

버블의 크기별 입도분포와 부상시간과의 상관특성에 관한 연구

A Study on the Relation Characteristics between Bubble Size Distribution and Floating Time

전 건 · 박철휘*

Gun Jeon · Chul-Hwi Park*

서울시립대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received February 13, 2017; Revised April 5, 2017; Accepted April 11, 2017)

Abstract : Lately rainfall characteristics that it rains a lot in a short space of time often occurs. Because of this meteorological phenomena, the flow rate and concentration of initial rainfall for runoff and combined sewer overflows are changed. In the case of this inlet fluctuation, the flotation method at high surface loading rate is suitable for water quality management. the flotation method is able to meet the removal rate requirements of water public zone in 5 to 10 min which is irelatively short period. For assessment and diagonision of flotation method, A/S ratio is applied until now. But unfortunately, this has some limits for evaluation standard for certification and assessment of technical diagnosis and operation. This is why there is different efficiency in the bubble distribution at the same A/S ratio. The velocity and time of floating is changed by the different bubble distributions. The floating time affects the plant volume because the time factor make size dicision. Therefore the charateristics of bubble distribution and floating time at the same A/S ratio is necessary to apply to evaluation standard for certification and assessment of technical diagnosis and operation. For generalization of the method in certification and assessment, the characteristics of bubble distribution was studied. Until recently, using the optical device and shooting live video, there are some analysis technology of the floating factors. But this kind of technology is influenced by the equipment. with this level of confidence about the results, it is difficult to apply to generalize. According this reasons, this study should be applied on experiment generalization of method about measurement of relation between bubble distribution and floating time.

Key Words : Microbubble, Wastewater Treatment, Floating Method

요약 : 최근 강우는 짧은 시간에 많은 비가 오는 특성을 자주 나타낸다. 이런 기상현상 때문에, 초기유출수와 합류식하수관거 월류수의 유입유량과 농도도 변화되고 있다. 이와 같이 유입조건이 변동되는 경우에는, 높은 수면적부하율을 가지는 부상방법이 공공수역의 수질관리에 적합하다. 왜냐하면 부상법은 공공수계의 요구조건을 충족 할 수 있기 때문이다. 현재까지 이러한 부상법의 검증과 진단을 위하여, 공급공기량과 유입SS량의 비율을 반영하여 왔다. 그러나 불행하게도 이러한 방식은 기술진단과 검증을 위한 판단기준으로는 그 한계를 가진다. 왜냐하면 부상속도와 시간요소가 상이한 버블분포에 의해 달라지기 때문이다. 부상속도와 시간은 처리시설의 용량에 영향을 준다. 왜냐하면 시간인자가 시설의 규모를 결정하기 때문이다. 그러므로, 동일한 공급공기량과 유입SS농도간 비율조건에서의 버블분포특성과 부상시간특성을 운영 및 기술진단 및 평가를 위한 판단기준으로 적용하여야만 한다. 따라서 이러한 필요에 따라, 이 논문 내용은 버블분포와 부상시간간 관계의 분석에 대한 실증적 일반화에 관한 연구이다.

주제어 : 마이크로버블, 폐수처리, 부상방식

1. 서론

공공수역(water public zone)의 수질오염을 저감하기 위한 관거 및 처리장은 1980년 이후 지속적으로 증가되어 왔으며, 하수도 보급률은 전국적으로 약 90%가 넘게 나타난다. 하지만 이러한 하폐수와 별도로 강우시에만 배출되는 초기 유출수(initial rainfall for runoff)와 합류식 하수관거 월류수(combined sewer overflows)에 의한 수질오염이 공공수계의 수질관리에 주요인이 되고 있다. 이에 따라 수질관리를 위한 다양한 기술들이 도입되었다.¹⁾ 또한 이러한 오염물질에

