Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.22. No5. pp. 531-540 October. 2008

DAF공정에서 개체군 수지를 이용한 기포-플록 응집체의 부상효율과 수리학적 부하율의 운전특성 평가

Evaluation on Flotation Efficiency of Bubble-floc Agglomerates and Operation Characteristics of Hydraulic Loading Rate Using Population Balance in DAF Process

곽동희*

Kwak, Dong-Heui*

서남대학교 환경공학과

(2008년 2월4일 접수; 2008년 3월31일 1차수정; 2008년 10월6일 2차수정; 2008년 10월8일 채택)

Abstract

The main advantage of dissolved air flotation (DAF) in water treatment process is the small dimension compared with conventional gravity sedimentation and it can be basically reduced by the separation zone performed with the short solid-liquid separation time. Fine bubbles make such a short time possible to carry out solid from liquid separation as a collector on the course of water treatment. Therefore, the dimension of separation zone in DAF process is practically determined by the rise velocity of the bubble-floc agglomerates, which is a floc attached with several bubbles. To improve flotation velocity and particle removal efficiency in DAF process, many researchers have tried to attach bubbles as much as possible to flocs. Therefore, the maximum number of attached bubble on a floc and the rise velocity of bubble-floc agglomerates considered as the most important factor to design the separation zone of flotation tank in DAF process was simulated based on the population balance theory. According to the simulation results of this study, the size and volume concentration of bubble influenced on the possible number of attached bubble on a floc. The agglomerates attached with smaller bubble was more sensitive to hydraulic loading rate in the separation zone of DAF process. For the design of a high rate DAF process applied over surface loading 40 m/hr. it is required a precise further study on the variation of bubble property and behavior including in terms of bubble size distribution.

Key words : Dissolved air flotation; rise velocity; agglomerate; bubble; floc; population balance

주 제 어 : 용존공기부상; 상승속도; 응집체; 기포; 플록; 개체군수지

*Corresponding author Tel : +82-63-620-0223, Fax: +82-63-620-0211, E-mail: kwak124@hanmail.net (Kwak, D.H)

1. 서 론

정수처리공정에 있어서 DAF의 주요한 장점은 침전공정에 비하여 상대적으로 적은 시설면적이 요구되며, 이는 근본적으로 고액분리과정에서의 짧은 분리시간에 의한 것이다. 실제적으로 DAF공정의 분리조는 기포-플록 응집체의 상승속도에 기초하여 설계되며, 이 상승속도는 플록에 부착되는 기포의 입경과 개수에 전적으로 달려있다(Kwak, et al., 2006).

실제 현장에서 더욱 빠른 고액분리를 유도하기 위하여 수리학적 부하율의 상승운전과 시설면적 감축을 위하여 지속적으로 연구와 적용이 시도되고 있다. DAF공정에서 변화되어져 온 지난 수십년간 수리학적 부하율은 1920년대에는 2?3 m/h(또는 5 m/h이하)에서 시작하여 1990년대에는 20-25 m/h까지 상승하였으며 최근의 고율(high rate) DAF에서는 40 m/h에 이르고 있다(Haarhoff and Edzwald, 2004). 이렇게 현장에서 적용되는 수리학적 부하율의 상승에 따라 기포-플록 응집체의 상승속도가 새로이 조명되고 있는 상황에서 그동안 기포와 입자간의 충돌-부착 기작에만 집중되던 연구가 DAF공정의 전반의 흐름과 입자의 분리에 걸쳐 확대되고 있다.

본 연구에서는 DAF 공정에서 기포의 입경에 따라 나타나는 기포수의 부착특성과 이에 따라 형성되는 기포-플록 응집체의 상승속도를 예측하고, 이를 토대로 수리학적 운전에 따른 부상효율을 평가함으로써 부상조의 분리부 운전에 유용한 정보를 제공하고자 한 일련의 실험을 실시하였다. 최대 기포수의 예측과 기포-플록 응집체의 상승속도는 여러 연구에서 DAF공정의 해석과 평가에 성공적 적용되어진 개체군수지(population balance) 이론을 이용하여 실시하였으며, 아울러 수리학적 부하율의 운전과 부상효율의 예측에 있어서도 기존에 널리 알려진 부상이론과 수리동력학적 모델들을 이용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 분리부에서의 기포-플록 응집체의 상승속도

하나의 플록과 i 개의 기포로 이루어진 기포와 기포-플록의 응집체 입경(d_{pb})과 밀도(ρ_{pb})는 다음의 식(1)과 식(2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$d_{pb} = (d^3_p + i d^3_b)^{1/3} \tag{1}$$

$$\rho_{pb} = \frac{\rho_p d^3_p + i\rho_b d^3_b}{d^3_p + i d^3_b} \tag{2}$$

기포-플록 응집체에 작용하는 부력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{Buoyancy} = \frac{\pi d^3_{pb} (\rho_w - \rho_{pb}) g}{6} \tag{3}$$

한편, 응집체의 레이놀즈수(Reynolds number)는 다음의 식 4와 같이 계산된다.

$$N_{Re} = \frac{\rho \nu_i d_{pb}}{\mu} \tag{4}$$

여기서, νi : 하나의 플록에 i개의 기포가 달라붙은 기포-플록 응집체의 상승속도.

기포-플록 응집체에 작용하는 항력(drag force, F_{Drag})은 다음과 같이 레이놀즈수(N_{Re})의 함수로서 구형 입자의 드랙계수(sphere's drag coefficient, CD)와 관련된 속도의 함수로서 계산될 수 있다.

$$C_D = \frac{F_{Drag}}{\pi \rho \nu_i^2 d^2_{pb} / 8} \tag{5}$$

그리고 식 (5)에 FBuoyancy=FDrag를 대입하여 응집체의 속도는 다음과 같이 나타내어진다.

$$V_i = \left(\frac{F_{Buoyancy}}{C_D \pi \rho d^2_{pb} / 8} \right)^{1/2} \tag{6}$$

