

전해부상에서 전압과 극판 재질에 따른 미세기포의 크기 특성

Size Characteristics of Micro-bubbles According to Applied Voltage and Electrode materials

박용효 · 한무영*

Park, Yong-hyo · Han, Moo-young*

서울대학교 지구환경시스템공학부

(2002년 7월 3일 접수, 2002년 12월 3일 최종수정논문 채택)

Abstract

Electro-flotation (EF) has shown advantages, such as a high removal efficiency and easy control of bubble generation, over dissolved air flotation. However, the fundamental characteristics of the process have not been investigated in detail. According to recent modeling results from trajectory analysis, the size of the bubble is one of the most important factors that affect the efficiency of collision between bubble and particle.

In this paper, the size characteristics of bubbles generated from EF under various conditions are measured using a new method for bubble size measurement, the Particle Counter Method (PCM). The size of the generated bubbles was found to be constant with respect to applied voltage but to vary with the electrode materials. These results and their implications are discussed.

Key words: Bubble size; electro-flotation; trajectory analysis; PCM

주제어: 기포크기, 전해부상, 궤적분석, PCM

1. 서론

부상 공정은 미세기포를 이용하여 수중의 입자를 부상시켜 제거하는 공정으로써 기존의 침전공정에 대한 대체 수단으로서 각광받고 있다. 특히 이 공정은 조류나 알렘플록과 같이 침전이 잘 되지 않는 비교적 가벼운 입자를 효과적으로 제거할 수 있고, 부지면적이 적게 소요되는 장점을 가지고 있다.

이러한 부상공정의 대표적인 것은 용존공기부상법(Dissolved air flotation; DAF)으로 현재 북유럽을 중심으로 많이 사용되고 있고 국내에서도 현재 강원도 원주권 (20만 톤/일)과 전남 남부권(20만 톤/일) 광역상수도에 DAF공정을 설계 및 시공 중에 있다.

용존공기부상법과 함께 최근 관심을 얻고있는 공정은 전해부상법(Electro-flotation; EF)으로써 이는

*Corresponding author Tel.: +82-2-680-8915, Fax: +82-2-675-1642, E-mail: myhan@gong.snu.ac.kr (Han, M.Y.)

물을 전기 분해할 때 발생하는 미세기포를 이용하는 것이다. 용존공기부상법과 비교하여 전해부상법은 작은 기포를 발생시킬 수 있고(AWWA, 1999; Burns *et al.*, 1997), 기포의 전위특성을 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Kim *et al.*, 2000). 하지만, 기포의 크기의 경우 DAF에서와 같이 여러 운전인자에 영향을 받을 것으로 판단되나 현재까지 전해부상에서 기포의 크기에 대한 연구는 미비한 실정이다.

또한, 최근에 수행된 기포와 입자의 궤적분석을 통한 입자·기포 충돌 모델에 의하면 부상공정의 제거 효율은 입자와 기포 각각의 크기와 전위에 가장 큰 영향을 받는다(Han, 2001; Han *et al.*, 2001a). 입자의 크기나 전위는 일반 수처리 공정에서 많이 측정하여 왔고 기포의 전위 측정에 대해서는 새로운 시도가 이루어지고 있다. 하지만, 기포의 크기 또한 측정상의 어려움 때문에 이에 대한 연구가 미비한 실정이며, 본 논문 또한 기포의 크기 측정에 한정된다.

기포의 크기를 측정하는데는 화상분석을 통하여 측정하는 것이 일반적이다. 그러나 화상분석은 샘플링 및 측정과정이 간단하지 않고 시간이 오래 걸린다는 큰 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근 파티클카운터를 이용한 기포 크기 측정방법(Particle Counter Method; PCM)이 개발되어(Han *et al.*, 2001b; Han *et al.*, 2001c) 그 타당성을 증명하고 DAF에서 기포의 크기 특성을 보고한 바 있다(Han *et al.*, 2002a; Han *et al.*, 2002b). 따라서 본 연구의 목적은 전해부상법에서 PCM의 타당성 및 적용성을 검토하고 발생조건(전압 및 극판의 종류)에 따른 기포의 크기특성 변화를 파악하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 미세기포 측정방법

2.1.1. 화상분석

기포의 크기측정은 일반적으로 화상분석을 통해 직접 그 크기를 측정용 해 왔으며, 본 연구에 사용된 화상분석장치 및 측정셀의 상세도는 Fig. 1과 같다. 사용된 화상분석장치는 측정셀, 현미경, CCD 카메라 등으로 구성되어 있고, 현미경으로 관찰된 기포를 촬영한 후 컴퓨터 이미지 프로세스 소프트웨어를 사용하여 동일한 해상도(Resolution)에서 미리 촬영한 마이크로미터와 비교하여 그 크기를 측정한다. 샘플링에서의 오차를 최소화하기 위해 기포는 측정셀 내부에서 발생시켰으며, 음극판의 위에 현미경 초점을 맞추어 발생하는 수소기포를 촬영하였다.

