

레이저 회절 측정기를 이용한 벤츄리 캐비테이션에서의 마이크로버블 발생 특성 연구

Study on Micro-bubble Generation Characteristics in Venturi Cavitation using Laser Diffractometer

임윤규¹ · 양해정^{1*} · 김영일²

Yun Gyu Lim, Hae Jeong Yang and Yung Il Kim

Received: 30 Oct. 2018, Accepted: 26 Nov. 2018

Key Words : Micro-bubble(마이크로버블), Venturi Tube(벤츄리 튜브), Air-Fluid Contact Ratio(기액접촉비), Cavitation(공동화), Sterilizing Power(살균력), Water Quality Purify(수질정화)

Abstract: The use of micro bubbles in industrial fields has been increasing in the recent years., particularly micro-bubble sterilization and water purification effects. Various methods have been developed for the generation of micro-bubbles. Depending on the method of generating bubbles, the micro-bubbles can be roughly classified into saturation molding, cavitation and rotation flow types. The objective of this study was to use ventilated tube type as a method of generating micro-bubbles in order to purify large amount of water quality such as lakes and reservoirs. This method shows a difference in efficiency in which micro-bubbles are generated depending on the contact ratio of gas to liquid. The study also investigated the optimal gas · liquid contact ratio by applying various orifice methods and investigated the optimum condition of micro-bubble generation by gas · Based on this, a technology to develop a micro-bubble generator with a venturi type nozzle shape that has a high water purification effect was developed.

기호 설명

λ : Wavelength (nm)
 x : Time- dependent variables
 θ : Diffraction angle
 Count : Diffraction/ scattering intensity unit
 $\sin \theta_n$: Fraunhofer diffraction intensity
 n : Ordinal number of diffraction angle

1. 서론

북유럽을 중심으로 널리 적용되고 있는 부상분리의 일종인 용존공기부상(dissolved-air flotation, DAF) 공정은 정수처리시스템에서의 최종 공정인 여과의 전처리공정으로 기존의 침전공정을 대체할 수 있는 효과적인 대안으로 부상하고 있으며 특히 저 탁도, 부식질(humic substances) 또는 자연적인 색도나 조류 등을 함유한 원수의 처리에 유용한 공정으로 알려져 있다.¹⁻²⁾ 용존 공기 부상법이란 높은 압력으로 물에 공기를 충분히 용해시켜 이를 처리하고자 하는 원수에 주입시키면 수중에서 다시 감압된 물은 과포화된 만큼의 공기가 미세한 기포로 형성되어 처리수 중의 플록과 결합한다. 이 기포-플록 결합체는 빠르게 수중에서 수표면으로 상승하여 고액 분리가 달성되는 수처리 기법이다. 용존공기부상법의 장점으로 용존공기부상을 채택한 상수도시설은 단기간에 건설이 가

* Corresponding author: yhj@kpu.ac.kr

1 Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic University, Gyeonggi-Do 15073, Korea

2 Department of Nano Optical Engineering, Korea Polytechnic University, Gyeonggi-Do 15073, Korea

Copyright © 2019, KSFC

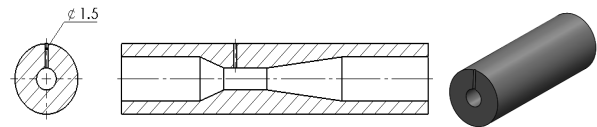
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

능하고 조류제거가 용이하다.¹⁾ 아울러 부상된 슬러지의 고형물비가 높아지고 체류시간이 감소된다. 또한 기존의 중력 침전 방식(conventional gravity sedimentation, CGS) 보다 저 탁도로 유입되는 원수를 처리하기에 유리하고 저 수온 지역에서 부유물질의 제거효율이 좋은 것으로 알려져 있다.²⁾ 용존공기부상 기술로 주로 미세기포 발생장치를 사용하고 있는데 이 장치는 공기와 순환수 접촉부분으로 포화조(saturator), 공동화(cavitation), 회전흐름(rotationing-flow)형 장치들로 구분된다.³⁻⁴⁾ 이러한 미세기포 발생 및 처리효율은 A/S 비, 기포 크기 및 개수, 기포 부상 속도, 기포 표면적, 기체 체류량(gas holdup)의 주요 인자에 따라 다르게 된다.⁵⁾ 공동화형 벤츄리관(venturi tube)을 이용하여 펌프전단에서 공기를 주입하는 방식으로 발생하는 미세기포의 평균직경이 100~250 μm 로 생성되며 펌프에서 토출되는 배관에 가·액 접촉 장치를 설치하여 기·액 접촉비에 따라서 미세기포 발생효율이 큰 차이를 보이게 되는데⁶⁾ 본 실험에서는 공동화형 장치인 벤츄리관에 외부의 공기가 압력차에 의해 물속으로 자흡하는 저압형 미세기포 확산장치구조로 오리피스⁷⁻⁸⁾ 공기관의 유형이 마이크로버블에 미치는 발생특성과 마이크로버블 입자의 크기를 레이저 회절측정 장치를 통하여 직접 측정하는 실험을 수행하였다.⁹⁻¹⁰⁾

