

재순환 유동 공기 자가흡입에 의한 마이크로버블 발생 오리피스 노즐 시스템에 대한 실험적 연구

오신일*, 박상희**,#

*금오공과대학교 기계공학과 대학원, **금오공과대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Orifice Nozzle System that Generates Micro-bubbles by Self-suction of Air with a Recirculating Flow

Shin-il Oh*, Sang-Hee Park**,#

*Department of Mechanical Engineering, **Department of Mechanical Engineering

(Received 10 November 2017; received in revised form 28 November 2017; accepted 8 December 2018)

ABSTRACT

An experimental study was performed on the orifice nozzle system that generates micro-bubbles by air self-suction using a venturi nozzle. This study experimentally investigates the amount of air sucked into the venturi nozzle and the number of micro-bubbles generated by the orifice nozzle system in Cases 1 and 2. The experimental conditions were varied by changing the diameter of the orifice nozzle ($d=2\sim 7$ mm) and the number of holes of the perforated plate nozzle ($n=2\sim 12$). In Case 1, the air self-suction was more than 2 LPM at $d \leq 4$ mm. When $d = 4$ mm, the total number of bubbles was 29,777, and it was confirmed that micro-bubbles occupied approximately 65% of the total number of bubbles. In Case 2, the air self-suction was maintained constant at approximately 2.5 LPM regardless of the number (n) of holes. The total amount of bubbles increased when n increased but remained constant at approximately 44,000 when $n \geq 7$ EA. It was also confirmed that more than 80% of all bubbles were micro-bubbles when $n \geq 10$ EA. Thus, the number of micro-bubbles increased by approximately 15% compared to the experimental result of Case 1, which was optimized with $d = 4$ mm.

Key Words : Micro-bubble(마이크로버블), Orifice Nozzle(오리피스 노즐), Perforated Plate Nozzle(다공판 노즐), Air Self-suction(공기자가흡입), Bubble Size Distribution(버블크기분포)

1. 서 론

마이크로버블(Micro-bubble)은 직경이 50 μ m 이하인 기포를 말하며, 일반 기포에 비해 수중에서

부상속도가 1분에 3mm 정도로 매우 느려서 물속에서 장시간 체류하면서 용해되며, 버블의 표면이 음전하의 성격을 띠어 물속의 부유물이나 먼지 등과 흡착성이 매우 높다. 또한, 기체와 액체가 맞닿는 면적이 커서 질량 및 에너지 전달력이 크다.

이러한 특성으로 인해 최근에는 디스플레이 및

Corresponding Author : parksh@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7298, Fax: +82-54-478-731

반도체 산업에서 마이크로버블을 이용하여 대형 평판디스플레이를 분리하거나 반도체용 고정밀 부품의 세정기술 그리고 용존공기부상 공정에서 마이크로버블을 분사하여 수질환경 오염원인 녹조 제거 및 폐수처리 등에 적용하고 있다^[1,2].

마이크로버블을 발생시키는 주요 장치로는 공기의 자가흡입장치, 용해장치, 마이크로버블 발생 노즐이다. 본 논문은 마이크로버블을 발생시키는 노즐을 대상으로 연구하였다.

마이크로버블을 발생시키는 노즐에 대한 선행 연구로는 Kim H. I. 등^[3]은 노즐 출구에 충돌판 유무와 노즐 입구의 형상과 개수의 변화에 따라 발생하는 버블 크기를 수치적으로 연구하였다. 이들은 노즐 입구 개수에 따라 50mm 이하의 버블이 70% 이상 나타남을 보였다. Park S. C. 등^[4]은 공기포화장치에 스프레이 노즐의 설치 유무에 따른 미세기포 발생에 대하여 연구하였다. 이들은 노즐이 있을 때 공기체적량이 25~29% 정도 더 증가하였고 노즐 유속이 증가할수록 발생하는 기포 크기가 감소함을 보였다. Kwak G. T. 등^[5]은 공기가 자가흡입(Self-suction)되는 보텍스 노즐을 이용하여 마이크로 버블의 발생 정도를 파악하는 실험을 수행하였다. 이 연구에서는 공기의 자가흡입 유무에 따라 마이크로버블의 발생량이 자가흡입이 있는 경우가 없을 때보다 1.4~2.2배 더 증가함을 보였다. Lim J. Y. 등^[6]은 벤츄리 노즐을 이용한 마이크로버블 발생장치의 최적운전 조건의 검토와 버블크기 분포 분석하였다.

