

## 자흡방식에 의해 마이크로버블을 발생시키는 충돌 노즐에 대한 연구

### A Study on the Collision Nozzle for Generating Microbubble by Self-Suction Method

강우진<sup>1</sup>, 박상희<sup>2\*</sup>, 유성훈<sup>3</sup>

Woo-Jin Kang<sup>1</sup>, Sang-Hee Park<sup>2\*</sup>, Seong-Hun Yu<sup>3</sup>

#### 〈Abstract〉

An experimental study was performed on the collision nozzle system that generates microbubble by air self-suction using a venturi nozzle. This study experimentally investigates the pressure of a pump and a dissolution tank, water flow rate, air self-suction amount and microbubble generation amount. The experimental conditions were varied by changing the diameter of the collision nozzle ( $d_e=4,5,6,7,8\text{mm}$ ), the pumping power(0.5hp, 1.0hp) and the capacity of the dissolution tank(4.4L, 8/8L). The pressure change of the pump according to the outlet diameter of the collision nozzle showed that the 1.0hp pump power operated more stably than the 0.5hp pump. The pressure change in the dissolution tank was shown to decrease rapidly as the outlet diameter of the nozzle increased. The flow rate of recirculating water was shown to increase as the nozzle diameter increased. Additionally, it was shown that the pump capacity of 1.0hp increased the flow rate more than that of 0.5hp. The self-suction air flow rate was shown to occur above  $d_e=6\text{mm}$ , and the air flow rate increased as the nozzle diameter increased. Also, as the pump capacity increased, the self-suction amount of air increased. It was shown that the amount of microbubble less than 50mm generated was maximum when the nozzle diameter was 6mm, the pump power was 1.0hp, and the dissolution tank capacity was 8.8L.

**Keywords :** *Microbubble, Collision Nozzle, Air Self-Suction, Dissolution Tank*

1 금오공과대학교 기계공학과 대학원

2\* 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 기계공학과, 교수  
E-mail: parksh@kumoh.ac.kr

3 금오공과대학교 기계공학과 대학원

1 Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology

2\* Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor

3 Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology

### 1. 서론

반도체 산업이 발달함에 따라 칩의 제조공정에서 웨이퍼 표면에 부착된 불순물은 칩의 수율에 큰 영향을 미치게 된다. 웨이퍼 표면의 불순물을 제거하는 세정공정은 화학물질처리, 가스, 물리적 방법, 세정액 등을 이용하고 있다. 특히 세정액을 이용한 세정공정은 세정액의 독성 및 강한 염기성으로 인해 후처리 과정에서 환경적인 문제가 발생되고 있다. 이를 해결하기 위해 최근에는 웨이퍼 세정에 마이크로버블을 이용한 방법에 대해 연구가 진행되고 있다.

마이크로버블의 크기는 국제 표준화 기구(2017, ISO)에 의해 직경이 1~100 $\mu\text{m}$  영역인 버블로 정의하고 있다[1]. 특히 50 $\mu\text{m}$ 이하 크기의 마이크로버블은 반도체 웨이퍼의 세정공정에 많이 이용하고 있다[2]. 마이크로버블은 일반 버블과 다르게 유체 내에서 1mm/s 정도의 느린 속도로 상승하면서 축소되어 소멸한다. 또한, 마이크로버블은 붕괴될 시 OH-radical이 생성되어 다양한 오염물질과 반응하여 산화 및 제거가 가능한 특징을 가지고 있다[3].

마이크로버블에 관한 선행 연구는 다음과 같다. Zhao 등[4]은 벤츄리관을 통해 흐르는 액체의 버블운동에 관한 실험을 수행하였다. Park 등[5]은 분사노즐을 이용하여 미세기포 발생에 대한 실험을 수행하였다. Kwak 등[6]과 Yu 등[7]은 보텍스 노즐을 이용한 마이크로버블의 발생에 대한 실험을 수행하였다. Oh 등[8]은 오리피스 노즐을 이용한 마이크로버블의 발생에 대한 실험을 수행하였다.

상기의 연구에서는 다양한 마이크로버블 발생장치를 이용하여 버블 발생의 인자와 버블 발생량을 연구하였다.