또한, Clift 등(1978)에 의해 제안된 구형 입자에서 드랙계수 상관관계는 레이놀즈수(Reynolds number, N_{Re})의 함수로써 다음과 같이 4 형태로 나누어 나타내어진다.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{N_{Re}} \left(1 + \frac{3}{16} N_{Re}\right) & N_{Re} < 0.01 \\ \frac{24}{N_{Re}} \left(1 + 0.1315 N_{Re}^{0.82 - 0.05 \log_{10} N_{Re}}\right) & 0.01 \le N_{Re} < 20 \\ \frac{24}{N_{Re}} \left(1 + 0.1935 N_{Re}^{0.6305}\right) & 20 \le N_{Re} < 260 \\ 10^{1.6435 - 1.1242 \log_{10} N_{Re} + 0.1558 (\log_{10} N_{Re})^2} & 260 \le N_{Re} \le 1.5\ 10^3 \end{cases} \tag{7}$$

본 연구의 수행에 있어서 선행연구자(Leppinen et al., 2001)와는 달리 레이놀즈수에 따른 드랙계수의 범위를 층류(lamina region)에서 전이영역(transient region)까지 확대하여 적용하였다. 앞에서의 식(4)에서 식(7)까지를 Levenberg-Marquardt 알고리즘으로 알려진 최소자승법(least square method)을 이용하여 정리하면 기포-플록 응집체의 상승속도는 스토크 근사식(Stokes approximation)인 다음 식(8)과 같이 결정되어 진다.

$$\nu_{i,cr} = \frac{(\rho_w - \rho_{pb})\, g d^2_{pb}}{18\mu} \tag{8}$$

여기서, 레이놀즈수의 극한은 0까지이다.

한편, Matsui 등 (1998)에 의하여 제안된 바 있는 하나의 플록에 부착되는 최대 기포수는 다음과 같다.

$$i_{max} = \left[\max(1, c\,(d_p/d_b)^2)\right] \tag{9}$$

여기서, [x]는 최대 정수이며 c 일정 상수이다. 본 연구에서는 Matsui 등 (1998)에 의해 제안된 경험치를 적용하였다.

2.2 접촉부에서의 개체군 수지

기포-플록간 충돌과 부착의 기작에 있어서 나타나는 개체군 수지는 DAF공정의 접촉부에서 혼합시간 t에서의 i개의 기포가 부착된 플록의 수(n_i)를 측정함으로써 수식화될 수 있다. Fukushi 등(1995)과 Leppinen 등(2001)에 의해 수정된 가정을 토대로 i개의 기포가 부착된 플록의 수(n_i)는 다음과 같은 상미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{dn_0}{dt} = -k\alpha_0 n_0 n_{bubbles} \tag{10}$$

$$\frac{dn_i}{dt} = k\alpha_{i-1} n_{i-1} n_{bubbles} - k\alpha_i n_i n_{bubbles} \qquad i = 1 \text{ to } i_{max} \tag{11}$$

여기서, k는 난류 충돌효율 상수(turbulent collision rate constant)이며 다음과 같이 나타내어진다.

$$k = \alpha G\,(d_p + d_b)^3 \tag{12}$$

그리고 $n_{bubbles}$는 DAF공정의 접촉부에서의 단위용적당 기포의 개수이며 다음과 같다.

$$n_{bubbles} = \frac{\phi}{\pi d^3_b/6} \tag{13}$$

부착효율(adhesion efficiency, α)는 기포와 플록간의 비에 의하여 결정되어지며 부착된 기포수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_D = \begin{cases} \alpha_0 \left(1 - i\dfrac{d^2_b}{d^2_p}\right), & i = 1 \text{ to } i_{max} - 1 \\ 0, & i = i_{max} \end{cases} \tag{14}$$

따라서 식(12)와 식(14)를 이용하여 관련 미분방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dn_0}{dt} = -\alpha G\,(d_p + d_b)^3 \frac{\phi}{\pi d^3_b/6}\alpha_0 n_0 \tag{15}$$

$$\frac{dn_i}{dt} = \alpha G\,(d_p + d_b)^3 \frac{\phi}{\pi d^3_b/6}\left(\left(1-(i-1)\frac{d^2_b}{d^2_p}\right) n_{i-1} - \left(1 - i\frac{d^2_b}{d^2_p}\right) n_i\right), \quad i = 1 \text{ to } i_{max} - 1 \tag{16}$$

$$\frac{dn_{i_{max}}}{dt} = \alpha G\,(d_p + d_b)^3 \frac{\phi}{\pi d^3_b/6}\left(1-(i_{max}-1)\frac{d^2_b}{d^2_p}\right) n_{i_{max}-1} \tag{17}$$

접촉부에서 일정 체류시간($t=t_{contac}$) 경과후의 기포수를 결정하기 위하여 t=0일 때 모든 기포수가 i≥1에 있어서 초기조건 $n_0=N_0$과 $n_i=0$의 초기조건에서 식(15)에서 식(17)은 적절히 구해진다. 따라서 무차원 변수 $t^*=t/t_{contact}$와 $n^*=n_i/N_0$를 도입하여 식(15)-식(17)은 다음과 같이 무차원의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dn^*_0}{dt^*} = -\kappa n^*_0 \tag{18}$$

$$\frac{dn^*_i}{dt^*} = \kappa\left(\left(1-(i-1)\frac{d^2_b}{d^2_p}\right) n^*_{i-1} - \left(1 - i\frac{d^2_b}{d^2_p}\right) n^*_i\right), \quad i = 1 \text{ to } i_{max} - 1 \tag{19}$$

$$\frac{dn^*_{i_{max}}}{dt^*} = \kappa\left(1-(i_{max}-1)\frac{d^2_b}{d^2_p}\right) n^*_{i_{max}-1} \tag{20}$$

또한, 무차원의 부상효율 상수 κ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa = \frac{6\alpha G t_{contact}\left(1 + \dfrac{d_p}{d_b}\right)^3 \phi\alpha_0}{\pi} \tag{21}$$

그리고 라플라스 변환(Laplace transformation)을 통하여 미분방정식을 대수방정식으로 바꾸면 i개의 기포가 달라붙은 플록의 개수는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$n^*_i = \binom{d^2_b/d^2_p}{i}\exp(-\kappa t^*)\left(\exp\left(\frac{\kappa t^*}{d^2_b/d^2_p}\right) - 1\right) \quad i = 0 \text{ to } i_{max} - 1 \tag{22}$$

$$n^*_{i_{max}} = 1 - \sum_{i=0}^{i_{max}-1} n^*_i \tag{23}$$

여기서 일반화된 조합은 다음 식(24)와 같이 정의된다.

$$\binom{x}{i} = \frac{x!}{i!(x-i)!} = \frac{x(x-1)\Lambda\ (x-(i-1))}{i(i-1)\Lambda\ (2)(1)} \tag{24}$$