이 방법은 기포 하나 하나를 직접 화상으로 측정함으로써 각각의 크기 측정치에 대한 정확도가 매우 높다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 이 방법은 측정장치 및 방법이 간단치 않고, 무엇보다도 시간이 오래 걸린다는 문제점을 가지고 있다. 즉, 신뢰도 높은 데이터를 얻기 위해서 충분히 많은 개수의 기포의 크기를 측정하는데는 상당한 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있다. 예를 들어, 2,000여 개의 기포를 측정하는데 화상분석은 약 3,000분이 소요되며, 이에 따라 기포크기 측정을 위한 새로운 방법의 고안이 필요하게 되었다.

2.1.2. Particle counter method(PCM)

화상분석의 문제점을 보완하기 위해 파티클카운

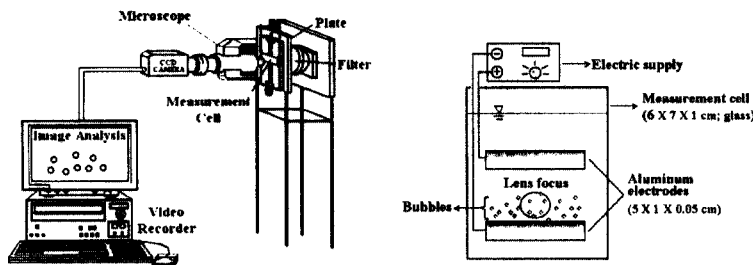


Fig. 1. Schematic of image analysis system and details of the measurement cell.

터를 이용한 미세기포의 크기측정방법을 고안하였다(Particle counter method; PCM). 이 방법은 기포를 입자와 같이 간주하여 입자대신 기포를 샘플링하여 측정하는 방법으로써 본 연구에서 사용된 측정 시스템의 개략도 및 센서부의 상세도는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 특히 두 대의 동일한 파티클카운터를 사용하였는데 이는 측정 채널 수를 증가시켜 측정 range를 감소시킴으로써 측정값에 대한 정밀도를 높이기 위해서이다.

이 방법에서는 화상분석과 달리 양극에서 발생되는 입자성 알루미늄 수산화화합물과 기포를 구분할 수가 없다. 따라서, PCM을 사용하여 기포의 크기를 측정하는 경우 양극판은 GF/C 필터(pore size: 0.45 μ m)로 감싼 후 기포를 발생시켰다. 이를 통해 입자의 샘플링을 최소화 할 수 있었으며, 용액 내 입자에 의한 간섭은 기포발생 전-후 입자의 분포를 측정함으로써 입자에 의한 기포의 크기분포에 대한 오차의 발생여부를 감시할 수 있었다. 하지만, 10 μ m 이하의 경우에 대해서는 이 범위에 존재하는 입자와 기포가 구분되지 않기 때문에 모두 입자로 간주하였으며, 기포의 크기분포에서 제외하였다.

이 방법은 화상분석과 비교하여 조작이 간단하고

짧은 시간에 측정이 가능하다는 장점이 있으나 기포 각각의 크기에 대한 정밀도는 상대적으로 떨어진다. 하지만, 측정시간을 감소시킴으로써 많은 개수의 기포를 측정할 수 있고, 그 만큼 전체 크기분포에 대한 신뢰도는 높다는 장점을 가지고 있다. 따라서 운전조건에 따른 기포크기의 경향을 파악하는데 편리하다. 또한, 타 논문(Han *et al.*, 2001b; Han *et al.*, 2001c)을 통해 화상분석과 PCM의 장단점이 자세히 비교되어 있다.