는 다양한 크기의 오염SS의 입자가 존재한다. 일반적인 오염SS 입자분포는 대략 10 - 300 μm 범위이며 이중 100 - 200 μm 이내에 가장 많은 입자가 분포하고 있다.²⁾

강우 특성 상 초기 강우시 피크 치는 5분 범위에 도래하기도 하며, 이 짧은 시간에 유역이 수용 가능한 요구제거율 만큼 효과적으로 제거할 수 있는 방법이 필요하다.³⁾ 그리고 침전, 여과, 부상공정 등의 적용이 가능하다. 그중 부상공정이 가장 적합하다. 그 이유는 반응을 위한 처리시간을 5분으로 단축할 수 있기 때문이다. 버블을 이용한 부상법은 대상 수계 내의 오염물질을 순간적으로 버블과의 결합을 통해 물

* Corresponding author E-mail: chpark@uos.ac.kr Tel: 02-6490-2863 Fax: 02-6490-5476

표면으로 부상시키기 때문에 타 분리 기술에 비해 HRT가 월등히 짧다. 또한 버블 부상공정은 버블에 의한 오염SS물질의 분리가 간단하여 상등수의 스킴층만 모아서 제거하기 때문에 적용이 용이하다.

그러므로, 기존에 설치되어 운영 및 관리되고 있는 부상 시설들의 기술진단 및 성능인증평가 인자를 도출하여 그 결과로 시설의 개선방안을 수립하는 것과 기존시설의 성능을 최대화 하여 비용과 에너지를 절감할 필요가 커지고 있다. 또한 기술진단 및 운영관리를 위한 항목들 중에 부상법의 인자도출이 함께 요구되고 있다.

따라서 여러 요인들 중 특히 부상공정의 해석에 필요한 인자를 도출하고 각각 그 항목을 설정할 필요가 있다. 본 연구에서는 강우시에만 배출되는 초기유출수와 합류식 하수관거 월류수를 적정처리하기 위하여 부상시설의 운영이 필요할 경우, 그런 경우에만 한하여 처리시설이 가동되는 부상법에 대하여, 필요시에만 직접 가압하는 형태인 적정압(30~50 Psi) 조건의 부상조를 Design 하기 위해 고려되어야 하는 제반 인자들 특히 부상속도, 버블군체류시간, Air/Solid ratio, 특정 버블입경의 분포등의 특성을 동일조건에서 도출하였다.⁴⁾

이 연구에서는 일정한 Air/Solid비 상태 내에 다양한 부상속도와 부상시간이 존재하며 그 원인이 버블입경별 입도분포에 기인함을 연구하고 그 과정을 객관화 하기 위하여, Air Stone과 Nozzle을 이용하여 버블을 생성하였다. 각 버블의 입경차이를 유도하기 위하여 Air Stone의 경우 고온에서(약 1200~1300°) 생성된 세라믹구조에 Corundum Green Carbon 재질의 장치로 구성하였고, Nozzle의 경우 내외경의 비율을 Nozzle별 제작사 추천 고유비인 1 : (1/1.5), 1 : (1/2), 1 : (1/2.5)이 되도록 하여, 발생하는 버블의 입도분포가 다르게 되도록 유도하였다.⁵⁾

그리고 각각을 Air/Solid (0.08 - 0.10)의 조건에 충족하도록 실험조건을 구성하였다. 지금까지의 다른 연구에서는 각각의 실험결과로부터 동일한 Air/Solid ratio의 조건하에서 매우 다른 부상속도와 버블군체류시간이 존재함을 객관적으로 확인하기 위한 버블입경분포의 측정을 광학에 의하거나⁶⁾ 동영상 해석을 통하는 등⁷⁾ 다양한 방법을 시도하여 왔다. 그러나 본 연구에서는 레이저계수기를 통하여 mL당 버블의 갯수를 버블입경별로 직접측정하여 기존의 연구방식인 광학 또는 동영상 분석장비를 통한 측정법이 사용장비별 특성과 기능에 따라 측정결과에 영향이 있는 단점을 보완하였다.

