

DAF에서 기포의 크기제어 및 영향분석

Analysis of Controlling the Size of Microbubble in DAF

독고석^{1,*} · 광동희² · 김영환³

Dockko, Seok^{1,*} · Kwak, Dong-Heui² · Kim, Young-Hwan³

1 우석대학교 환경신소재공학부

2 서남대학교 환경화학공학부

3 서울대학교 공학연구소

(2003년 11월 10일 접수; 2004년 2월 24일 최종수정논문채택)

Abstract

The dissolved air flotation (DAF) process has been widely used for removing suspended solids with low density in water. It has been known as measuring the size of microbubbles precisely which move upward rapidly in contact zone is difficult. In this study particle counter monitoring (PCM) method is used to measure the rising microbubble after injection from a nozzle. Size and distribution curve of microbubbles are evaluated at different conditions such as pressure drop at intermediate valve, length of pipeline between saturation tank and nozzle and low pressure. And the efficiency is also checked when it collides with different size floc. The experimental results show the following fact. As the final pressure drop occurred closer to a nozzle, the bubble size became smaller. And small bubble collides with large floc as well as small one because of its physical characteristic. However large bubble collides well with large floc rather than small one since hydrodynamic flow in streamline interferes to collide between two. With performing computational process by mathematical model we have analyzed and verified the size effect between bubble and floc. Collision efficiency is the highest when P/B ratio shows in the range of $0.75 < P/B \text{ ratio } (R_{\text{particle}}/R_{\text{bubble}}) < 2.0$.

Key words: dissolved air flotation, size effect, nozzle, saturation tank, collision efficiency

주제어: 용존공기부상법, 크기제어, 노즐, 압력탱크, 충돌효율

1. 서론

용존공기 부상공정 (Dissolved Air Flotation; DAF)에

서 미세기포와 플록과의 충돌과정은 전체 반응에서 주된 공정효율을 결정하는 인자이다. 이제까지의 DAF 연구와 공정개선은 주로 플록제어와 부상조의 유체흐름제어에 초점이 맞추어져 왔다고 할 수 있다.

*Corresponding author Tel.: +82-63-290-1427, Fax: +82-63-290-1424, Email: dks@woosuk.ac.kr (Dockko, S.)

이는 미세기포의 크기를 제어하는 것이 현실적으로 곤란하였고, 기포의 상승속도도 매우 빨라서 기포크기의 영향을 분석하고 검증할 수 있는 방법이 없었기 때문이다.

본 연구에서는 입자크기를 측정할 수 있는 Particle counter monitoring 방식을 미세기포에 적용하여 발생하는 기포의 크기를 분석하는 원리를 적용하여 크기 변화를 측정하였다. 이를 이용하여 노즐을 제어함에 따라 발생하는 미세기포 크기와 분포를 측정하였고, 이에 따른 반응효율변화를 분석하였다. 또한 가압탱크와 노즐 연결관의 길이가 미세기포 크기에 미치는 영향을 분석하여 최적의 관길이를 도출하고자 하였다. 수학적 모델링 결과를 통하여 Floc 크기와 미세기포 크기의 반응효율과의 관계 분석도 실시하였고 이를 실험적으로 규명하고자 하였다.

2. 연구의 방법

2.1. 노즐제어에 따른 미세기포의 크기측정

본 연구에서는 노즐의 영향을 알아보기 위하여 우선 노즐 대신에 1/4 인치 밸브를 사용하여 이를 개폐시키면서, 유입되는 유입수내의 미세기포의 크기 변화를 측정하였다. 즉, 1/4 인치 밸브의 면적을 6등분으로 나누어, 1/6 개폐시~6/6 개폐(완전개방)시까지 변화할 때의 미세기포 크기를 측정하였다. 실험에 앞서서 on-line particle counter(Chemtrac Model PC 2400 D, USA)의 크기측정의 재현성을 알아보기 위하여 직경 1, 2, 12, 15 마이크론 Latex beads LB-1, 2, 12, 15(Sigma)를 사용하여 분석기의 정확도를 확인한 다음 본 실험을 실시하였다. 가압탱크는 5기압을 유지하였으며, 가압수의 유출로 인한 압력저하를 방지하기 위하여 압력탱크와 연결시켜 연속적으로 압력이 공급되어지도록 장치하였다. 수중의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 원수는 실온하에서 하루 보존후 사용하였다. 사용된 밸브의 조건에 따른 면적비 변화는

다음 **Table 1**과 같다.

On-line particle counter를 부상조 상부에 설치하여 가압수를 반응조 하부에서 유입시키고, 상부에서는 별도의 관을 이용하여 발생기포를 유입시키면서 크기를 측정하였다. 측정장치의 원리는 지나가는 기포에 Lazer beam을 주사하여 Scattering되는 것을 자동적으로 크기와 개수를 측정하여 연결된 컴퓨터에 실시간을 저장시키는 구조로 되어 있다. 실험장치는 아래 **Fig. 1**과 같다.