본 연구에서는 마이크로버블 발생시스템에서 펌프

용량, 충돌노즐의 출구직경 그리고 용해탱크 용량에 따른 50mm이하의 마이크로버블 발생에 관한 실험적 연구를 수행하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 마이크로버블 발생 시스템의 개략도이다. 시스템은 펌프, 유량계, 벤츄리관, 공기유량계, 선회노즐, 용해탱크, 충돌노즐, 수조로 구성된다. 유량계는 펌프 후단에 설치되어 순환하는 물의 유량을 측정한다. 공기유량계는 벤츄리관의 목 부분에 설치되어 시스템에 자가 흡입되는 공기유량을 측정한다. 유체는 수조의 물을 펌프에 의해 시계방향으로 벤츄리관, 용해탱크, 충돌노즐을 통과하면서 최종적으로 수조에 유입되

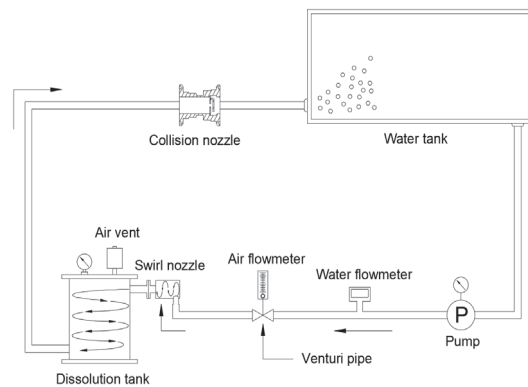


Fig. 1 Microbubble generation system

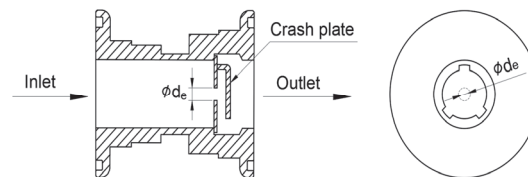


Fig. 2 Schematic diagram of the collision nozzle

면서 재순환한다. 벤츄리관(Mazzei injector 0584)의 목 부분에서는 유체가 가속되면서 압력이 대기압보다 낮아지게 된다. 이로 인해 공기는 공기유량계를 통해 벤츄리관 내로 자가 흡입되게 된다.

Fig. 2는 본 연구에 사용한 충돌노즐의 개략도이다. 충돌노즐은 입구직경이 20.7mm이고 출구직경( $d_e$ )을 4, 5, 6, 7, 8mm로 변화시켰다. 또한 노즐의 출구에서 3mm 정도 떨어진 위치에 충돌판을 설치하였다. 충돌판은 용해탱크에서 공기가 용해된 유체가 노즐의 출구를 통과하면서 충돌판에 부딪혀 버블이 더욱더 미세화시키는 역할을 한다.

Fig. 3은 용해탱크의 개략도이다. 벤츄리관으로 유입된 공기는 선회노즐에서 물과 혼합되어 용해탱크로 들어가게 된다. 용해탱크는 혼합 유체가 탱크 내부에 높은 압력이 형성되어 공기가 유체에 용해되는 것을 도와주는 역할을 한다. 또한 용해되지 않은 공기는 탱크 상부의 공기 토출구를 통해 빠져나가게 된다. 용해탱크의 용량은 4.4L와 8.8L이다.

본 연구에서는 펌프의 동력을 0.5hp와 1.0hp, 용해탱크의 용량을 4.4L와 8.8L 그리고 충돌노즐의 출구직경을 4, 5, 6, 7, 8mm로 변화시켜 가면서 마이크로버블의 발생량에 대한 실험을 수행하였다. 버블량의 측정은 마이크로버블 측정시스템(QICPIC-LIXELL)을 사용하였다.