2.2. 미세기포 발생조건

본 연구에서 사용된 PCM을 이용한 기포크기 측정방법은 기포와 입자를 모두 측정하여 수치로 나타내기 때문에 수중에 입자가 많이 존재할 경우 그만큼 기포의 크기분포에 대한 신뢰도가 떨어진다. 따라서, 용액은 2차 증류수와 같이 입자가 거의 없는 용액을 사용하는 것이 바람직하지만, 증류수만을 사용하는 경우 물의 전기분해가 일어나지 않아 기포가 발생되지 않으므로 실험에서는 증류수와 수돗물을 1:1의 비율로 사용했다.

먼저 PCM의 타당성 및 적용성을 증명하기 위해 동일한 조건에서 기포를 발생시켜 그 결과를 비교

Table 1. Bubble generation conditions

Objectives	Voltage	Electrode
Verification of PCM	12V	Aluminum
Effect of Voltage	12-48V(12 V Increment)	Aluminum
Effect of Electrode	24V	Aluminum, Gold, Stainless Steel

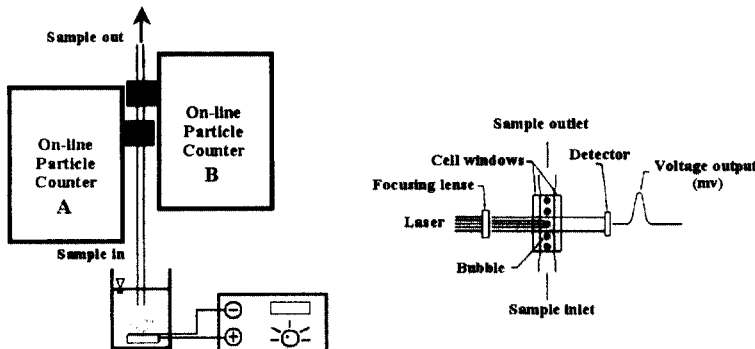


Fig. 2. Schematic of on-line particle counter and details of the sensor.

라는 실험을 행하였다. 그 후 전압 및 극판의 종류를 달리하여 기포를 발생시켜 그 크기를 측정함으로써 각각의 영향을 검토해 보았다. 세 가지 실험에 대한 기포의 발생조건은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 토의

3.1. PCM의 타당성 및 적용성

PCM의 타당성을 증명하기 위해 동일한 조건(알루미늄 극판, 12V 전압)에서 발생시킨 기포의 크기를 화상분석 방법과 PCM으로 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서와 같이 두 방법 모두 전체 크기분포에 걸쳐서 매우 유사한 추세를 나타내고 있으며, 이를 통해 PCM이 전해부상의 경우에도 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 결과를 수치상으로 비교하면 Table 2와 같은데, 모든 항목에 대해 두 측정방법이 비슷한 결과를 보여주고 있다.

그러나 기포의 크기분포 범위에 있어서는 측정방법에 따라 차이를 보이고 있다. 즉, 10 μ m 이하 범위에 대해 화상분석에서는 기포가 측정되었으나 PCM의 경우에는 기포가 없는 것으로 측정되었다. 이는 PCM의 경우 입자와 기포의 구분이 불가

능한 문제점 때문에 10 μ m 이하에 대해서는 모두 입자로 간주를 한 반면, 화상분석에서 관찰한 결과 10 μ m 이하의 기포가 실제로 발생하였기 때문이다. 이것은 PCM의 측정방법의 한계를 나타내지만, 이 범위의 기포 개수는 전체 크기범위 안에 있는 기포의 개수에 비해 매우 적은 분율(약 4%)이므로 무시할 수 있다. 또한, 큰 size range의 경우(약 50-80 μ m) 화상분석에서는 기포가 측정되지 않았지만 PCM에서는 기포가 측정이 되었다. 즉, 실제 발생되지 않은 크기의 기포가 측정이 되었는데, 이는 파티클카운터 센서 내부에서 기포간의 overlapping에 의한 오차인 것으로 사료된다. 다시 말해서, 파티클카운터 내부에서 두 개 또는 그 이상의 개수의 기포가 센서부 내에서 overlapping되는 경우 파티클카운터에서는 하나의 큰 기포로 측정이 된다. 하지만, 이 또한 매우 적은 분율(약 6%)이므로 이에 대한 오차는 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 단점에도 불구하고, PCM은 화상분석의 결과와 비교해 보았을 때 전체 분포에 대한 추세나 결과 값에 있어서 매우 유사하고, 측정시간이 적게 걸리기 때문에 전해부상에 있어서 PCM을 적용하여 기포의 크기를 측정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이후의 기포 크기측정에는 PCM