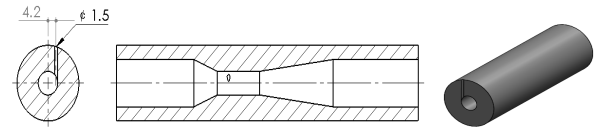
2. 실험장치의 구성 및 방법

2.1 공동화형 벤츄리관

본 연구에서 사용한 미세기포 발생장치는 Fig. 1과 같이 공기 유입구를 2 가지 유형의 형태를 가진 공동화형 벤츄리관 형상으로 발생기의 중심은 원형의 튜브 형상이고 투명한 플라스틱 재질이며 전체길이는 156mm, 내경을 10mm로 하고 내경과는 수직하게 관통된 오리피스(Orifice) 공기 유입구의 직경을 1.5mm로 하였고 이 공기 유입구를 통하여 대기 중의 공기가 자연스럽게 유입되도록 하였다. 벤츄리관의 외측 한쪽 끝단에는 순환수에 대한 회전펌프를 연결하여 선회시키고 다른 끝단에는 공동화형 벤츄리관을 유형에 따라 연결하고 배출되는 마이크로버블의 입자크기를 레이저 회절장치를 통해 측정하기 위해서 수조의 맞은편에 in-line 튜브를 연결하고 설치하였다.¹¹⁾



a) Vertical type with one orifice tube



b) Tangential type with one orifice tube

Fig. 1 Orifice configuration of venturi tube

2.2 순환수 펌프시스템 구성

먼저 수조안에 약 90% 순환수가 담기게 되며 수조의 전체크기는 2200×500×500mm(L,W,H)이고 두께는 8mm로 순환수 압력을 견딜 수 있도록 하고 전면과 후면은 투명 플라스틱으로 하여 미세 기포가 발생되었을 때 수조 내에서 관찰이 잘 이루어질 수 있도록 제작되었다.

순환수 회전펌프(PA-930, 270L/min, 신한일전기, 한국)는 수조에 흡입관을 설치하여 회전펌프를 통해서 순환수가 계속적으로 순환되도록 하고 토출구와 연결된 벤츄리관의 끝단에서는 지속적으로 미세 기포들이 발생하여 배출되게 되는데 이렇게 생성되어지는 미세 기포들이 측정계로 설치된 in-line 흐름 튜브를 타고 안쪽으로 잘 흘러들어 들어갈 수 있도록 수조의 중앙에 지지대를 설치하고 고정시켜 놓았다. Fig. 2는 수조와 순환수 펌프의 토출구에 공동화형 벤츄리관을 연결하여 미세기포가 발생 배출되는 시스템을 그린 것이다.

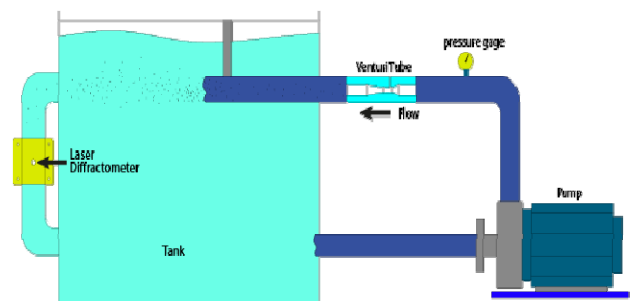


Fig. 2 Photograph of circular type water tank with cavitation venturi

2.3 레이저 회절장치 및 버블 유입 in-line 튜브 유형별 공동화형 벤츄리관을 통해서 발생하는 미

세기포의 입자크기를 측정하기 위해서 Fraunhofer의 이론^{7,8)}에 따르면 레이저 회절신호의 세기와 입자크기의 제곱에 비례하며 회절각도는 입자크기에 반비례하는 식(1)을 적용한 레이저 회절측정 장치를 이용한다.