2.3 접촉부에서의 부상효율

DAF 공정의 총괄 효율은 분리부(separation zone)에서 운전되는 수리학적 부하율에 따른 기포-플록 응집체의 상대적 상승속도에 의해 결정되어 진다. 기포-플록 응집체의 상승속도가 ν_i이고 수리학적 부하율이 ν_{SL}이라면, 제거분율 η_i는 다음과 같이 쓸 수 있다(Matsui,et al., 1998).

$$\eta = \min(1, \max(0, \nu_i/\nu_{SL})) \tag{25}$$

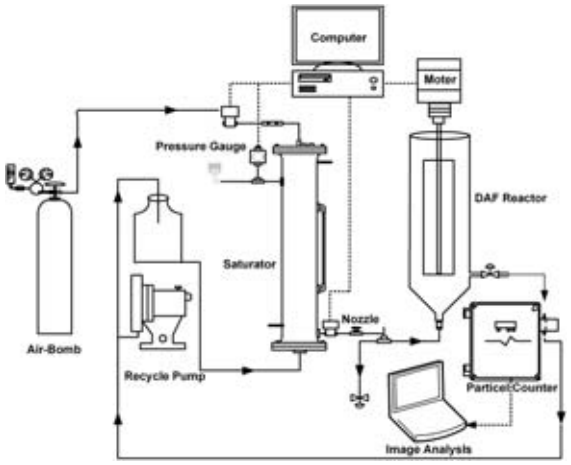


Fig. 1. Schematic diagram of bench scale bench scale pilot plant for dissolved-air flotation.

여기서 η_i는 접촉부에 존재하는 기포-플록 응집체의 분율(fraction)을 나타낸다.

DAF공정의 분리부에서의 입자분리과정에 있어서 기포-플록 응집체의 상승속도 분포에 따라 개체군 수지(population balance)에 의거한 기포-플록 응집체의 상승속도 예측결과를 도입함으로써 DAF공정의 부상효율이 표현된다. 윗 식(22)와 식(23) 그리고 식(25)를 조합하여 부상효율은 다음의 식(26)과 같이 나타내어진다.

$$\eta = \sum_{i=0}^{i\max} n_i^* \ (t^* = 1) \cdot \eta_i = \sum_{i=0}^{i\max} n_i^* \ (t^* = 1) \min(1, \max(0, \nu_i / \nu_{SL})) \qquad (26)$$

3. 재료 및 방법

본 연구에서 기포와 입자의 특성에 따라 DAF의 부상효율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 상수원 지역에서 채수한 하천수에 약간의 clay를 물에 녹여 제조한 인공 원수를 다음의 Fig. 1에 나타낸 DAF용 bench scale pilot plant로 처리하였다. 이 실험장치의 부상컬럼 이용하여 기포와 입자의 부상분리 특성을 조사하고 개체군수지(population balance) 모델을 통하여 해석하였다. 다음의 Table 1은 실내에서 제조하여 실험에 사용한 합성 원수의 수질범위와 DAF 처리조건 등을 나타내고 있다.

본 연구를 수행하기 위하여 실험실 규모의 DAF pilot plant를 사용하였다. 이 DAF pilot plant에는 응집제 투입 및 교반장치를 설치하여 적절한 약품혼합 및 급속교반과 완속교반을 실시한 후 형성된 플록과 미세 기포가 원활히 결합할 수 있도록 하였고, 원통형 부상컬럼 하단에서 포화된 순환수가 유입할 수 있도록 제작되었다. 균일한 압력조정과 이물질의 혼입을 억제하기 위하여 압력조절장치(pressure controller)와 필터를 saturator 유입전에 설치하였고 이 saturator 측부에는 순환수와 압입된 공기의 용해상태를 감시할 수 있도록 별도의 액위계를 설치하였다. 타이머를 부착하여 기포의 체적농도를 자동조절이 가능하여 반복되는 실험의 오차를 줄일 수 있도록 하였고, 가압탱크는 4-5 kg/㎠로 운전하였다. 한편, 다음의 Table 2는 개체군수지(population balance) 모델을 통하여 다양한 조건에 따라 예측한 모델에 적용한 계수의 범위와 입력조건을 나타내고 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기포의 입경분포와 부상속도

먼저 DAF pilot plant의 순환수에서 발생되는 기포의 부상속도와 입자의 침강속도를 측정하였다. 부상속도의 측정은 단순히, 기포체적농도 Φ의 정량적 이동보다는 기포의 부상속도로부터 입경과 그 분포를 Stoke' law에 의하여 예측된 값과 비교하기 위하여 필요하다. 기포 입자의 부상속도(rise velocity, vi)는 거의 Stoke법칙에 따르며 여러 문헌에 의하면 부상속도의 관찰값은 2.56~12.7 ㎝/min정도인데, 기포체적농도가 증가할수록 부착된 기포수가 많아져 상승속도는 커진다.

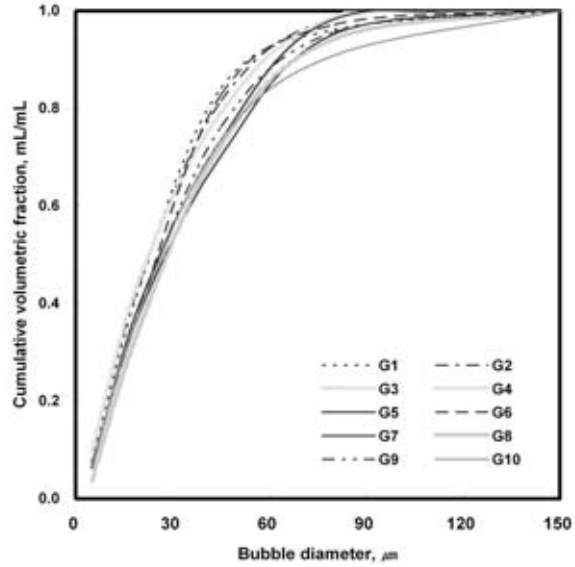
실험은 순환수를 증류수로 하여 saturator에서 주입되는 기포가 부상컬럼의 일정 높이를 통과하는데 소요되는 시간을 측정하였다. 부상컬럼내의 증류수에서 발생되는 미세 기포는 군집을 이루며 이 모양이 구름처럼 나타나므로 이를 통상 '기포구름(bubble cloud)' 라고 칭한다. 부상속도의 측정에서도 이와 같은 기포구름이 육안으로 뚜렷이 관찰되었고 이 기포구름은 서로 군집하여 상승하므로 기포구름의 상단