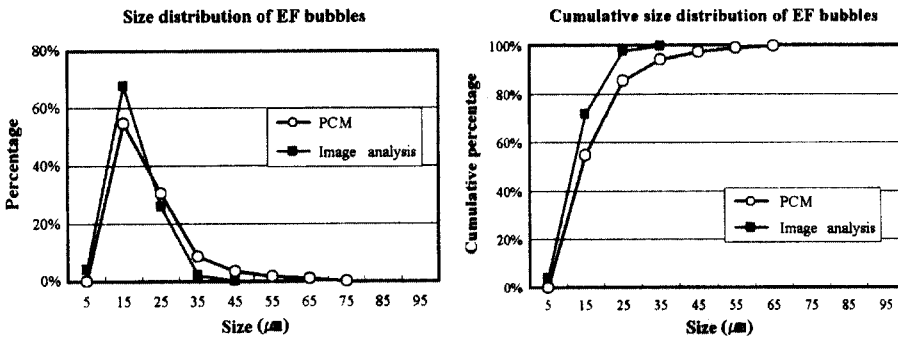


Fig. 3. Bubble size distribution according to measurement method.

Table 2. Size characteristics of bubbles measured by each method

	Size range (μ m)	Average size (μ m)	Modal size (μ m)	d35*
Image analysis	5-40	18	15	99.6%
PCM	15-65	22	15	94.2%

*Fraction of bubbles smaller than 35 μ m

방법을 사용하였다.

3.2. 전압의 영향

전해부상에서 전압이 미세기포의 크기분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 알루미늄 극판을 이용하여 전압조건에 따라 발생하는 기포의 크기분포를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서와 같이 전해부상에서 발생한 기포의 크기는 전압에 관계없이 비슷한 분포를 가진다. 각각의 전압조건에 따른 기포의 평균 크기 또한 19-23 μm 정도 범위에서 거의 차이가 없었고, modal size는 모든 전압조건에서 15 μm 를 나타내었다. 즉, 전해부상에서 기포의 크기는 (12-48V의 범위에서는) 전압에 영향을 받지 않으며, 결과적으로 전압에 비례하여 변화된 전류에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 전류에 영향을 주는 용액의 이온화세기, 극판의 저항, 극판의 전기 전도도, 극판의 간격 및 면적 등 전류와 관계된 모든

인자들에 의해 기포의 크기는 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 전해부상에서는 전류와 관계된 인자와 관계없이 일정한 크기의 기포를 안정적으로 발생시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

부상공정의 탁질제거효율은 기포의 크기뿐만이 아니라 기포의 발생량에 영향을 받는다. 따라서, 전해부상공정에서 동일한 극판을 사용하는 경우 기포의 크기특성 변화에 대한 우려 없이 기포발생량을 조절함으로써 공정의 효율을 최적화 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 극판 종류의 영향

극판의 종류가 기포 크기에 미치는 영향을 알아보기 위해 동일한 전압조건(24V)에 대해 세 가지 종류의 극판(알루미늄, 금, 스텐레스)를 이용하여 전해부상에서 발생하는 기포의 크기를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

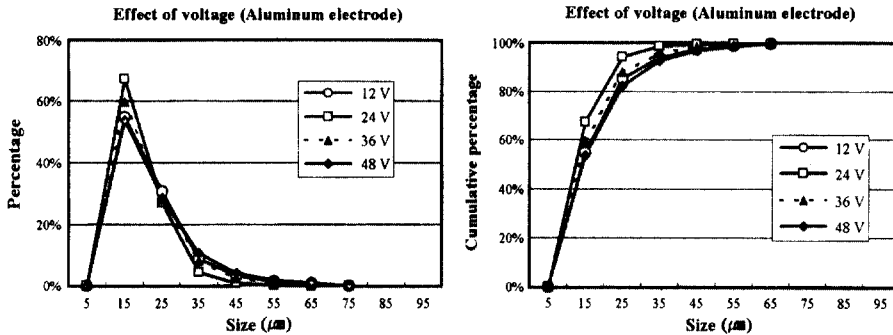


Fig. 4. Bubble size distribution according to voltage change.