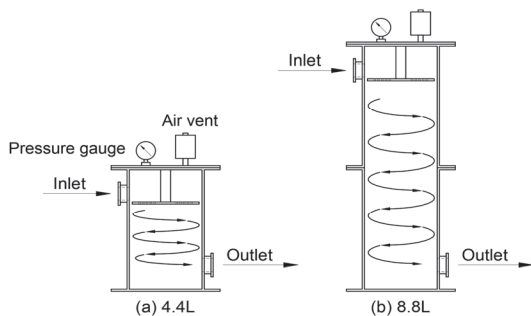


Fig. 3 Schematic diagram of the dissolution tank (4.4, 8.8L)

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 용해탱크 용량이 4.4L일 때 펌프 동력과 충돌노즐의 출구직경( $d_e$ )에 따른 펌프의 압력 변화이다. 0.5hp 펌프의 경우에는 노즐의 출구직경이 증가할수록 펌프의 압력이 급격하게 감소하다가 출구직경이 6mm이상부터 3.5bar로 일정하

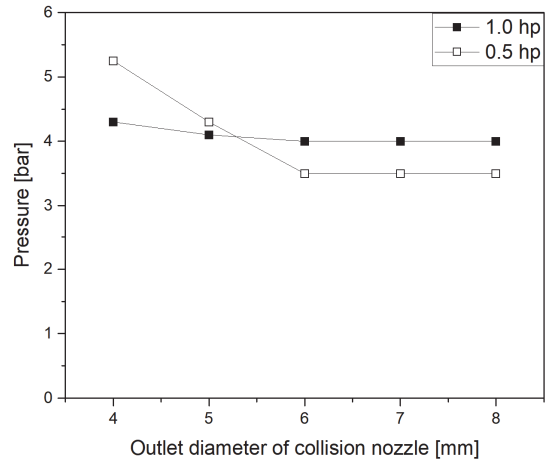


Fig. 4 Pressure of pump according to diameter of the collision nozzle at 4.4L

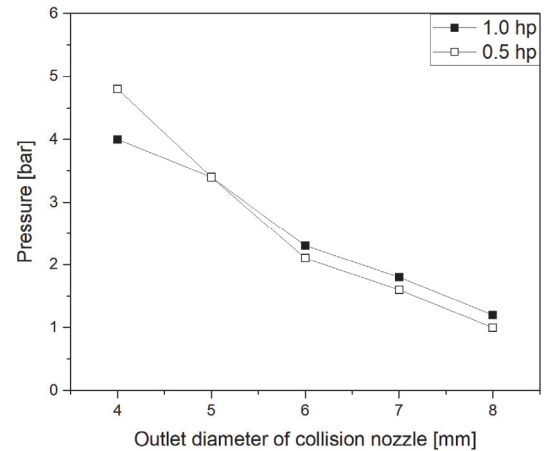


Fig. 5 Pressure of dissolution tank according to diameter of the collision nozzle

게 유지됨을 보였다. 반면에 1.0hp의 펌프는 노즐 출구의 직경에 관계없이 약 4.0bar로 일정하게 유지됨을 보였다. 또한  $d_e=4, 5\text{mm}$ 일 때 1.0hp 펌프보다 0.5hp 펌프의 경우가 펌프 압력이 높게 측정되었으나  $d_e=6\text{mm}$ 이상에서는 1.0hp 펌프가 압력이 0.5bar 정도 더 높게 유지됨을 보였다. 따라서 충돌노즐의 출구직경에 따른 펌프의 압력 변화는 1.0hp 펌프의 경우가 0.5hp 펌프보다 더 안정적으로 작동됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 용해탱크 용량이 4.4L일 때 펌프 동력과 충돌노즐의 출구직경( $d_e$ )에 따른 용해탱크의 압력변화를 나타낸다. 0.5hp와 1.0hp 펌프의 경우에는 충돌노즐의 출구직경이 증가할수록 용해탱크의 내부압력이 급격하게 감소함을 보였다. 출구직경이  $d_e < 5\text{mm}$ 에서는 0.5hp 펌프경우가 1.0hp 펌프보다 용해탱크의 내부압력이 1.0bar 정도 더 높게 나타남을 보였다. 반면에  $d_e > 5\text{mm}$ 일 때에는 1.0hp 펌프가 용해탱크의 압력이 더 높게 나타났다.