본 연구의 결과를 토대로 지금까지 부상법의 주인자로 사용되던 Air/Solid ratio 뿐만 아니라 주요버블입경과 입도분포 그리고 부상속도와 버블체류시간의 객관적 결과를 제시할 수 있도록 하였다. 이러한 분석방법의 연구에 의해 얻어진 결과는, 환경기초시설의 설계와 기술진단 및 운영관리 평가인자중 일반적 판단기준의 기초자료로 활용하여 객관적 판단의 한 요소로 적용 가능하다.

2. 재료 및 방법

2.1. 순간레이저 계수기

본 연구에 사용된 순간레이저 계수기는 부상튜브를 통해 부상중인 버블을 mL단위로 채수하여 단위 mL당 버블의 갯수를 각각 5 - 40 μm, 41 - 60 μm, 61 - 100 μm, 101 - 200 μm, 201 - 300 μm, 301 - 400 μm 범위로 각각 검출하여 이를 signal로 표시되도록 하였다. 이때 사용한 순간레이저 계수기는 Chemtrak PCxx 버전이었으며 상기한 입경범위를 표준으로 각각 실시간으로 검출이 가능하였다. 실험장치의 크기 및 구조와 각 부위의 기능은 다음과 같다.

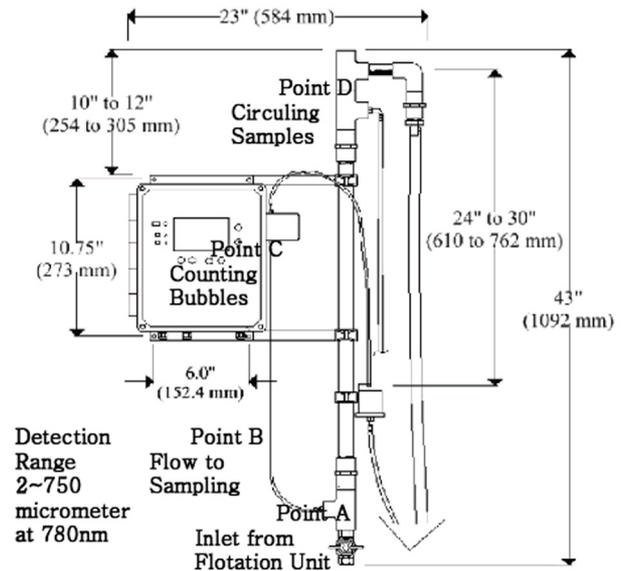


Fig. 1. The conceptual diagram of bubble counter.

본 연구에서는 A를 통해 유입된 다양한 입경의 버블을 B관을 통해 C지점으로 이동시키고 이때 Chemtrak PCxx기기를 이용하여 버블의 입경범위별 갯수를 검출하고 검출된 결과를 부피로 환산하여, 주입된 공기량과 검출된 부피량을 토대로 버블의 양을 비교 하였다. 검출을 마친 뒤 A에서 C를 통해 이동한 뒤 D지점을 통해 유출된 배관과 연결하여 순환되도록 하였다.

순간레이저 계수기의 제원은 다음과 같다.

- Laser Type : Solid-state laser diode (780 nm)
- Cell Material: Nituff coated aluminum
- Detection Range: 2 - 750 microns
- Sample Temperature: 32° - 120° F (0° - 50° C)
- Serial Communications: 2 wire RS485 (Network) and RS232
- Communication Protocols: Standard: MODBUS RTU (RS485)
- Operating Temperature: 32° - 120° F (0° - 50° C)
- Dimensions: 12" W × 11.5" H × 5.25" D
- Weight: 7 lbs (3.2 kg)

2.2. 부상튜브

Lab Scale Floating Reactor는 원통형의 아크릴 구조로서, 2.50 m (height) 0.40 m (diameter) 0.126 m (area) 314.0 m (Volume)이다.