$$\sin \theta_n = \frac{n \times \lambda}{x} \quad (1)$$

여기서, θ 는 입자에 비례한 회절각, λ 는 레이저 파장($0.67\mu\text{m}$), x 는 입자의 크기, n 은 입자 회절 각(기포 한 개의 값으로 1을 의미)이다. Table 1은 (1)식에 근거하여 레이저의 회절각도를 각도별로 계산한 값으로 해당된 각도에서 정해진 입자의 크기가 생성될 때 그 반응을 회절세기로 확인을 할 수 있다. Fig. 3은 레이저의 회절각도를 각도별로 설정할 수 있는 레이저 회절측정 장치의 구성을 나타내고 있다.

Table 1 Calculation of bubble size according to laser diffraction angle

회절각	50°	90°	135°
입자크기	0.67 μm	0.87 μm	0.94 μm

순환펌프의 토출구 배관에 연결된 벤츨리관을 통하여 발생 배출되는 미세 기포들이 수조의 끝단에 in-line으로 설치된 흐름관으로 일정량 유입될 수 있도록 측정용 튜브관의 직경을 50mm로 투명 플라스틱 재질로 하고 수조의 바닥에서부터 전체높이의 2/3 되는 지점에 in-line으로 위치시키고 측정튜브의 흐름관 안으로 유입되어 통과하는 기포들에 주사되는 레

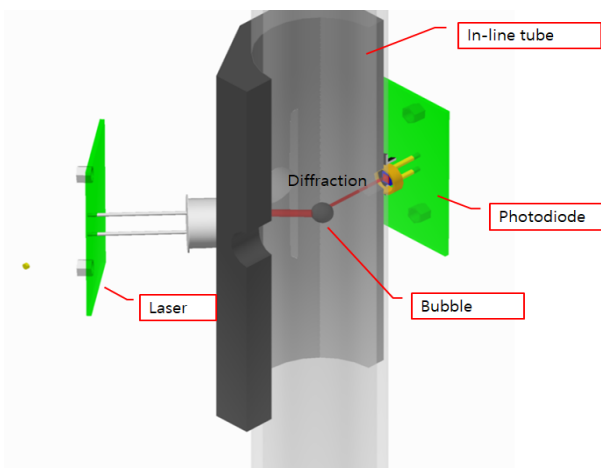


Fig. 3 Schematic diagram of optical diffraction module

이저의 신호세기는 670nm He-Ne 레이저와 레이저 다이오드 부품으로 구성되었으며 측정튜브의 외관을 감싸는 하우징 구조로 설치하였다. 또한 in-line 튜브 측정흐름관으로 한꺼번에 너무 크고 많은 양의 기포가 직접 들어가지 않도록 하여 특정기포 내에 다른 기포간의 간섭현상을 최소화하였다.

Fig. 3은 레이저 회절측정 장치로 회절각도별 마이크로(μm)에 해당되는 미세기포 입자를 확인하기 위한 구성도이다.

2.4 레이저 회절장치의 데이터 수집과 모니터링

레이저 회절장치에서 측정된 데이터의 수집 장치와 모니터링 부분이 구분되어 있다. in-line 흐름관 측정 튜브를 통하는 기포에 주사된 레이저 회절신호는 레이저 다이오드를 통해서 아날로그 신호가 출력되는데 이 아날로그 신호는 11 bits A/D converter를 가진 마이크로프로세서로 무선 RF 통신을 통하여 컴퓨터에 연결되어 있다. 이 무선 RF 통신 모듈(424MHz, VITCON, 한국)은 1 : 1 통신모듈이고 데이터의 수집은 컴퓨터에서 응용소프트웨어로 모니터링 하였다.