Fig. 6은 용해탱크 용량이 4.4L일 때 펌프 동력과 충돌노즐의 출구직경( $d_e$ )에 따라 재순환하는 물의 유량을 나타낸다. 두 용량의 펌프 모두의 경우  $d_e=4\sim 5\text{mm}$ 에서는 물의 유량이 급격히 증가하다가  $d_e=6\text{mm}$ 이상에서는 펌프의 압력이 일정하게

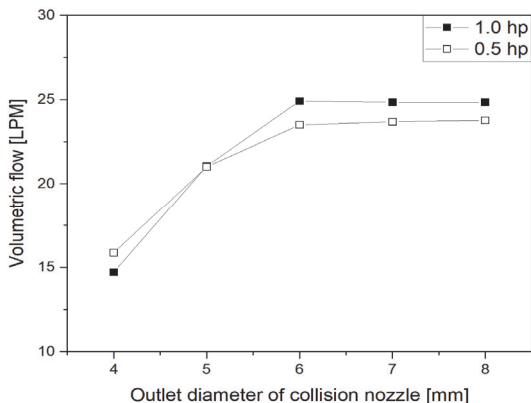


Fig. 6 Flow rate of water according to diameter of the collision nozzle

유지됨에 따라 재순환되는 물의 유량도 일정하게 유지됨을 보였다. 또한, 출구직경  $d_e=4\text{mm}$ 일 때 1.0hp 펌프보다 0.5hp 펌프의 경우 더 많은 유량의 물이 재순환되었으나  $d_e=5\sim 8\text{mm}$ 일 때에는 1.0hp 펌프가 더 많은 유량이 재순환함을 보였다.

Fig. 7은 용해탱크 용량이 4.4L일 때 펌프 동력과 충돌노즐의 출구직경( $d_e$ )에 따라 자가 흡입되는 공기의 유량을 나타낸다.  $d_e=4, 5\text{mm}$ 일 때에는 두 동력펌프 모두 공기가 자가 흡입되지 않음

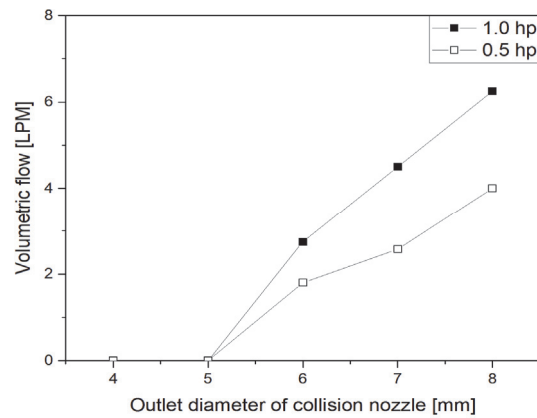


Fig. 7 Flow rate of air according to diameter of the collision nozzle

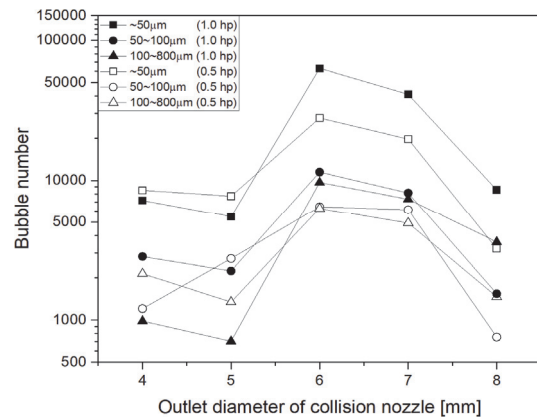


Fig. 8 Distribution of bubbles generated by collision nozzle according to the power of the pump at 4.4L

을 보였다.  $d_e=6\sim 8\text{mm}$ 일 때에는 충돌노즐의 출구직경이 증가할수록 자가 흡입되는 공기 유량도 급격하게 증가됨을 보였다. 특히 0.5hp 펌프보다 1.0hp 펌프를 사용할 경우 공기의 자가 흡입량이 1~2.2LPM 정도 더 많음을 보였다.

Fig. 8은 용해탱크의 용량이 4.4L이고 펌프 동력이 0.5, 1.0hp일 때 충돌노즐의 출구직경에 따른 버블의 크기별(50 $\mu\text{m}$ 이하 크기, 50~100 $\mu\text{m}$  크기, 100~800 $\mu\text{m}$  크기)과 버블발생 개수를 나타낸다. 총 버블 개수는 0.5hp 펌프 및  $d_e=4\text{mm}$ 의 경우를 제외한 모든 경우에서 50 $\mu\text{m}$ 이하의 마이크로버블이 가장 많이 발생하였고 100~800 $\mu\text{m}$  크기의 버블이 가장 적게 발생함을 보였다. 펌프 동력이 0.5, 1.0hp의 경우 노즐 직경이 증가함에 따라 마이크로버블 발생량도 증가하다가 노즐 직경이 6mm일 때 버블 발생량이 최대로 나타났고  $d_e=7, 8\text{mm}$ 에서는 발생량이 서서히 감소함을 보였다.