원통 하부에 Nozzle 및 AirStone을 교대로 설치하여 버블을 발생시켰으며, Batch형태로 실험을 실시하였다.

Air supply rate은 5 L/min이며 압력은 30~50 Psi이다. 14 W, 600 L/hr 1.4 Aqua의 용량을 가지는 수중펌프를 사용하여 부상튜브내의 물을 순환시키면서 토출구에 연결된 튜브를 통해 반응조 외부로부터 유입되는 공기를 이용하여 버블을 발생시켰으며, 발생된 버블은 부상튜브 하부에서부터 상부로 이동하면서 상향류 흐름을 보이도록 하였다. 이때 각 반응시간에 따른 부상시간과 버블의 입경별 분포를 확인하기 위하여 일정한 경향에 이르는 때까지 샘플링을 반복 실시하였다. 본 실험의 결과로 버블군집의 체류시간과 부상속도를 측정 할 수 있도록 하였으며, 그 결과와 순간레이저계수기를 통해 얻어진 주요버블군의 입도분포와의 관계를 함께 비교할 수 있도록 하였다.

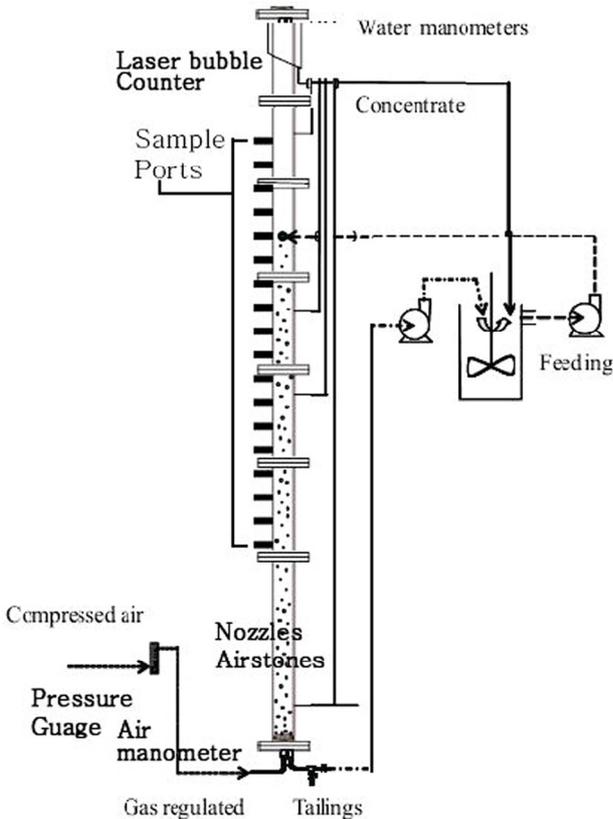


Fig. 2. Conceptual diagram of Flotation Unit.

2.3. Nozzle과 Airstone

Flotation Method의 진단 및 평가를 위한 여러 요소중 하나가 버블의 분포군 형성의 형태이다. 이러한 분포군들의 특성을 통하여 Nozzle과 AirStone을 분석한다. 이때 이용된 Nozzle은 Table 1과 같다.

Table 1. The specifications of nozzles

Air flow rate	2.5 - 5 L/min
Pressure	30 - 45.3 Psi
Fine bubble size	between 20 to 200 microns
Ratio of diameter	N1=1:1/2.5, N2=1:1/2, N3= 1:1/1.5

Table 2. The specifications of airstones

Air Flow rate	1.5 - 10 L/min
Pressure	22 - 36.7 Psi
Fine bubble size	between 100 to 400 microns
options	Stone ceramic products made with special material at high temperature 1,300 degree's centigrade, with some condition the effect of white corundum and green carbon

Nozzle은 각 각을 제작과정에서 Test하였으며 이때 가능한 주요 버블군이 작은입경측 편이, 중간 입경측 편이, 큰 입경측 편이가 생기도록 유도하였다.⁸⁾ AirStone의 경우 규격품별 재질의 차이를 두어 버블입경의 편차도가 생기도록 하였으며 특성은 Table 2와 같다.