상기의 선행연구 결과를 살펴보면 다양한 노즐을 이용하여 마이크로버블 발생과 버블의 크기에 미치는 인자들에 대해 연구하였지만, 재순환 사이클에 의해 공기를 자가흡입하여 오리피스 노즐 시스템에 의해 마이크로버블을 발생시키는 연구에 대해서는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 재순환 사이클에 의해 공기를 자가흡입하여 마이크로버블 발생 시스템을 이용하여 마이크로버블 발생을 위한 운전조건을 검토하고, 오리피스 노즐 시스템에 의해 발생하는 마이크로버블의 특성을 평가하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 오리피스 노즐의 지름과 다공판에 가공된 홀 개수를 실험변수로 하여 노즐

의 출구를 통해 발생하는 마이크로버블의 크기 및 분포를 확인한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 마이크로버블 발생 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 유체 재순환부와 마이크로버블 생성부로 구분하며, 유체 재순환부로는 벤츄리 노즐, 펌프, 압력계, 공기유량계, 유량계로, 마이크로버블 생성부로는 용해 탱크, 오리피스 노즐 시스템, 압력계, 수조, 유량계, 유량조절밸브로 구성되어 있다.

본 실험장치에서 유체의 재순환부를 설치한 목적은 벤츄리노즐(Mazzei injector Model 283)의 목부분을 통과하는 유체의 속도가 빨라지면서 음(-)압력이 발생하여 대기의 공기가 자가 흡입되도록 하는 것이다. 공기의 자가흡입은 시스템에 사용되는 펌프 용량을 작게 하므로 저전력으로 마이크로버블을 생성할 수 있다.

본 실험에 사용한 펌프의 사양((주)유연, S-1504)은 소요동력 0.4kW, 전양정 70m, 유량 350L/H이다. 그리고 관 지름 23.5mm 내의 유속은 0.22m/s이다. 벤츄리 노즐 입출구부에 압력계(HISCO 101P)와 유량계(Z-5025)를 설치하여 순환되는 유체의 압력과 유량을 측정하였다. 또한, 벤츄리 노즐의 목 부분에는 공기유량계(RMA-TMV)를 설치하여 자가 흡입되는 공기량을 측정하였다.

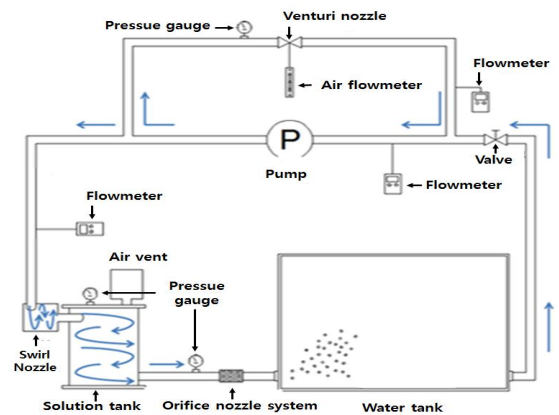


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

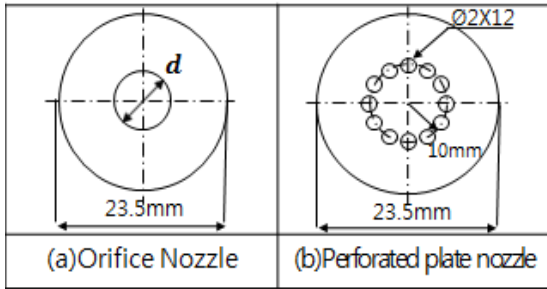


Fig. 2 Orifice nozzle and Perforated plate nozzle

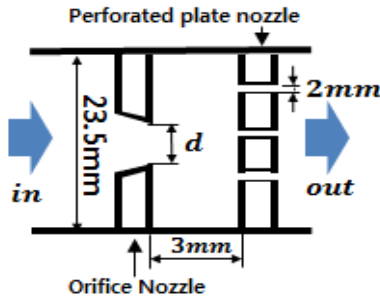


Fig. 3 Orifice nozzle system

본 실험에서 마이크로버블은 가압용해법을 이용하여 높이 265mm, 지름 220mm인 용해탱크 내에서 생성하게 된다. 용해탱크의 선단에 설치된 선회 노즐에 의해 발생한 와류는 용해탱크에 유입되어 공기와 물의 혼합과 확산 그리고 난류 효과 등의 복합적인 영향을 유발시켜 버블 생성을 더욱더 촉진시킨다. 용해탱크 상단의 공기토출구는 탱크 내에서 용해되지 않은 공기를 배출시키는 역할을 한다.