Table 1. Water quality of influent and composition of clay spiked in this study

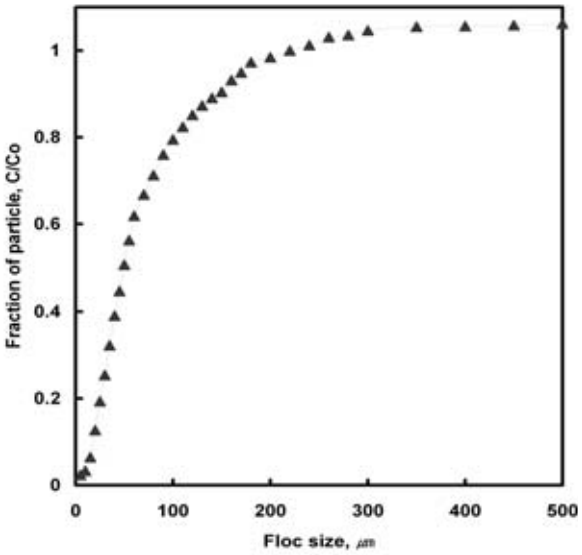
Raw water quality of WTP		Operation of DAF pilot plant	
pH	6.8-7.1	Flow	continuous
Turbidity (NTU)	10-120	Coagulants	PAC
Alkalinity (mg/ℓ as $CaCO_3$)	10-30	Alkalinity chemicals	$Ca(OH)_2$
BOD (mg/ℓ)	1.5-2.0	Air volume conc.	6,000~12,000 ppm
COD (mg/ℓ)	2.5-3.0	Pressure of saturator	4.5±0.5 kg/㎠
SS (mg/ℓ)	5.0-50	Recycle ratio	0.1~0.2

Note) Chemical composition of clay : SiO_2 0.46, Fe_2O_3 0.02, Al_2O_3 0.35, CaO 0.03, etc 0.14

상하수도학회지, 논문
22권 5호, pp. 531-540, 10월. 2008



(a) Volumetric size distribution of bubble cloud



(b) Size distribution of clay floc

Fig. 2. Size distribution of bubbles and particles in the flotation column.

과 하단 그리고 중앙부의 이동속도를 각각 측정하였다. 1회에 주입된 순환수를 부상컬럼에 주입하고 부상컬럼의 상부에 축적되는 공기의 양을 10초의 일정시간 간격으로 각각 10회 측정하였다. 이 값을 토대로 유사한 조건에서 측정된 기포의 입경조사 결과(독고 등, 2004)를 이용하여 기포구름을 형성하는 기포의 입경분포를 **Fig. 2(a)**에 나타내었다. 기포의 평균입경은 saturator의 압력과 노즐의 형태 등에 따라 약간의 차이를 나타내나 일반적으로 입경분포를 고려하여 평균값으로는 30-40㎛가 대표적이다.

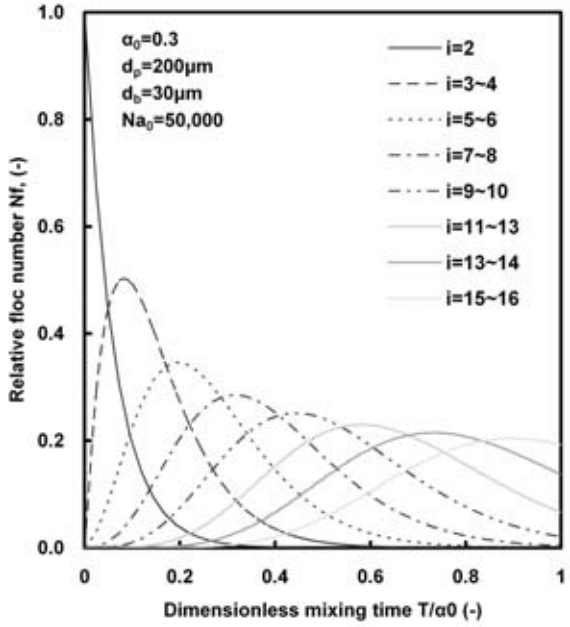
또한 상수 원수에 존재하는 입자 분포를 가상하기 위하여 본 연구에서 별도로 제조된 시료의 입자분포를 측정하였다. 초기 제조된 시료는 정수처리과정에서 응집제와 혼합, 응집되기 때문에 실제 기포와의 접촉 및 부상분리과정에서 중요하게 작용하는 응집된 floc의 입자분포를 측정하였으며 그 측정결과는 다음의 **Fig. 2(b)**와 같다. 여기서 제조된 점토입자(clay particles)의 비중이 균일하다고 가정하고 column 상부에 시료를 주입한 후 일정 시간에 따라 하부에 침강된 particle 농도를 측정한 침강속도별 입자분포를 이용하여 간접적으로 입자의 크기분포를 결정하였다. 한편, 점토 입자와 기포가 서로 접촉된 후 형성된 기포-플록 응집체의 상승속도를 측정하였으나, 수표면에서 기포-플록 응집체의 시료인출과정에서의 기포가 탈리(break up)와 흐름 교란 및 측정값의 신뢰성 부족 등의 이유로 본 연구에서는 제외시켰다.