노즐출구 직경 6mm일 때 펌프용량 0.5hp의 경우 50 $\mu\text{m}$ 이하 크기의 마이크로버블의 발생량은 27,896ea이고 1.0hp의 경우에는 63,109ea로서 펌프용량 0.5hp보다 1.0hp가 약 2.3배 더 많이

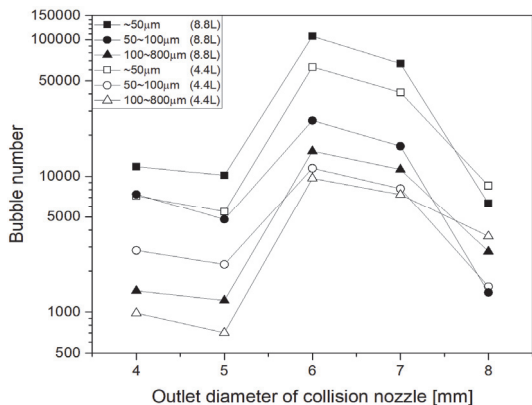
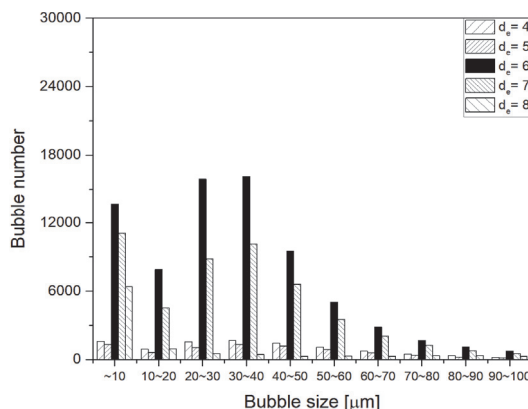


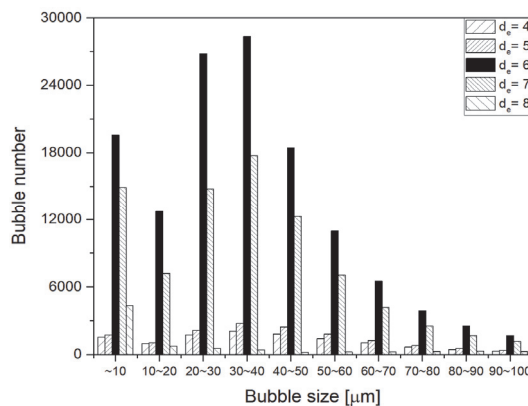
Fig. 9 Distribution of bubbles generated by collision nozzle according to the capacity of the dissolution tank

발생함을 보였다. 따라서 마이크로버블의 발생량은 공기의 자가 흡입이 발생하는 노즐출구 직경이 6mm이고 펌프 용량이 1.0hp일 때 가장 많이 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 9는 1.0hp 펌프를 사용할 때 용해탱크의 용량(4.4L, 8.8L)과 충돌노즐의 출구직경에 따른 버블 발생량을 나타내었다. 용해탱크의 용량이 4.4L인 경우 노즐 직경이 증가함에 따라 마이크로버블 발생량도 증가하다가 노즐 직경이 6mm일 때 버블 발생량이 최대로 나타났고  $d_e \geq 7\text{mm}$ 에서는 발생량이 서서히 감소함을 보였다. 또한 용해



(a) Dissolution tank capacity 4.4L



(b) Dissolution tank capacity 8.8L

Fig. 10 Distribution of bubbles generated by collision nozzle according to the capacity of the dissolution tank

탱크의 용량이 8/8L인 경우에도 동일한 경향을 나타내었다.

노즐출구 직경 6mm일 때 용해탱크의 용량 4.4L의 경우 50 $\mu$ m이하 크기의 마이크로버블의 발생량은 63,109ea이고 8.8L의 경우에는 105,917ea로서 용해탱크의 용량이 2배 증가함에 따라 마이크로버블의 발생량이 약 1.7배 더 증가함을 나타내었다.

