량의 변화에 대해서도 기포 크기의 변화가 거의 나타나지 않았다. 앞에서 목 직경이 1.25 mm인 경우는 유량 및 공기유입구 직경에 따라 기포 크기에 많은 변화가 있었지만, 목 직경이 1.75 mm로 증가하면 유량 및 공기유입구 직경이 기포 크기에 영향을 미치지 않는다는 점은 매우 흥미로운 결과이다. 이러한 결과가 나타난 이유는 목 직경과 벤츄리 확대관의 직경비가 기포 크기 분포에 영향을 주는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 벤츄리 확대관의 직경이 2.5 mm로 고정되어 있고, 목 직경이 1.25 mm인 경우 급속 확대관에서 직

경이 2배가 되어 유동박리에 의한 와류가 크게 형성된다. 반면, 목 직경이 1.75 mm인 경우 급속 확대관에서 직경이 1.4배 밖에 되지 않아 와류의 크기가 상대적으로 작다. 유동 박리에 의한 와류유동은 목에서 발생한 기포가 서로 뭉치거나 깨지는데 큰 역할을 한다. 따라서 와류가 크게 형성되는 목 직경 1.25 mm에서는 유량조건에 따른 기포 크기의 변화가 심하고, 목 직경 1.75 mm에서는 그 변화가 미약하게 나타났다. 요약하면, 벤츄리 형상의 노즐에 공기유입구를 설치하여 물과 공기가 혼합되어 기포를 생성하는 과정은 여러 가지 파라미터에 의해 달라지게 되는데, 노즐 목에서의 압력, 유속, 공기유입관의 저항, 벤츄리 확대관의 형상 및 노즐 토출구까지의 거리 등 복합적인 요소가 작용한다. 주요 무차원수로는 노즐 목에서의 We 수와 Re 수가 있으나 벤츄리 확대관에서의 와류도 기포 크기에 큰 영향을 미치므로 단순한 해석으로는 이를 규명하기 어렵다. 따라서 후속 연구를 통해 벤츄리 목 부분에서 기포가 발생하는 과정과 벤츄리 확대관에서의 기포와 와류의 상호작용을 가시화함으로써 여러 가지 파라미터가 기포 크기에 어떠한 영향을 미치는지 규명하는 것이 필요하다.

Fig. 8에서는 기포 크기에 대한 3가지 평가 방법을 벤츄리 목에서의 Re 수에 대해 나타내었다. 또한, 공기유입구의 직경이 0.5 mm와 1 mm인 경우로 나누어 기포 크기 변화를 살펴보았다. 이 그림에서 Re 수가 증가하면 기포 크기가 대체로 증가하는 모습을 볼 수 있다. 공기유입구의 직경 변화에 대해서는 동일 Re 수에서 공기유입구의 직경이 큰 점선의 경우가 직경이 작은 실선의 경우보다 기포 크기가 대체로 크게 나타났다. 그러나 이러한 경향은 항상 성립되는 것은 아니며, 기포 크기의 평가방법에 따라 달라지기도 한다. 즉, 앞에서 설명한 바와 같이 기포 크기에는 Re 수나 공기유입구 직경뿐만 아니라 We 수, 벤츄리 확대관에서의 와류 및 토출구까지의 거리 등 기포 발생 이후의 유동과정이 복합적으로 작용한 결과이다.

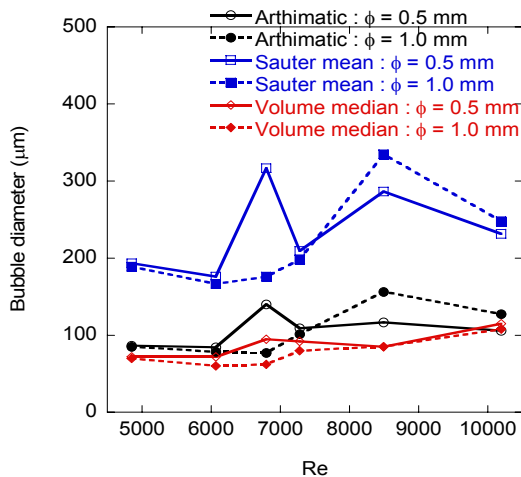


Fig. 8. Variations of bubble diameter according to Reynolds number at venturi throat