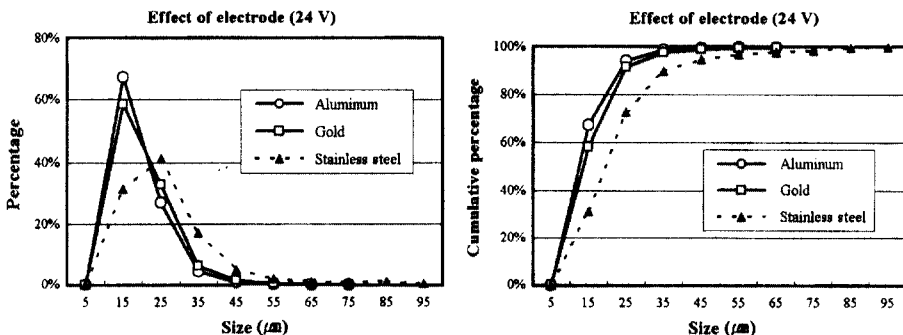


Fig. 5. Bubble size distribution according to electrode species.

결과에서와 같이 알루미늄극판과 금극판에서의 경우는 비슷한 크기 분포를 가졌으나 스텐레스극판의 경우에는 좀 더 큰 기포가 발생된다는 것을 알 수 있다. 평균 크기에 있어서도 알루미늄극판이나 금극판에서 발생한 기포는 각각 19 μm , 27 μm 이었으나 스텐레스 극판의 경우는 27 μm 로 더 크게 나타났다. 이는 기포의 크기는 전류특성과는 무관하다는 것을 앞절의 결과로부터 극판의 전기전도도에 따른 차이는 아닌 것으로 판단된다. 하지만, 극판의 종류에 따른 표면특성의 차이 때문에 나타난 결과인 것으로 판단되나 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

위의 결과로부터 원수 특성에 적합한 크기의 기포를 발생시키기 위해서는 극판의 종류를 적절히 조절하면 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 최근에 수행된 모델링의 결과에 의하면 기포와 입자의 크기가 서로 비슷할 때에 최대의 충돌효율을 가진다 (Han, 2001). 따라서, 제거대상 입자가 20 μm 정도일 때는 알루미늄이나 금 극판을 쓰는 것이 적합할 것이며, 제거대상 입자가 30 μm 정도일 때는 스텐레스 극판을 쓰는 것이 적절할 것이다.

3.4. DAF와 전해부상의 기포크기 비교

부상공정 중 가장 널리 사용되는 DAF에서의 기포크기(Han *et al.*, 2002a; Han *et al.*, 2002b)와 본 연구에서 측정된 전해부상에서의 기포의 크기를 비교하였다. Fig. 6과 Table 3에서 DAF와 전해부상으로부터 각각의 발생조건에 따른 기포의 크기특성을 나타낸 것이다. 앞절에서 언급한바와 같이 스텐레스 극판을 사용하는 경우는 알루미늄 극판을 사용한 경우보다 더 큰 기포가 발생된다. 하지만, 스텐레스 극판을 사용하는 경우 발생하는 기포의 크기는 DAF(6atm)에서의 기포의 크기와 매우 유사한 분포를 가진다는 것을 알 수 있다.

DAF에서 발생하는 기포의 크기는 전해부상에서의 기포의 크기보다 더 큰 것으로 알려져 있다 (AWWA, 1999; Burns *et al.*, 1997). 본 연구에서의 연구결과를 통해서도 알루미늄 극판을 사용하는 경우 문헌에서와 같이 DAF보다 작은 기포가 발생을 한다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 발생조건에 따라 DAF에서 발생하는 기포의 크기와 유사한 기포를 발생시킬 수 있다는 것 또한 알 수 있다.

DAF에서 기포발생장치는 가압탱크, 순환펌프, 노즐 등으로 구성되어 있으며, 전체 운전비의 약

Table 3. Size characteristics of bubbles generated by each method and condition

	Size range(μm)	Average size(μm)	Modal size(μm)	d35*
DAF(6atm)	15-85	28	25	87.6%
EF(Aluminum, 24V)	15-65	19	15	94.2%
EF(Stainless steel, 24V)	15-85	27	25	89.9%

*Fraction of bubbles smaller than 35 μm

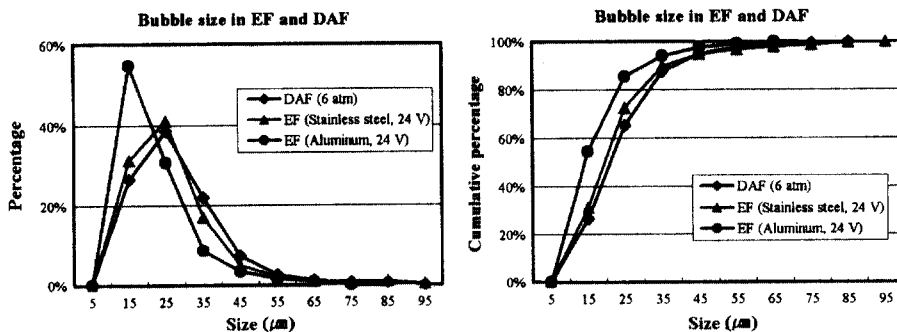


Fig. 6. Bubble size according to generation methods and conditions.