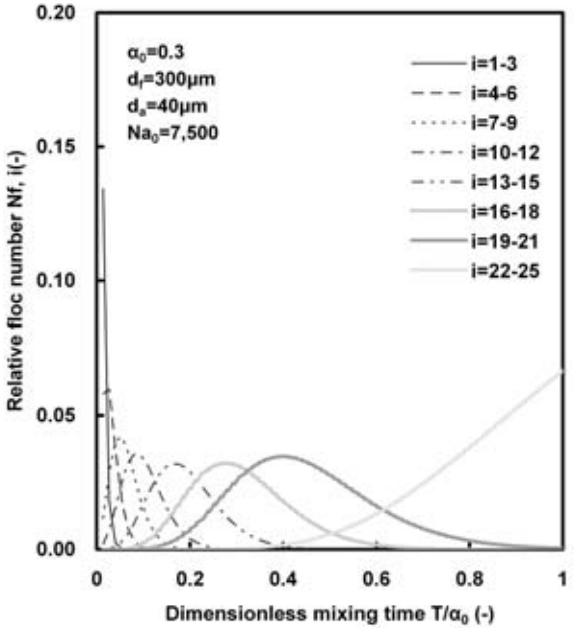
4.2 부착 기포수의 예측과 기포-플록 응집체의 상승속도

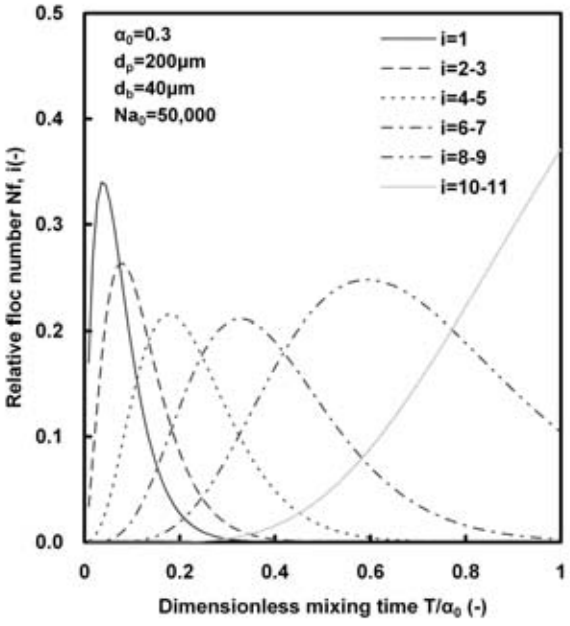
이론적 배경에서 기술한 식(1)에서 식(8)을 토대로 기포와 플록의 입경에 함수로써 기포-플록 응집체의 최대 상승속도를 예측할 수 있다. 이 최대 기포-플록 응집체의 상승속도는 식(9)에 표현된 하나의 플록에 부착되는 최대 기포수에 따라 결정되어 진다. 여기서 DAF공정의 접촉부에서 혼합(또는 접촉)시간에 따라 나타나는 하나의 플록에 부착될 수 있는 기포의 수는 개체군수지 이론에 기초한 식(10)에서 식

Table 2. Parameters using population balance model in DAF process

Parameters	Value	Unit	Reference
Diameter of bubble (d_b)	$2.0-12.0\times10^{-5}$	*m*	
Diameter of floc or particle (d_p)	$1.0-80.0\times10^{-5}$	*m*	Kwak *et al.*(2005)
Density of water (ρ_w) at 293.15K	1.0×10^{3}	*kg/m³*	
Density of bubble (ρ_b) at 293.15K	1.17×10^{-3}	*kg/m³*	Liers *et al.*(1996)
Viscosity of water (μ) at 293.15K	1.306×10^{-2}	*kg/m·s*	Reid *et al.*(1987)
Temperature of water (T)	293.15	*K*	
Numerical constant (a)	5.0×10^{4}	–	Saffman & Turner (1956)
Turbulent dissipation of energy (ε_0)	6.0×10^{-3}	*W/m³*	
Bubble volume concentration (Φ)	$1.0-6.0\times10^{-3}$	*m³/m³*	Edzwald (1995)
Initial adhesion efficiency (α_0)	0.3	–	Fukushi *et al.*(1995)
Surface loading rate (v_{SL})	1.8-27.0	*m/s*	







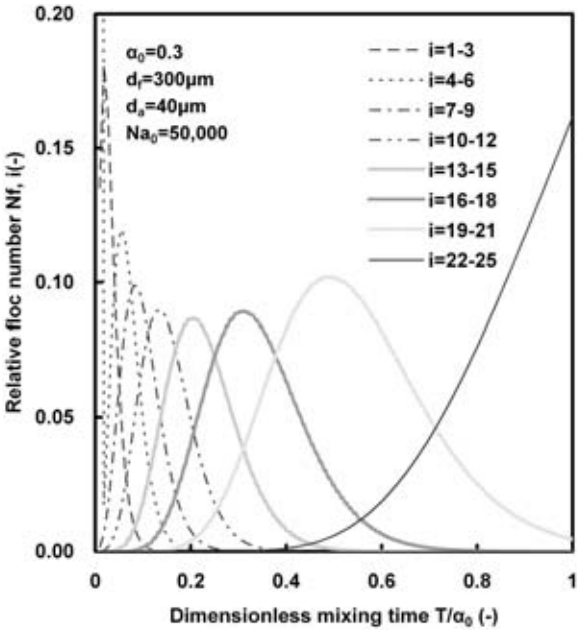


Fig. 3. Comparison of maximum number of attached bubbles on a floc in terms of bubble diameters.

Fig. 4. Comparison of maximum number of attached bubbles on a floc in terms of initial bubble counts.

(23)에 걸쳐 기술된 수식에 의하여 얻어진다.

기포의 입경에 따라 하나의 플록에 부착될 수 있는 최대 기포의 수가 달라지게 된다. 다음의 **Fig. 3**에는 응집후의 플록크기 200㎛를 예로 들어 단일 플록에 부착되는 최대 부착 기포수를 무차원 혼합(접촉) 시간에 따라 나타내고 있다. 기포의 입경이 30㎛일 때 단일 플록에 부착되는 최대 기포수 i는 15-16개, 기포 입경이 40㎛인 경우에는 최대 기포수 i가 10-11개로 감소하는 것을 볼 수 있다. 기포의 개수만을 고려하였을 때 통상 알려진 기포의 충돌-부착 효율의 상승에 따라 부착 기포수는 증가하게 된다.

한편, 실제 운전에서는 기포 체적농도가 반송비나 saturator의 압력에 따라 달라진다. 이 기포체적농도의 변화에 따라 변화되는 최대 부착 기포수와 제거효율을 살펴보았다. 다음의 **Fig. 4**에는 기포의 체적농도를 다르게 적용하였을 경우 단일 플록에 부착되는 기포의 부착정도가 다르게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 즉 300㎛의 플록에 최대로

상하수도학회지, 논문
22권 5호, pp. 531-540, 10월. 2008

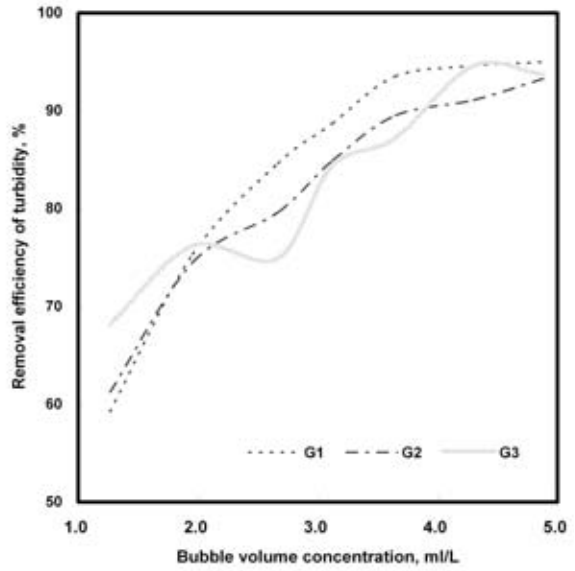


Fig. 5. Variation of turbidity removal efficiency depending on bubble volume concentration.