마이크로버블은 용해탱크의 압력이 어느 일정 압력 이상으로 높아야지 버블이 생성되므로 용해탱크의 출구에 오리피스 노즐 시스템을 삽입하여 탱크의 압력을 증가시켰다. 용해탱크의 압력에 따라 재순환부에 흐르는 유량이 비례하여 증가된다.

Fig. 2는 두께 1mm, 직경 23.5mm인 오리피스 노즐과 다공판 노즐을 나타낸다. Fig. 2(a)와 같이 오리피스 노즐의 목부분의 직경은 $d=2\sim 7\text{mm}$ 로 1mm씩 변화시켰다. Fig. 2(b)와 같이 다공판 노즐에는 직경 2mm인 홀이 개수 $n=2\sim 12$ 개를 일정 간격으로 배치하기 위해 노즐 중심에서 10mm인

위치에 홀을 가공하였다.

Fig. 3은 용해탱크와 수조 사이에 설치되어 있는 직경이 23.5mm인 배관 시스템 내에 설치된 오리피스 노즐 시스템의 개략도를 나타낸다. 오리피스 노즐 시스템은 2가지 종류로 구성하였다. 즉 오리피스 노즐 시스템 내에 Fig. 2(a)와 같은 오리피스 노즐만 설치한 경우와 노즐 시스템 내에 오리피스 노즐[Fig.2(a)]과 다공판 노즐[Fig.2(b)]을 순차적으로 배열한 경우이다. 이 배열에서 다공판 사이의 간격을 1~5mm로 변화시킨 선행 실험에서 다공판 사이의 간격이 3mm인 경우가 버블의 크기에 따라 총 버블량이 가장 많이 발생하여 간격을 3mm로 설정하였다.

수조는 크기가 684×270×414mm로서 투명한 아크릴로 제작하여 오리피스 노즐 시스템의 출구에서 발생한 마이크로버블의 유동 흐름을 관찰할 수 있도록 하였다. 수조 내의 마이크로버블의 유동은 카메라를 이용하여 촬영하였다. 마이크로 버블의 발생량 및 분포도의 측정은 입자측정시스템(QICPIC-LIXELL)을 이용하였다.

본 연구에서는 두 가지의 실험을 수행하였다. 즉 Case 1은 오리피스 노즐 시스템 내에 오리피스 노즐만 설치하여 오리피스의 목 직경을 $d=2\sim 7\text{mm}$ 로 변화시켜서 공기흡입량과 마이크로버블의 발생량을 조사하는 실험이다. 이 실험에서는 오리피스 노즐의 최적화된 목 직경 d 를 구하는 것이다. Case 2는 Case 1의 결과에서 최적화된 오리피스 노즐과 다공판 노즐의 홀 개수를 $n=2\sim 12$ 개로 변화시켜서 공기흡입량과 마이크로버블의 발생량을 조사하는 실험이다. 이 실험에서는 마이크로버블 시스템에서 공기의 자가흡입에 의해 마이크로버블이 가장 많이 발생하는 조건을 구하는 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 오리피스 노즐의 목 직경에 따른 압력 및 유량 변화 그리고 마이크로버블의 분포