4. 결론

본 연구에서는 공기유입구가 있는 벤츄리 형상의 기포발생기에서 설계 인자 및 물의 유량에 따른 기포량과 기포 크기를 초고속 카메라와 현미경을 이용하여 측정하고 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

벤츄리 목의 직경을 작게 하는 것이 공기유입구를 크게 하는 것보다 기포량을 증가시키는데 효과적이다. 물의 유량이 증가하면 기포량이 늘어나지만 유량이 일정값 이상이 되면 물의 유량이 증가해도 기포량이 더 늘어나지 않는 포화 현상이 발생한다. 포화상태에 도달하는 레이놀즈 수 조건은 공기유입구 직경에 의존한다.

기포량에 비해 기포의 크기에 영향을 주는 요소는 매우 복잡한 메커니즘에 의해 결정되는데, 본 연구의 조건에서는 주어진 물의 유량에서 벤츄리 목이 좁을수록 큰 기포가 생성된다. 또한, 벤츄리 목에서의 레이놀즈수가 증가하면 기포 크기가 대체로 증가하였다. 그러나 벤츄리 목 직경이 작은 경우는 유량 및 공기유입구 직경에 따라 기포 크기에 많은 변화가 있었지만, 목 직경이 큰 경우는 유량 및 공기유입구 직경이 기포 크기에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2018년도 산학연협력 기술개발사업(C0505275)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCE

- 1) Agarwal, A., Ng, W. J., Liu, Yu., 2011, "Principle and Applications of Microbubble and Nanobubble Technology for Water Treatment," Chemoshpere, Vol. 84, pp. 1175~1180.
- 2) Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H., Shikatani S., 2012, "Micro-Bubble Generation Rate and Bubble Dissolution Rate Into Water by a Simple Multi-Fluid Mixer with Orifice and Porous Tube," Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 41, pp. 23~30.
- 3) Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K., Ohtomo, A., 2005, "Performance of a New Micro-Bubble Generator with a Spherical Body in a Flowing Water Tube," Exp. Thermal Fluid Sci. Vol. 29, pp. 615~623.
- 4) Gabbard, C., 1972, "Development of a Venturi Type Bubble Generator for Use in the Molten-Salt Reactor Xenon Removal System," ORNL-TM-4122, pp. 1~30.
- 5) Sung, G., Sung, J., Lee, M. H., 2016, "Development and Performance Test of a Micro Bubble Irrigation System for Root Canal Cleaning of Tooth," J. Korean Society of Visualization, Vol. 14, No. 1, pp. 40~45.
- 6) Baylar, A., Aydin, M. C., Unsal, F., and Ozkan, F., 2009, "Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using FLUENT V6. 2," Math. Comput. Appl., Vol. 14, pp. 97~108.
- 7) Guerra, V. G., Béttega, R., Gonçalves, J. A. S., Coury, J. R., 2012, "Pressure Drop and Liquid Distribution in a Venturi Scrubber: Experimental Data and CFD Simulation," Industrial & Eng.

Chem. Res. Vol. 51, pp. 8049~8060.

- 8) Sung, J., Park, S. M. and Yoo, J. Y., 2004, "Time-Resolved Two-Phase PIV Measurements of Freely Rising Bubble Flows with an Image Separation Method," J. Korean Society of Visualization, Vol. 2, No. 1, pp. 39~45.
- 9) Lau, Y. M., Sujatha, K. T., Gaeini, M., Deen, N. G., Kuipers, J. A. M., 2013, "Experimental Study of the Bubble Size Distribution in a Pseudo-2D Bubble Column," Chem. Eng. Sci., Vol. 98, pp. 203~211.