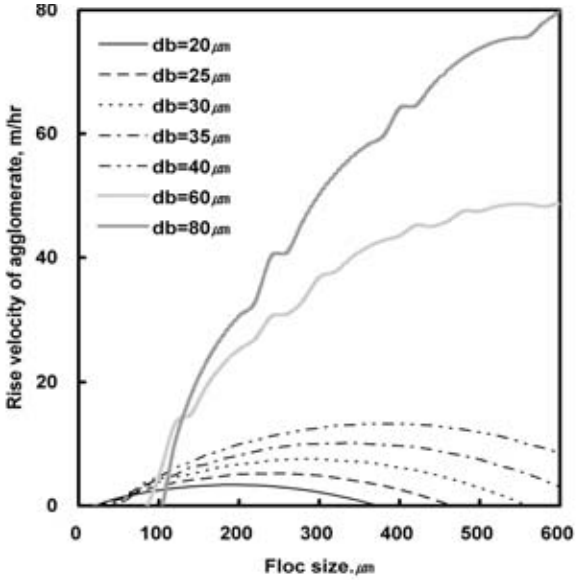


Fig. 6. Maximum rise velocity of bubble/floc agglomerates as a function of bubble diameters.

부착되는 기포의 수는 22-25개에 이를 것으로 예측되었으며, 낮은 기포체적농도(주입 기포수 i=7,500)에서와 높은 기포체적농도(주입 기포수 i=50,000)에서 부착되는 정도는 큰 차이를 보여주고 있다. 아울러 실제 DAF pilot plant를 이용하여 부상처리 실험을 실시한 결과, 다음의 Fig. 5와 같이 기포체적농도의 상승에 따라 입자의 제거효율도 상승하는 것을 볼 수 있다. 실험값의 신뢰도 향상을 위하여 기포체적농도를 변화시키며 3회(G1~G3)에 걸쳐 실시한 결과이다.

하나의 플록에 부착하는 최대 기포수의 예측결과에 따라, 다양한 기포 입경에 있어서 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용하여 식(7)에서 식(10)에 걸쳐 나타낸 수식에 의해 플록의 입경에 따라 최대 상승속도를 계산하였다.

다음의 Fig. 6에는 플록에 부착된 기포의 수에 따라 달라지는 기포-플록 응집체의 상승속도를 보여주고 있다. 모든 기포의 입경에서 공통적으로 확인할 수 있듯이 기포의 입경이 커지면 기포-플록 응집체의 상승속도 또한 증가하게 되며, 하나의 기포 입경에서 볼 때 플록의 크기가 커지게 되면 일정 크기 이상의 플록에서는 플록의 밀도에 의하여 상승속도가 차차 감소하게 된다. 아울러, 그림에서 볼 수 있듯이 모든 기포의 입경이 20㎛인 경우 기포가 단일 플록에 최대로 부착하게 되면 플록 입경이 약 350㎛를 초과하는 플록은 기포의 상승력보다 플록의 침강력에 의하여 기포-플록 응집체의 이동은 아래로 향하게 된다. 그러나 기포의 입경이 30㎛를 초과하게 되면 기포의 수가 최대로 부착하게 되더라도 기포-플록 응집체가 하강하는 경우는 매우 드물게 될 것이다.

본 예측결과는 DAF공정의 분리부(separation zone)에서 나타나는 기포-플록 응집체의 상승속도를 예측한 것으로써, 통상 접촉부(caontact zone)에서 작은 기포가 기초와 입자간 충돌-부착 효율을 높여 입자의 제거에 유리하다는 연구결과(Edzwald, 1995; Han, et al.,2001)와는 직접 관련성은 없다. 다만, DAF공정의 순환수로부터 공급되는 기포구름(bubble cloud)의 기포 입경이 너무 작은 범위로만 이루어져 있다면 분리부에서의 기포-플록 응집체의 상승에 어려움을 유발할 수 있다. 그러나 실제로 기포의 입경분포가 40㎛이하로만 이루어진 매우 작거나 협소한 입경분포는 형성되지 않으며 20-120㎛의 일반적 기포입경 범위에서 40㎛를 초과하는 기포는 분리부에서 기포-플록 응집체의 상승속도 향상에 도움이 될 수 있다고 이해할 필요가 있다. 이는 재래식 DAF공정에서 보다는 최근 수리학적 부하율을 약 40 m/h 이상으로 운전하는 고율 DAF(Haarhoff and Edzwald, 2004)에서는 중요하게 작용될 수 있는 것이다.

4.3 분리부에서의 부상효율

식(1)에서 식(9)는 부상효율이 DAF 조에서 초기 부착효율(initial adhesion efficiency), 기포와 입자의 크기, 수리학적 부하율, 기포 체적농도(bubble volume concentration) 그리고 분리조 체류시간의 함수임을 나타내고 있다. 기포 입경분포에 관한 몇몇 연구결과들(Rodrigues and Rubio, 2003; Vlyssides et al, 2004; Leppinen and Dalziel, 2004; Kwak et al, 2005)에 의하면 기포 입경은 통상 20-120 ㎛.의 범위에 존재한다. 다음의 Fig. 7은 기포 입경이 각각 40㎛와 100㎛에서의 수리학적 부하율에 따른 부상효율을 보여주고 있다. 여기서의 부상효율은 실제 DAF 공정에서의 입자 제거효율을 나타내는 것이 아니며, 기포 입경의