Fig. 4는 Case1의 실험에서 오리피스 노즐의 목

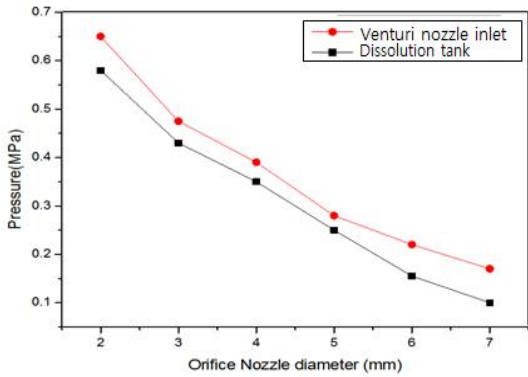


Fig. 4 Variation of pressure for orifice nozzle diameter

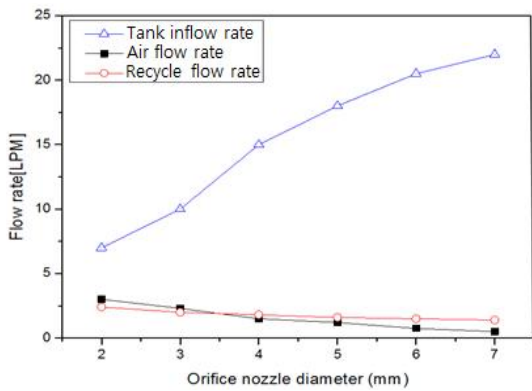


Fig. 5 Variation of the flow rate for orifice nozzle diameter

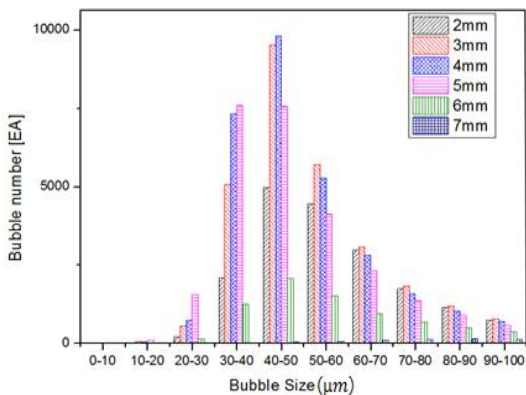


Fig. 6 Distributions of microbubbles generated by orifice nozzle

직경(d) 변화에 따른 벤츄리 노즐의 입구와 용해 탱크의 압력을 나타낸다.

목 직경이 증가함에 따라 벤츄리 노즐의 입구와 용해 탱크의 압력은 거의 선형적으로 감소함을 보였다. 이것은 직경이 증가할수록 용해 탱크의 압력이 감소하여 용해 탱크로 유입되는 물의 유량이 증가되는 반면에 순환수의 유량이 감소하여 벤츄리 노즐 입구의 압력도 감소하게 된다.

벤츄리 노즐의 입구의 압력은 용해 탱크의 압력보다 0.09MPa(d=2mm)~0.08MPa(d=7mm) 정도 더 높게 나타남을 보였으며, 목 직경의 변화에 따른 벤츄리 노즐의 입구와 용해 탱크 사이의 압력차는 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Case 1의 실험에서 노즐의 목 직경(d)의 변화에 따른 용해 탱크의 유입 유량, 재순환 유량, 공기 흡입량을 나타낸다.

노즐의 직경이 증가함에 따라 용해 탱크 유입 유량은 4LPM(d=2mm)에서 22LPM(d=7mm)으로 선형적으로 5.5배 정도 더 증가함을 보였다. 반면에, 재순환 유량은 2.5LPM(d=2mm)에서 1.25LPM(d=7mm)으로 감소함을 보였다. 이 유량의 감소로 인해 벤츄리 노즐의 목 부분의 압력이 증가하여 공기 흡입량은 감소되었으며, d=6mm 이상에서는 공기 유입이 거의 없는 것을 확인되었다.

Fig. 6은 Case 1의 실험에서 마이크로버블의 크기와 발생량을 측정된 결과이다. 마이크로버블의 발생량은 입자 측정 시스템에 0.1L의 버블수를 공급하여 측정된 마이크로버블의 개체수이다. 마이크로버블의 측정 범위는 0~100 μm 범위로 설정하여 10 μm 단위로 조절하여 각 범위 당 입자수를 나타내었다. 마이크로버블의 분포는 버블이 수조 내에 분출되고 나서 10분이 경과한 후에 측정하였다.

버블의 총 발생량은 18,368개(d=2mm), 27,779개(3mm), 29,277개(4mm), 26,072개(5mm), 7,469개(6mm), 617개(7mm)로 측정되었다. 오리피스 노즐의 목 직경 d가 증가할수록 버블의 개수는 증가하다가 d=4mm에서 최대 발생량을 보였고 6mm부터는 버블의 발생량이 급격하게 감소함을 보였다. 총 발생 버블량 중에서 직경이 50 μm 이하의 마이크로버블이 차지하는 비율은 d=2mm에서 39.7%,

54.7%(3mm), 65%(4mm), 61.2%(5mm), 46.3%(6mm), 9.1%(7mm) 정도로 측정되었다.