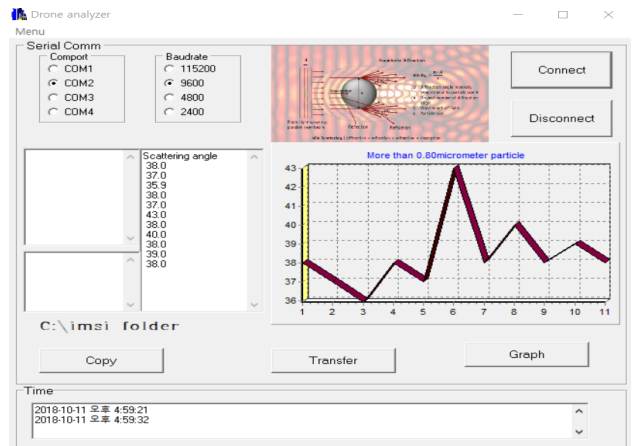


Fig. 4 Acquisition and monitoring of laser diffraction measurement data

3. 실험 결과

3.1 레이저 회절장치의 회절측정각도 결정

레이저 회절측정 시스템에서 마이크로버블의 입자크기에 대한 레이저의 회절 각을 Table 1.에서 계산하여 제시된 각도로 하고 공동화형 벤츨리관의 공기 유입구 형태를 두 가지 유형으로 구성하였다.

이때 공기 유입구의 수를 1개, 2개 및 4개의 유입

구별로 모두 초기실험을 실행한 결과 1개 또는 2개의 유입구에서는 미세기포의 발생 수와 빈도가 비교적 적어서 레이저 반응세기도 미약하게 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서 수조에 in-line으로 설치된 레이저 회절측정 시스템과 다량의 기포발생을 유도할 수 있는 벤츄리관으로 Tangential type의 형태에 4개의 공기 유입구를 설치하여 유용성을 높이는 동시에 회절 각에 따른 연구를 수행하였다.

Fig. 5처럼 공동화형 벤츄리관을 순환수 펌프의 토출구 배관에 연결하고 레이저의 회절각도는 Fig. 3의 두 레이저 부품 간에 회절각도를 Table. 1의 표와 같이 50°, 90°, 135°의 3개의 각도로 각각 회절 시켜서 발생된 미세기포 입자크기에 대한 반응 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6a는 135°에서 초기 바탕선의 회절세기가 45.9counts로 시작하여 1분 30초에서 49counts로 첫 회절세기가 측정되었고 4분후에는 in-line 튜브의 순환수와 버블이 밀려나면서 오히려 바탕선 세기가 44counts로 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 80분 이후부터는 58counts로 큰 회절세기가 측정되었다.

1분 뒤에는 다시 61.9counts로 가장 큰 회절세기가 측정되었는데 이때부터는 발생된 마이크로버블의 특징을 보면 규칙적이지 않으면서 한번 배출될 때 짧은 시간동안에 많은 마이크로버블들이 배출되는 특성을 보이고 있다.

Fig. 6b에서는 90°에서의 회절각에 의한 회절세기를 나타내고 있는데 초기에 세기는 20counts가 되었다가 3분 이후에는 19counts로 바탕선의 세기가 감소되어 나타났다. 60분에서는 20counts의 회절세기를 가진 버블이 지나갔지만 아주 작은 회절세기를 가지기 때문에 90°에서의 회절세기가 130°에서의 회절세기에 비해서 많이 감소되어 나타나는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 6c는 50°의 회절각도에 대한 반응으로 135°와 90°에 비해서 낮은 바탕선 세기로 시작하여 43분 시점에서 가장 큰 회절세기가 나타나긴 하나 3가지의 회절각도 중에서는 가장 적은 회절세기의 반응을 보이고 있다.

따라서 본 실험에서 레이저 회절장치에 의한 마이크로버블의 반응각도는 135°일 때가 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 가장 큰 회절세기의 반응각도를 나타내었다.

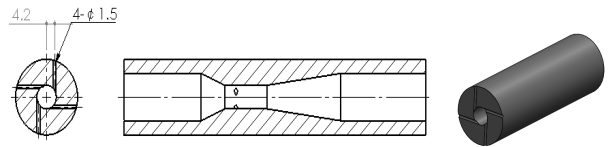
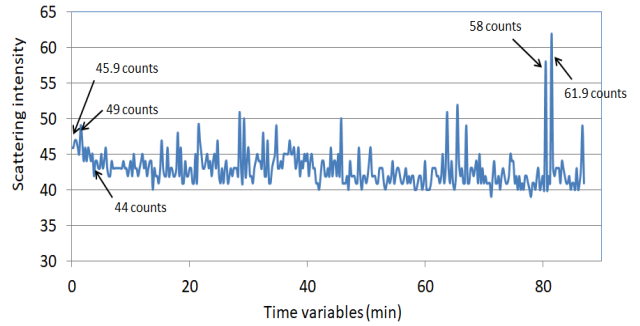
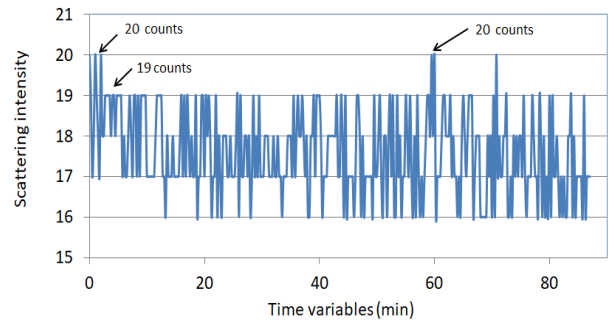