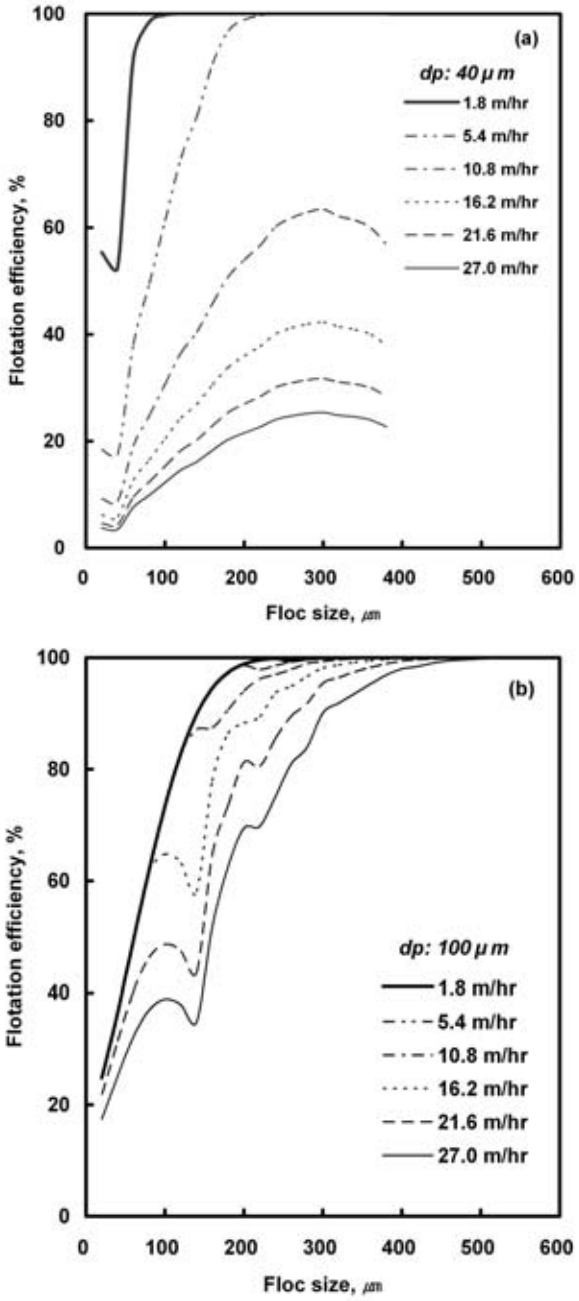


Fig. 7. Influence of the surface loading rate (v_{SL}) as a function of d_p on the flotation efficiency.

차이가 부상효율에 미치는 영향을 확인하기 위한 예측결과이다. 즉 모든 기포 입경이 40㎛일 경우를 가정한 것이므로 실제와는 차이가 있으며, 실제 현장에서는 다양한 입경 범위의 기포가 주입되므로 본 연구의 예측결과와는 다르게 나타난다.

기포 입경 40㎛에 있어서, 재래식 DAF 운전범위에서 고율 DAF의 범위까지의 수리학적 부하율 5-25 m/hr을 단계적으로 적용한 결과 다소 낮은 부상효율을 보이고 있으며, 수리학적 부하율의 증가에 따라 부상효율이 크게 감소하고 있다. 반면 100㎛에서는 적용범위 전체에 걸쳐 전반적으로 부상효율이 상대적으로 우수하였으며, 수리학적 부하율의 증가에 따라 부상효율의 감소폭도 작아졌다. 이 분리부(separation zone)에서의 부상효율에 관련된 본 연구결과는 접촉부(contact zone)에서 작은 기포가 보다 높은 기포-입자간 충돌효율을 유도하여 입자 제거효율에 유리하다는 일반적인 연구결과와 상반된다는 의미가 아니다. 즉 단일 입경으로 존재하지 않고 다양한 크기 분포를 보이는 기포의 입경에 있어서 수백㎛의 거대 기포(macro-bubble)가 아닌 통상 운전되는 범위 20-120 ㎛.에서의 큰 기포는 분리부에서의 부상분리효율에서 오히려 좋은 영향을 미칠 수 있다는 사실을 알 수 있다. 이 결과는 DAF공정의 접촉부에서의 작은 기포에 의한 충돌효율과 분리부에서의 큰 기포의 부상효율을 함께 고려하면, 효과적인 DAF의 입자 제거가 잘 이루어지는 기포와 입자간 특정한 비가 존재한다는 Han(2002)의 연구결과를 간접적으로 뒷받침한다.

다음 Fig. 8은 수리학적 부하율 20m/hr 및 40m/hr에서 기포의 입경에 따라 달라지는 DAF공정의 분리부 부상효율을 나타내고 있다. 충돌-부착효율과는 달리 기포 입경이 클수록 분리효율이 좋은 것을 볼 수 있다. 또한, 여기서 수리학적 부하율의 상승에 따라 분리효율의 감소를 볼 수 있으며, 기포 입경이 작으면 작을수록 수리학적 부하율에 영향을 크게 받아 분리효율이 감소되는 폭이 커지고 있다. 이 결과는 앞의 Fig. 7에서와 같이 일정 범위내에서 작은 기포가 하나의 플록에 부착되는 기포의 개수가 많을 지라도 작은 기포는 수리학적 부하율에 민감하여 상대적으로 큰 기포가 부상효율에는 유리하다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

DAF 공정에서 기포의 입경에 따라 나타나는 기포수의 부착특성과 이에 따라 형성되는 기포-플록 응집체의 상승속도를 예측하고, 이를 토대로 수리학적 운전에 따른 부상효율을 평가함으로써 부상조의 분리부 운전에 유용한 정보를 제공하고자 한 일련의 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

작은 기포의 입경은 하나의 플록에 결합하는 최대 기포수를 증가시킨다. 또한, 높은 기포체적농도로 운전할 경우, 낮은 농도에서 보다 많은 수의 기포가 부착된 기포-플록 응집체를 얻을 수 있는 것으로 예측되었다. 그러나, 기포의 입자가 작게 되면 플록에 부착된 기포의 수가 많아진다고 할지라도, 상대적으로 큰 기포가 부착된 경우에 비하여 작은 기포가 부착되면 기포-플록 응집체의 상승속도는 낮아지는 것으로 나타났다. 특히 작은 기포로 이루어진 기포-플록 응집