이것은 오리피스 노즐의 직경이 커질수록 총 유량이 증가하여 재순환 유량이 적어져서 벤츄리 노즐에서 공기의 흡입량이 감소한다. 이로 인해 용해탱크의 압력이 감소하여 헨리의 법칙에 의해 용해되는 공기량이 감소하게 된다. 그러나 총 유량이 증가할수록 펌프 효율은 증가하다가 감소하게 된다. 따라서 본 실험에 사용한 펌프는 오리피스 노즐의 직경이 4mm일 때 펌프 효율과 총 유량과의 관계가 최적 조건이 되어서 마이크로 버블이 가장 많이 발생하는 것으로 예측된다.

또한, 이 결과는 공기의 자흡방식을 이용한 Kwak G. T. 등[5]의 연구 결과보다 총 버블발생량이 약 10배 정도, 특히 $50\mu\text{m}$ 이하인 버블의 비율은 약 10% 정도 더 증가함을 보였다.

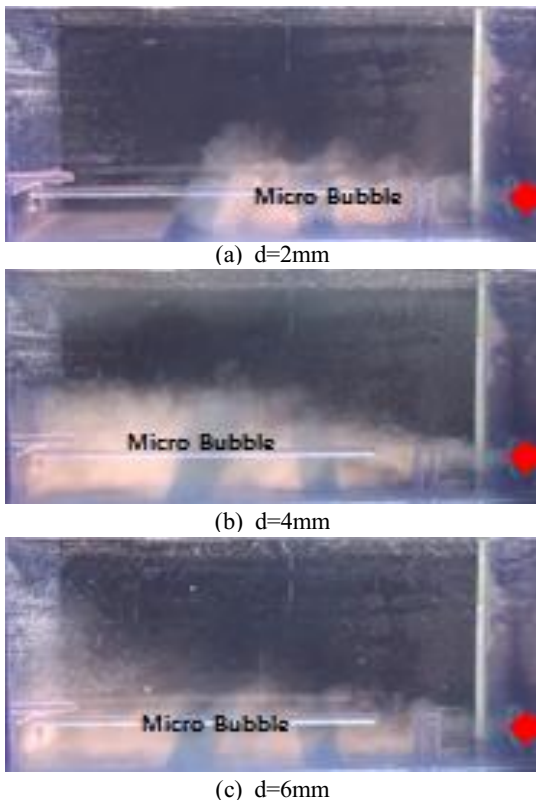


Fig. 7 Visualization of microbubbles in water tank for the orifice nozzle diameter. ($t=10\text{s}$)

Fig. 7은 Case 1의 실험에서 수조 내에서 오리피스 노즐에서 분출되는 마이크로버블의 가시화 사진이다. 직경 $d=2\text{mm}$ 에 비해 4mm의 경우가 버블 발생량이 훨씬 더 많은 것을 관찰할 수 있었고 7mm의 경우에는 버블이 거의 관찰되지 않았다.

따라서, Case 1의 실험에서 버블의 총 발생량과 $50\mu\text{m}$ 이하의 마이크로버블은 직경 $d=4\text{mm}$ 인 경우에서 가장 많이 발생함을 보였다.

3.2 다공판 노즐의 홀 개수에 따른 압력 및 유량 변화 그리고 마이크로버블의 분포

Fig. 8은 Case 2의 실험에서 오리피스 노즐의 직경 $d=4\text{mm}$ 로 일정할 때 다공판 노즐의 홀 개수 n 에 따른 벤츄리 노즐의 입구와 용해탱크의 압력을 나타낸다. 다공판 노즐의 홀 개수 n 이 증가함에 따라 벤츄리 노즐의 입구와 용해탱크의 압력은 급격하게 감소함을 보였다. 벤츄리 노즐의 입구압력과 용해탱크와의 압력차는 홀 개수 n 에 무관하게 약 0.1MPa 정도로 일정하게 유지됨을 보였다.