50%를 차지한다. 이에 비해 전해부상공정에서의 기포발생장치는 극판과 전원공급장치만으로 구성되어 있으며, 운전이 간단하며 적은 동력비가 소요된다. 이러한 장점들에도 불구하고 전해부상은 기포의 작은 크기 때문에 표면부하율에 있어서 4m/h 이내로 국한될 수밖에 없다(AWWA, 1999). 그러나, 본 연구에서의 결과와 같이 운전조건에 따라 전해부상에서도 DAF의 경우와 비슷한 크기의 기포를 발생시킬 수가 있다. 그러므로, DAF 대신 전해부상을 이용하더라도 적절한 운전조작을 통해 DAF와 동일한 표면부하율과 적은 운전비의 부상공정을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전해부상에서 발생하는 기포의 크기를 새로운 방법(PCM)을 이용하여 측정하였으며, 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1) 동일한 조건에서 발생한 기포의 크기를 화학분석과 PCM으로 측정하여 유사한 결과를 얻음으로써 전해부상에서 PCM을 사용하여 기포의 크기를 측정하는 것이 가능하다.

2) 전해부상으로부터 발생하는 기포의 크기는 전압(또는, 전류)에 영향을 받지 않으며, 동일한 재질의 극판을 사용하는 경우 운전조건에 관계없이 일정한 크기의 기포를 발생시킬 수 있다.

3) 극판의 종류에 따라서 다른 크기의 기포가 발생된다. 이는 극판의 전기적인 특성보다는 표면특성 때문인 것으로 판단되며 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

4) 전해부상에서도 DAF에서와 유사한 크기의 기포를 발생시키는 것이 가능하므로 적절한 운전을 통해 DAF 공정과 동일한 표면부하율로 운전하는 것이 가능하다.

사사

본 연구는 건설교통부 2001 산·학·연 공동연구 개발사업(과제번호: 2001-자유 A08) 지원으로 수행되었으며, 또한 서울대학교 공학연구소의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- American Water Works Association (1999), *Water Quality and Treatment 5th Ed*, McGraw-Hill, USA.
- Mooyoung Han (2001). "Modeling of DAF: The Effect of Particle and Bubble Characteristics", *AQUA*, 51(1), pp. 27-34.
- Mooyoung Han, Wontae Kim, Seok Dockko (2001a). "Collision Efficiency Factor of Bubble and Particle (α_{bp}) in DAF: Theory and Experimental Verification", *Wat. Sci. & Tech.*, 43(8), pp. 139-144.
- Mooyoung Han, Yonghyo Park, Taejong Yu (2001b). "Development of New Method of Measuring Bubble Size", *Wat. Sci. & Tech.*, Accepted for publication.
- Mooyoung Han, Yonghyo Park, Dongheui Kwak, Ilkyu Kim (2001c). "Development of Measuring Bubble Size in Flotation Process Using On-line Particle Counter", *J. KSWW*, 15(6), pp. 559-565.
- Mooyoung Han, Yonghyo Park, Joon Lee, Jaesoo Shim (2002a). "Effect of Pressure on Bubble Size in Dissolved Air Flotation", 2002 IWA World Water Congress, Melbourne, Australia.
- Mooyoung Han, Yonghyo Park, Joon Lee, Jaesoo Shim (2002b). "The Size Characteristics of Micro-bubbles in DAF According to Pressure Conditions", *J. KSWW*, 16(2), pp. 177-182.
- S.E. Burns, S. Yiacoumi and C. Tsouris (1997). "Microbubble Generation for Environmental and Industrial Separations", *Separation and Purification Technology*, 11, pp. 221-232.
- Wontae Kim, Mooyoung Han, Sungwoo Lee, Yiseon Han (2000). "Zeta Potential Measurement of Micro Bubbles Generated by Electrolysis", *J. KSWW*, 14(4), pp. 343-349.