상하수도학회지, 논문
22권 5호, pp. 531-540, 10월. 2008

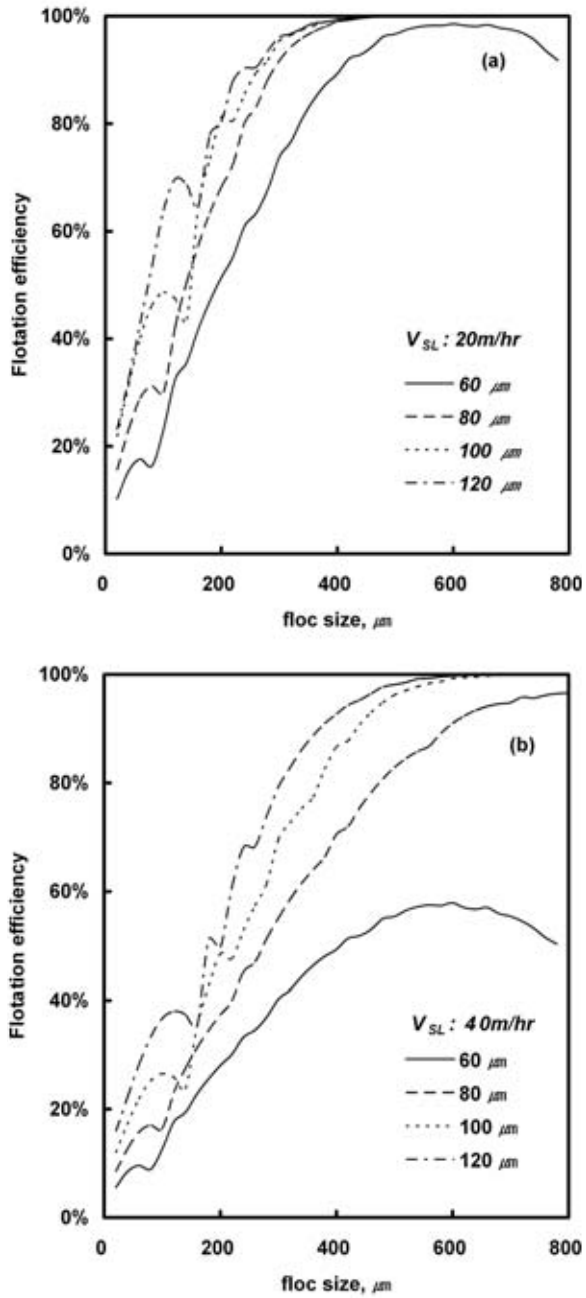


Fig. 8. Influence of the attached bubble diameter as a function of d_b on the flotation efficiency.

체의 경우 수리학적 부하량의 변동에 민감하여 부상효율이 변화될 수 있었다.

실제적으로 다양한 크기 분포를 보이는 기포의 입경에 있어서 수백㎛의 거대 기포가 아닌 통상 운전되는 범위 20-120 ㎛.에서, 작은 기포는 접촉부에서 충돌-부착 효율에 효과적인 반면 큰 기포는 분리부에서의 부상분리효율에 좋은 영향을 미치므로 상호 보완적 역할을 하는 것으로 나타났다. 아울러, 실제 DAF 공정의 운전에 있어서 기포의 입경이 단일화되어 있지는 않으므로 기포의 입경분포를 조사하여 이를 토대로 기포-플록 응집체의 상승속도를 예측함으로써 DAF공정의 분리부의 수리학적 부하율 운전에 적절히 활용할 필요가 있다.

KSWW

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원사업(No. R01-2004-000-11029-0)에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 연구를 위하여 개체군수지 해석을 도와주신 신경대학교 정홍조교수님께도 감사드립니다.

참고문헌

1. Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., (1978) *Bubbles, drops, and particles*, Academic Press, NewYork.
2. Dockko, S., Kwak, D.H., Kim, Y.H. (2004) Analysis of Controlling the Size of Microbubble in DAF, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 18(2), 235-241.
3. Edzwald, J. K. (1995) Principles and applications of dissolved air flotation, *Water Science and Technology.*, 31(3-4), 1.
4. Fukushi, K., Tambo, N. and Matsui, Y. (1995) A Kinetic Model for Dissolved Air Flotation in Water and Wastewater Treatment, *Water Science and Technology*, 31(3-4), 37-47.
5. Haarhoff, J. and Edzwald, J.K. (2004) Dissolved air flotation modelling: insights and shortcomings. *J. Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 53(3), 127-150.
6. Han, M. Y., Kim W. T., Dockko S. (2001) Collection efficiency factor of bubble and particle (αbp) in DAF: Theory and experimental verification, *Journal of Wat. Sci. & Tech.*, 43(8), 139-144.
7. Han, M.Y. (2002) Modeling of DAF: the effect of particle and bubble characteristics. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 51(1), 27-34.
8. Kwak, D. H., Jung, H. J., Kim, S. J. and Lee, J. W. (2005) Separation characteristics of inorganic particles from rainfalls in dissolved air flotation: A Korean perspective, *Separation Science and Technology*. 40,

3001-3016.

9. Kwak, D. H., Jung, H. J., Kim, S. J., S.B. Kwon, H.W. Ahn and Lee, J. W. (2006) Removal of Clay and Blue-green Algae Particles through Zeta Potential and Particle Size Distribution in Dissolved Air Flotation Process, *Water Science and Technology: Water supply*, **6**(2), 95-103.
10. Leppinen, D. M., Dalziel, S. B. and Linden, P. F. (2001) Modeling the global efficiency of dissolved air flotation, *Water Science and Technology*, **43**(8), 159.
11. Leppinen, D.M. and Dalziel, S.B. (2004) Bubble size distribution in dissolved air flotation tanks. *J. Water Supply: Research and Technology-Aqua*, **53**(8), 531-543.
12. Liers, S., Baeyens, J. and Mochtar, I. (1996) Modeling dissolved air flotation, *Water Environmental Research*, **68**(6), 1061.
13. Matsui, Y., Fukushi, K. and Tambo, N. (1998) Modeling, simulation and operation parameters of dissolved air flotation, *J. Wat. Suppl: Res.&Tech.-AQUA*, **47**, 9.
14. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E. (1987), *The properties of gases and liquids*, McGraw-Hill, 4th ed.
15. Rodrigues, R.T., Rubio, J. (2003) New basis for measuring the size distribution of bubbles. *Minerals Engineering*, **16**, 757-765.
16. Vlyssides, A. G., Mai, S. T. and Barampouti, E. M. (2004) Bubble size distribution formed by depressurizing air-saturated water, *Ind. Eng. Chem. Res.* **43**, 2775.