Fig. 9는 Case 2의 실험에서 노즐의 홀 개수 n 에 따른 용해탱크의 유입유량, 재순환유량, 공기흡입량을 나타낸다. 용해탱크의 유입유량은 $n=2$ 인 경우에 9LPM, $n=12$ 인 경우에 14LPM으로 증가하였으나 $n=4$ 이상에서는 유량이 거의 일정함을 보였다. 또한, 노즐의 홀 개수에 무관하게 재순환 유량은 약 2LPM으로, 공기흡입량은 약 2.5LPM으로 일정하게 유지됨을 보였다.

Fig. 10은 Case 2의 실험에서 측정된 마이크로버블의 크기와 총 발생량을 나타내고 그 결과는 다음과 같다.

즉 버블의 총 발생량은 $n=2$ 인 경우에 22,982개이고, 30,141개($n=3$), 31,054개(4), 34,230개(5), 37,677개(6), 43,946개(7), 43,710개(8), 43,843개(9), 43,738개(10), 43,645개(11), 43,553개(12)로 측정되었다. $n \geq 7$ 에서 버블의 총 발생량은 약 43,500개 이상으로 거의 일정함을 보였고, Fig. 6에 보여진 Case 1의 실험결과보다 총 버블량이 약 1.5배 더 증가함을 보였다.

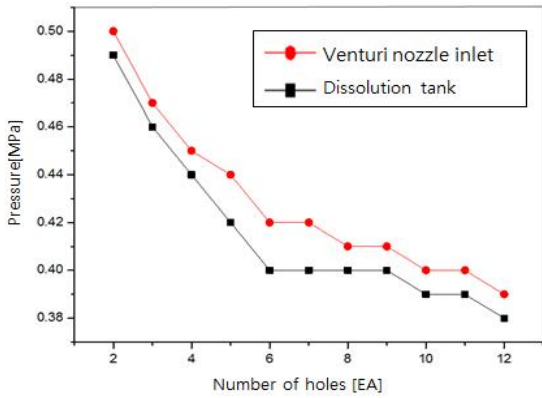


Fig. 8 Variation of pressure for the number of holes of the perforated plate nozzle

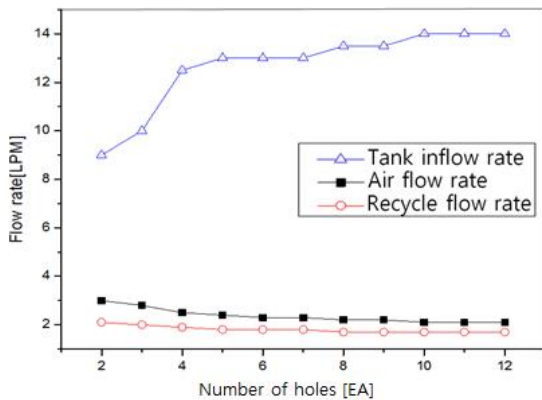


Fig. 9 Variation of the flow rate for the number of holes of the perforated plate nozzle

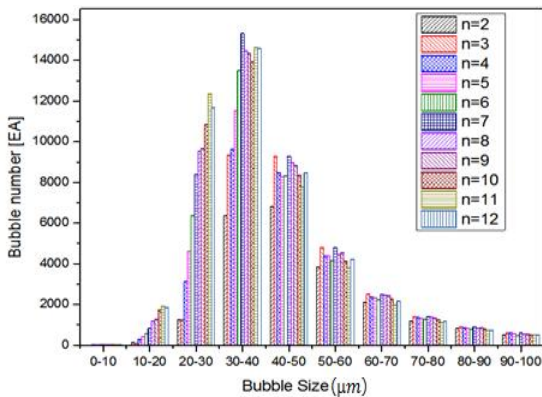


Fig. 10 Distribution of microbubbles generated by the number of holes of the perforated plate nozzle

총 버블량 중에서 직경이 $50\mu\text{m}$ 이하의 마이크로버블은 $n=2$ 에서 63.3%, 66.1%($n=3$), 69.3%(4), 72.5%(5), 76.3%(6), 76.9%(7), 78.1%(8), 77.8%(9), 80%(10), 81%(11), 81.7%(12) 정도의 비율로 측정되었다. 즉 $5 \leq n \leq 9$ 에서 마이크로버블이 차지하는 비율이 70%~78% 정도이고, $n \geq 10$ 에서는 80% 이상됨을 보였다. 이것은 Fig. 6에 보여진 목 직경 $d=4\text{mm}$ 로 최적화된 Case 1의 실험결과보다 $n \geq 10$ 에서 약 15% 정도 더 증가하였다.