2.4. 부상시간과 부상속도

부상시간과 부상속도는 버블이 순간레이저계수기를 통해 검출된 주요입경별 분포인 25 μm 50 μm 80 μm 150 μm 250 μm 350 μm 구간을 토대로 스톱워치를 사용하여 유선에 방해가 없도록 전체 2.5 m 수심구간중에 1.5 m 수심구간의 값만을 적용하였다. 이렇게 얻어진 부상시간에 각각 적용수심을 반영하여 부상속도를 산출하였다. 이때 측정된 값들은 Nozzle의 경우 제작사 고유구경비 기준 1: (1/1.5) 1: (1/2) 1: (1/2.5) 각각의 경우를 분석하고 AirStone의 경우 제품별로 규격을 육안으로 판단하여 대, 중, 소로 각각 구분하여 부상시간을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Nozzle의 버블분포 특성

버블발생장치를 통해 생성된 버블군의 분포특성을 파악하기 위하여 Lab Scale Floating Reactor로 실험하였다. 이때 순수한 물에서 Nozzle 구경비율과 버블분포는 Table 3과 같다.

Table 3. The bubble distribution of Nozzles

Item	Nozzle N1	Nozzle N2	Nozzle N3
10 ~ 40 μm	1,471	1,031	287
40 ~ 60 μm	7,784	3,654	1,413
60 ~ 100 μm	8,674	7,845	2,256
100 ~ 200 μm	5,534	3,673	4,378
200 ~ 300 μm	312	650	701
300 ~ 400 μm	17	65	87

Table 4. The bubble distribution of Airstones

Item	S1	S2	S3
10 ~ 40 μm	23	17	14
40 ~ 60 μm	65	32	37
60 ~ 100 μm	127	150	105
100 ~ 200 μm	889	660	650
200 ~ 300 μm	1,045	879	687
300 ~ 400 μm	354	453	523

Table 5. The standard deviation of Nozzles

Item	Nozzle N1	Nozzle N2	Nozzle N3
Standard deviation	385	290	161

버블이 N1에 의해 생성되면 주로 50, 80 μm 범위가 주로 발생하였으며, N2에 의해 생성되면 80 μm 전후에서 주로 나타났으며 N3의 경우 80, 150 μm 으로 검출되었다. 이에 대한 분포특성인자인 N1의 편차도가 가장 높았다. 그리고 N3의 편차도가 가장 낮았으며 N2는 그 중간 정도를 나타내었다.

3.2. Airstone의 버블분포 특성

Lab Scale Floating Reactor에서 AirStone 크기별, 버블분

Table 6 The standard deviation of Airstones

Item	S1	S2	S3
Standard deviation	444	357	317

포별 생성특성을 확인하기 위하여 일정한 압력으로 공기를 공급하는 Air Supply Device로 분석하였다. 상기한 실험결과에 따른 버블의 분포를 살펴보면, S1의 경우 100~300 μm 범위의 분포가 높게 나타났으며, S2의 경우 100~400 μm 범위가 상대적으로 AirStone S1에 비하여 많이 나타났으며, S3의 경우 100~400 μm 에서 버블 생성분포의 집중도가 높았다.

버블분포에 대한 분산도를 확인하기 위해 편차도를 산출하였다. 그 결과 S1의 편차도가 약간 높았다. 그리고 S2, 3의 편차도가 유사하였다.

3.3. Nozzle과 Airstone의 버블특성과 부상시간

버블을 발생시키는 장치의 차이가 부상시간과 부상속도에 영향이 있는지를 확인하기 위하여 Nozzle N1, N2, N3를 측정된 결과, 중심입경이 작을수록 그리고 작은중심 입경의 입도분포가 높을수록 부상시간이 늦어지는 결과를 얻었다.