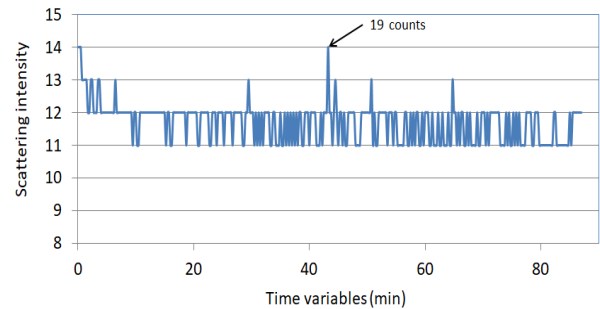
Fig. 5 Tangential type with four orifice tubes



a) Scattering intensity on time-independent at 135°



b) Scattering intensity on time-independent at 90°



c) Scattering intensity on time-independent at 50°

Fig. 6 Scattering intensity on three diffraction angles

3.2 오리피스 공기관의 유형별 기포발생 특성

오리피스 공기관의 조건이 미세기포 발생에 대한 영향이 고려되기 때문에 오리피스 공기 유입구의 형태를 Tangential Type One Orifice와 Vertical Type One Orifice Venturi 유형으로 하였으며 레이저의 회절각도는 이미 135°가 마이크로버블에 대한 최적반응을 보이기 있으므로 레이저 회절장치를 135°로 설정하여 실험하였다.

4. 결론

Fig. 7a는 Tangential Type One Orifice Venturi에서 발생된 미세 기포의 반응을 확인한 결과 최초회절세기는 70counts, 2분 30초에서 80counts, 6분에서 부터는 83.9counts로 두 번째 마이크로버블이 확인된다. 7분에서부터는 in-line 튜브에 존재하고 있던 버블들이 밀려 나가면서 바탕선의 세기가 60counts로 감소되다가 30분 30초에서는 137counts로 마이크로 버블이 최대의 높이를 보였다.

Fig. 7b의 Vertical Type One Orifice Venturi에서의 기포발생 특성은 최초 회절세기가 64counts로 시작하여 2분 이후부터는 55counts로 감소하면서 Tangential Type One Orifice Venturi와 비슷하게 in-line 튜브에 존재하고 있던 버블들이 밀려나가면서 바탕선 세기가 감소되는 것으로 나타났지만 점점 상승되면서 6분 이후부터는 75counts로 나타난다. 이것은 버블이 통과하는 in-line 튜브에 또다시 순환수와 버블이 흡착되는 현상이 발생하고 있는 것으로서 이후부터는 다시 바탕선의 세기가 지속적으로 유희하고 있다. 시간이 흐르면서 32분이 되는 시점에서는 90counts로 최대 회절 세기가 측정되어 나타난다. 두 가지 오리피스 유형을 비교한 결과 Tangential Type에 비해서 Vertical Type이 흡착된 버블이 밀려나가지 못하는 현상이 지속적으로 발생하게 됨으로서 Tangential Type에 비해서 유속이 떨어지면서 버블 발생유형이 달라지는 차이를 보였다.

공동화형 벤츠투관에 한 개의 수직한 오리피스 공기 유입구를 Vertical Type과 Tangential Type의 두 가지 유형으로 각각 미세기포를 발생시켜 마이크로버블이 생성되는 특성과 마이크로버블에 해당되는 미세 기포발생에 대한 영향을 고려한 실험결과, 135°의 회절각도가 마이크로버블에 대한 최적반응을 나타내었다.