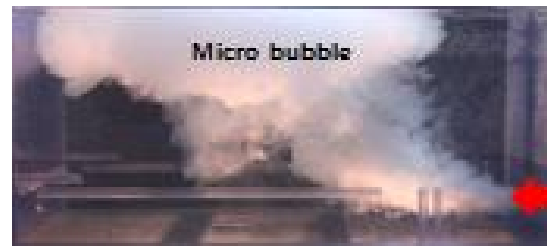
Fig. 11은 Case 2의 실험에서 마이크로버블이 분출된 후 10초가 경과 되었을 때 촬영한 가시화 사진이다. Fig. 10에서 설명한 바와 같이 홀 개수 n 이 증가할수록 총 버블량이 점점 더 증가함을 관찰할 수 있었다.



(a) $n=4$



(b) $n=8$



(c) $n=12$

Fig. 11 Visualization of micro-bubbles in water tank for the number of holes of the perforated plate nozzle

따라서 Case 2의 오리피스 노즐 시스템을 이용한 실험에서 오리피스 노즐의 직경 $d=4\text{mm}$ 를 고정시킨 상태에서 다공판 노즐의 홀 개수가 $n \geq 10\text{EA}$ 에서 마이크로버블이 가장 많이 발생함을 보였다.

이것은 오리피스 노즐을 통과한 유체가 다공판에 충돌하여 난류가 발생함과 동시에 유체가 홀을 통과하면서 난류가 더욱 촉진되어 마이크로 버블이 많아진다고 예측된다.

4. 결론

본 연구는 오리피스 노즐 시스템 내에 Case 1과 2의 실험방법에 의해 발생한 마이크로버블의 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 재순환 흐름에 의한 공기의 흡입량 및 마이크로버블의 발생 정도를 파악하기 위하여 오리피스 노즐의 직경과 다공판 노즐의 홀 개수를 변화시켜 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Case 1의 실험에서 공기의 자가 흡입량은 $d \leq 4\text{mm}$ 에서 2LPM 이상 되었고, 노즐 직경 $d=4\text{mm}$ 일 때 총 버블량이 29,777개로 가장 많았고 이 중에서 직경 $50\mu\text{m}$ 이하의 마이크로버블이 차지하는 비율은 65% 정도가 됨을 알 수 있었다.
2. Case 2의 실험에서 공기의 자가 흡입은 다공판 노즐의 홀 개수 n 에 관계없이 평균 2.5LPM으로 일정하게 유지함을 보였다. 그러나 총 발생 버블량은 n 가 증가할수록 증가하였으나 $n \geq 7\text{EA}$ 에서는 약 44,000개 정도로 일정함을 보였다. 또한, $n \geq 10\text{EA}$ 에서는 총 버블량 중에서 마이크로버블이 80% 이상 분포됨을 확인하였다. 이것은 $d=4\text{mm}$ 로 최적화된 Case 1의 실험 결과보다 마이크로버블이 약 15% 정도 더 증가됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

1. Liu, S., et al., "Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water: The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles," *Chemical Engineering Science*, 93, 250-256, 2013.
2. Kim, M. Y. et al., "Effects of Physical - Chemical Characteristics of Micro bubbles and Particles on Removal Efficiency in Electro-Flotation" *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 25, pp. 535-538, 2005.
3. Kim, H. I. et al., "Numerical Study of Design of Micro Bubble Generation Nozzle" *Trans. of the Korean Society of Mech. Engineers*, A-36(12), pp.1643-1651, 2012.
4. Park, S. C. et al., "An Effect of the Micro Bubble Formation Depending on the Saturator and the Nozzle in the Dissolved Air Flotation System" *Journal of Korean Society Of Environmental Engineers*, E-35(12), pp.929-936, 2013.
5. Kwak, G. T. et al., "An experimental study on the Vortex nozzle for generating micro-bubble by air self-suction" *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp.98-104, 2015.
6. Lim, J. Y. et al., "Evaluation of Characteristics for Microbubble Generation According to Venturi Nozzle Specification" *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 9, 6397-6402, 2015.