그러나 AirStone S1, S2, S3의 경우는 특이한 차이가 없이 대체로 고르게 나타나는 결과를 얻었다. 이는 전 구간에서 일정하게 버블이 생성되기 때문이다.

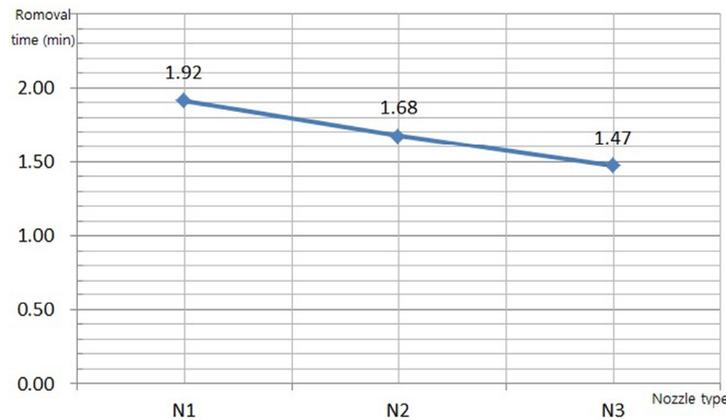


Fig. 3. Retention time of nozzle.

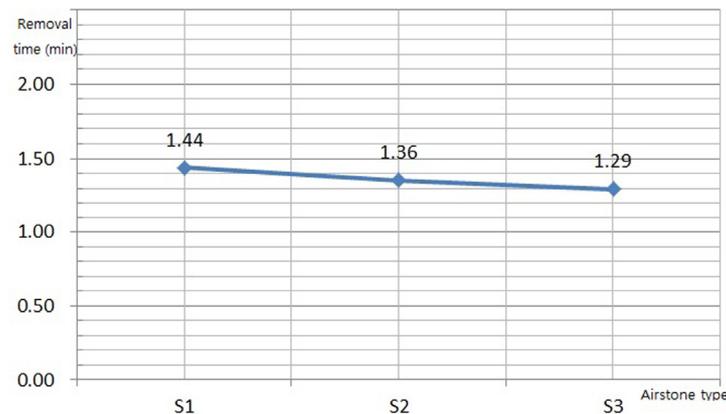


Fig. 4. Retention time of airstone.

Table 7. Air/Solid ratio

Item	Air/Solid ratio
Nozzle - N1	0.08
Nozzle - N2	0.08
Nozzle - N3	0.09
Airstone - S1	0.10
Airstone - S2	0.10
Airstone - S3	0.10

3.4. Air/Solid ratio의 객관화

실험장치의 Air/Solid ratio산정에 필요한 공기공급량은 Air Supply Device의 제원(50 Psi가 넘어서면 가동이 중지됨)에 따라 30~50 Psi 압력조건에서 5~10 L/min이었다. 그리고 입경분포를 통해 측정된 Air/Solid ratio의 결과는 공기량이 대체로 5 L/min에 근접한 값을 나타내었다. 이는 공급공기량을 증가시키고, 공급압력을 높게하여도 실제 버블생성장치를 통해 버블로 전달되는 공기량은 일정한 범위 내에 있음을 나타낸다.

4. 결론

본 연구를 통하여 버블의 주요 입경별 입도분포의 측정 방법을 객관화 하고 그 분석결과에 근거하여 버블체류시간 및 부상속도를 확인할 수 있었으며 고찰과 구분되는 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 강우시에만 배출되는 초기유출수와 합류식 하수관거 월류수를 적정처리하기 위하여 운영이 필요할 경우에 그런 경우에만 한하여 시설이 가동되는 경우 즉, 필요시에만 직접 가압하는 형태인 적정압(30~50 Psi) 조건의 부상조를 기술진단하기 위한 부상장치의 버블군입도분포 특성은 순간 레이저 계수방식에 의해 확인이 가능하였다.