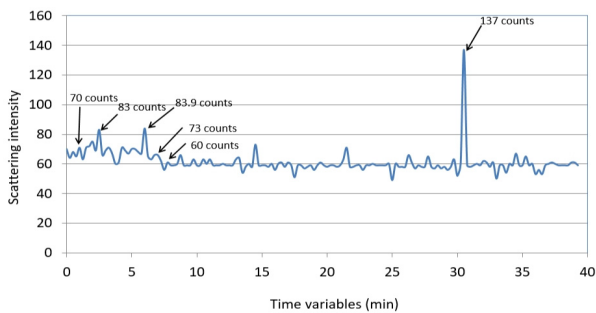
두 가지 유형의 벤츠투관에서 생성되는 마이크로버블의 생성결과를 확인한 결과는 레이저 회절신호 세기가 Vertical Type보다는 Tangential Type이 크게 나타난 것을 확인할 수 있는데 이는 마이크로버블이 보다 더 많이 형성되고 있는 상태임을 알 수 있다. 이것은 수류에 공기가 유입되어 수류와 일정한 회전각을 이루며 회전방향으로 빠르게 물과 부딪쳐서 와류 유동을 이용한 이상류 스위블 현상으로 작용되고 있다. 따라서 공동화형 벤츠투관의 공기 유입구의 형태를 Tangential Type으로 적용하는 것이 마이크로버블 생성에는 더 효과적임을 확인하였다.

또한 생성된 마이크로버블의 입자를 연속으로 실시간 데이터를 수집할 수 있게 되어 유속에 따른 마이크로버블의 생성 변화를 확인하는 시스템에서의 적용 가능성을 확인할 수 있었으며, 향후에는 이러한 데이터를 기반으로 추가적인 오리피스 공기 유입구를 증가시키면서 미세기포의 발생특성을 추가적으로 확인 하고자 한다.

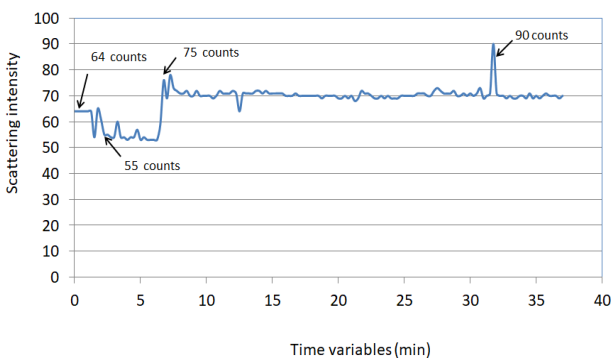
본 연구결과를 통해서 선회류 저압형 미세기포 확산장치 시스템에의 적용으로 마이크로버블의 생성효율을 높이고 레이저 회절측정 시스템을 적용할 수 있게 되었다.

References

- 1) T. Zabel, "The Advantages of Dissolved-air Flotation for Water Treatment", Journal-American Water Works Association, Vol.77, No.5, pp.42-46, 1985.
- 2) J. P. Malley and J. K. Edzwald, "Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters", Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, Vol.40, No.1, pp.7-17, 1991.
- 3) A. Fujiwara, "Technique microbubble generation using a venturi tube", Eco Industry, Vol.22, pp.27-30. 2006.



a) Tangential type with one orifice



b) Vertical type with one orifice

Fig. 7 Comparison of two Orifice

- 4) H. Ohnari, T. Saga, K. Watanabe and K. Maeda, "High Functional Characteristics of Micro-bubbles and Water Purification", Resources Processing, Vol.46, No.4, pp.238-244. 1999.
- 5) J. Rubo, M. L. Souza and R. W. Smith, "Overview of flotation as a wastewater treatment technique", Minerals Engineering, Vol.15, No.3, pp.139-155, 2002.
- 6) R. Okamoto, T. Takeda and H. Shakutsui, "Performance of micro-bubble generators", Japanese Society for Multiphase Flow Annual Meeting, Tokyo, Japan, August, 2005.
- 7) G. H. Jung, "Improvement of Steady State Response Using PI+Double Integral Controller", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.3, pp.24-31, 2016.
- 8) S. R. Choi, I. Y. Lee and B. J. Han, "A Study on a Novel Flow Control Valve for Wind Power Heat Generation Hydraulic Systems", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.1, pp.23-28, 2017.
- 9) F. M. Kahnert, "Numerical methods in electromagnetic scattering theory", Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol.79-80, pp.775-824. 2003.
- 10) C. F. Bohren and D. R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 1998.
- 11) S. D. Kim, J. E. Lee and D. Y. Shin, "A Study on the Phase Bandwidth Frequency of a Directional Control Valve Based on the Hydraulic Line Pressure", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.1-10, 2018.