Fig. 10은 용해탱크의 용량이 4.4L와 8.8L일 때 충돌노즐의 출구직경( $d_e$ )에 따른 100 $\mu$ m이하 크기의 버블을 10 $\mu$ m 크기별로 나타내었다. 용해탱크의 용량에 관계없이 모든 버블 크기에서  $d_e=6$ mm의 충돌노즐을 사용하였을 때 현저히 많은 버블이 발생함을 보였다. 반면에  $d_e=8$ mm에서는 자가 흡입되는 공기의 유량이 가장 크지만 자가 흡입이 없는  $d_e=4, 5$ mm 보다 적은버블 발생량을 보였다. 두 가지 용량의 용해탱크에서 버블 발생량은 모두 30~40 $\mu$ m 크기의 버블이 가장 많이 발생함을 보였다.

#### 4. 결론

본 연구는 펌프의 동력, 용해탱크의 용량 그리고 충돌노즐의 출구직경의 변화에 따라 펌프와 용해탱크의 압력변화, 물 및 공기의 유량 그리고 마이크로버블의 발생량을 실험적으로 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 충돌노즐의 출구직경에 따른 펌프의 압력 변화는 1.0hp 펌프가 0.5hp 펌프보다 더 안정적으로 작동됨을 알 수 있었다.
2. 용해탱크의 압력은 노즐의 출구직경이 증가할수록 급격하게 감소함을 보였다. 또한 출구직경이  $d_e > 5$ mm에서는 펌프용량 1.0hp가 0.5hp보다 용해탱크의 압력이 더 높게 나타났다.

3. 재순환하는 물의 유량은 노즐직경이 증가할수록 증가함을 보였고, 펌프용량 0.5hp보다 1.0hp의 경우가 유량이 더 증가함을 보였다.
4. 자가 흡입되는 공기량은  $d_e=6$ mm이상에서 발생하였으며 출구직경이 증가할수록 자가 흡입되는 공기량도 급격하게 증가됨을 보였다. 또한 펌프의 용량이 클수록 공기의 자가 흡입량도 증가됨을 보였다.
5. 50 $\mu$ m이하의 마이크로버블의 발생량은 노즐 직경이 6mm, 펌프용량이 1.0hp 그리고 용해탱크의 용량이 8.8L일 때 가장 많이 발생함을 보였다.

## 사 사

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2021년).

## 참고문헌

- [1] ISO 20480-1“ Fine bubble technology – General principles for usage and measurement of fine bubbles – Part 1: Terminology,” 2017.
- [2] Hwan Soo Cha “Present State and Future Prospect for Microbubble Technology,” Bulletin of Food Technology, Vol 22, No 3,544-552 page, 2009.
- [3] Masayoshi Takahashi, Kaneo Chiba and Pan Li “Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus,” The Journal of Physical Chemistry B , Vol 111, 1343-1347 page, 2007.
- [4] Liang Zhao, Licheng Sun, Zhengyu Mo, Jiguo Tang, Liuyun Hu, Jingjing Bao “An Investigation on Bubble Motion in Liquid Flowing through a Rectangular Venturi Channel,” The Journal of

- Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 97, 48-58 page, 2018.
- [5] S. C. Park, H. Y. Oh, M. K. Chung, S. L. Song, Y. H. Ahn “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 Manufacturing Process Engineers 14(1), 99-104 page, 2015.
- [6] G. T. Kwak , S. H. Park, C.S. Kim, S.Y. U “An experimental study on the Vortex nozzle for generating micro-bubble by air self-suction,” Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers 2(4), 39-49 page, 1994.
- [7] S. H. Yu , S. H. Park, W. J. Kang, S. W. Han “A Study on the Fluid Flow of Vortex Nozzle for Generating Micro-bubble,” Journal of the Korean Society of Industry Convergence 25(4), 637-644 page, 2022.
- [8] S. I. Oh, S. H. Park “An Experimental Study on the Orifice Nozzle System that Generates Micro-bubbles by Self-suction of Air with a Recirculating Flow,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 17(1), 82-88 page, 2018.

---

(접수: 2023.10.10. 수정: 2023.11.02. 게재확정: 2023.11.13.)