2) 버블의 특성을 분석한 결과, Nozzle에 의해 작은입경(50 μm)의 버블이 주로 생성되는 경우에는 입경분포가 좌측으로 편이 되고, 그 반대인 경우 우측으로 편이 한다. 그러나, AirStone의 경우엔 Nozzle과 달리 이러한 경향이 없다. 이는 넓은 범위의 입경분포에서 버블이 생성되기 때문에 기인한다.

3) 버블군입경이 작을수록 부상에 소요되는 시간이 길게 나타난다. Nozzle의 경우가 Airstone보다 생성된 버블군입경이 적은데, Nozzle의 경우 1.47~1.92 min범위였다. 또한 AirStone의 경우 약 1.29~1.44 min 이었다. 이는 생성된 버블의 중심입경이 큰 쪽으로 이동하면서 부상시간이 함께 짧아지기 때문이다. 즉 버블의 입경분포와 부상시간은 같은 경향을 나타낸다.

4) 공기량이 일정하게 공급되는 상태에서 동일 압력이 가해지는 버블장치는 물의 표면장력에 의해 버블을 생성하는 한계저항에 이르며 이때의 공기량은 대체로 5 L/min에 근접하였다. 이는 Air/Solid ratio가 Nozzle의 경우 0.08~0.09이며, AirStone은 0.10이었다. 따라서 압력을 높게 하고 공기량을 증가하여도 생성되는 버블군은 일정하게 유지됨을 나타낸다.

5) 본 연구결과, 기존에 설치되어 운영 및 관리되고 있는 부상시설의 기술진단 및 평가 항목 중에 버블군의 중심입경과 그리고 버블 발생장치와의 관계 및 Air/Solid ratio를 입경별 분포 및 부상시간의 특징과 관련하여 분석하는 방법이 타 논문에 제시되어왔던 광학 또는 동영상에 의한 방법에 비하여 측정방법 및 사용장치에 의한 영향이 적었다.

6) 환경기초시설의 개선방안을 수립하는 경우 또는 기존 시설의 성능을 최대화 하여 시설규모를 감소하고 동력비를 절감하며 이를 토대로 건설 및 운영비를 최소화 하는 경우 본 연구방법이 판단인자의 객관화 방안들 중 하나가 될 수 있음을 확인하였다.

KSEE

References

- Rubio, J., "Overview of flotation as a wastewater treatment technique," *Miner. Eng.*, **15**, 139~155(2002).
- Lee, H. Y., "Hydrodynamic collision efficiency and flotation characteristics of inorganic particles in daf process," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **16**(6), 655~662(2002).
- Lee, K. Y., "Study on the determination of optimum size of storage tank and intercepting capacity for csos reduction in urban area," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **26**(6), 735~745(2012).
- Féris, L. A., Gallina, C. W., Rodrigues, R. T. and Rubio, J., "Optimizing dissolved air flotation design and saturation," *Water Sci. and Technol.*, **43**(8), 145~157(2002).
- Ponasse, M., "Bubble formation by water release in nozzle. Influence of various parameters on bubble size," *Water Res.*, **32**(8), 2498~2506(1998).
- Lau, Y. M., Sujatha, K., Thiruvalluvan, G. M., Deen, N. G. and Kuipers, J. A. M., "Experimental study of the bubble size distribution in a pseudo-2d bubble column," *Chem. Eng. Sci.*, **98**, 203~211(2013).
- Mehrshad, N. and Massinaei, M., "New image-processing algorithm for measurement of bubble size distribution from flotation froth images," *Minerals & metallurgical processing aug.*, p.146(2011).
- Okumura K., Harris R. and Sano M., "Bubble formation from nonwetted slot nozzles," *Canadian Metal. Quart.*, **37**(1), 49~56(1998).