실험은 크게 세 개로 구분되며, 각각의 실험조건을 정리하여 다음 **Table 2**에 나타내었다. 실험1~실험3은 최종적인 압력저하를 연결관 끝밸브 B 부분(실험1 조건), 연결관 시작밸브 A 부분(실험2 조건), 연결관 시작 A부분과 끝 B부분에서 1/6씩 개방함으로써 압력저하로 인한 관내부에서 미세기포의 크기변화를 알아보는 실험이다. 실험4는 실험1~실험3에서 얻은 최적의 밸브 개방량을 이용하여 연결관 길이의 변화가 발생하는 미세기포의 크기에 어느 정도 영향을 미치는가에 대한 영향을 분석하는 실험이다. 즉, 밸브 A, B사이의 연결관 길이는 1, 5, 10, 15m로 각각 변화시키면서 이에 따른 기포크기의 영향을 분석하였다.

실험5는 상기의 실험에서 최적밸브 개방상태와 최적 연결관에서 가압탱크의 압력을 2~4 기압으로 변화시키면서 플록의 크기에 따른 기포크기의 영향을 분석하였다.

본 실험에서 처리효율을 알기 위하여 표준인공시료를 사용하였으며, 이는 수돗물과 Kaolin(탁도 150 NTU)을 사용하였고, pH는 7.0를 유지시켰으며, Alkalinity조절에 소다회를, pH는 H₂SO₄와 NaOH를 사용하였다. 응집제는 Alum을 사용하여 최적상태의 플록을 만들어 유입수와 반응/부상시켰었다.

Table 1. 밸브의 면적환산(단위: cm²)

구분	밸브의 개도	Percentage	구분	밸브의 개도	Percentage
1/6 open	21.1/126.6	16%	4/6 opened	84.4/126.6	66%
2/6 open	42.2/126.6	33%	5/6 opened	105.5/126.6	83%
3/6 open	63.3/126.6	50%	6/6 opened	126.6/126.6	100%

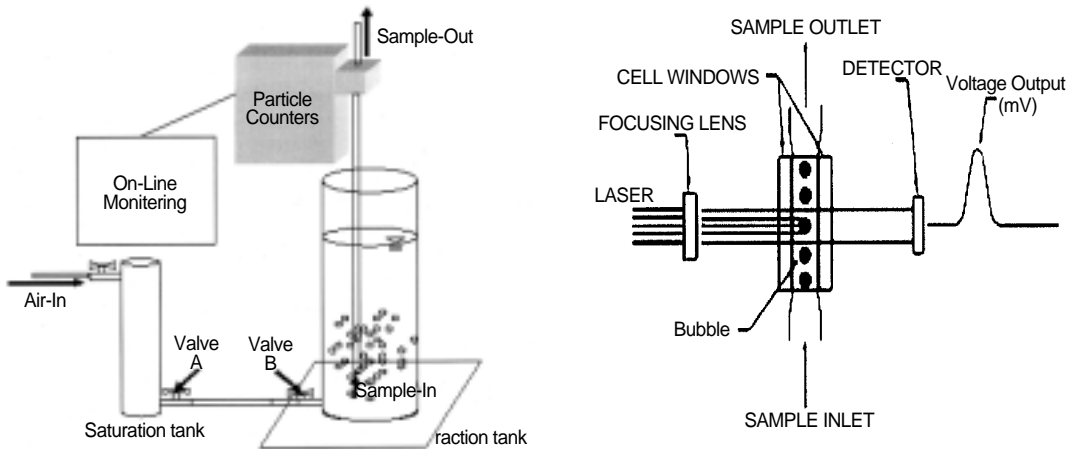


Fig. 1. Bubble size measurement method and details of the sensor.

Table. 2. 실험조건

	실험1	실험2	실험3	실험4	실험5
사용밸브의 직경	1/4 in	1/4 in	1/4 in	1/4 in	1/4 in
실험장치(A)와 반응조(B)간의 연결관 길이	1m	1m	1m	A, B 연결관의 길이를 각각 1, 5, 10, 15m로 변화	가압탱크 압력을 각각 2~4 atm 상태에서의 반응효율측정
A부분 조건	완전개방	6등분 조절개방	1/6개방	완전개방	완전개방
B부분 조건	6등분 조절개방	완전개방	1/6개방	1/6개방	1/6개방

3. 결과 및 고찰

3.1 노즐(밸브)제어에 따른 기포크기의 변화

1/4 인치 밸브의 면적을 6등분으로 나누어, 1/6 개폐시~6/6 개폐(완전개방)시까지 변화할 때의 미세 기포 크기를 측정 밸브를 이용하여 노즐의 효과를 보면서 각각의 제어를 통하여 발생한 기포크기를 측정 한 것이 Fig. 2이다. 가압탱크 쪽 밸브A는 완전히 개방하고 밸브쪽B는 1/6정도만 개방할 때에는 10-40 μ m의 작은 기포 많이 발생하였으나, 반대로 한 경우에는 상대적으로 크기가 큰 50-100 μ m의 기포발생량이 많았다. 이는 실험 1에서는 압력저하가 최종 밸브에서 급격하게 감압되어 미세기포 발생량이 증가된 결과이다. 실험 2에서는 압력저하 후 발생한 미세기포가 다시 연결관내를 지나면서 재결합(Coalescence)

하여 크기가 성장한 결과라고 할 수 있다. 이는 실험 3의 경우인 A지점에서 일부 압력저하시킨 후 B지점에서 최종적으로 압력저하를 시킨 결과에서 명확하게 시사하고 있다. 이러한 결과를 통하여 최종적인 감압 포인트는 가압수의 주입직전에 노즐 및 밸브를 설치하는 것이 작은 기포 발생에 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.2 가압탱크와 발생노즐(밸브)간 연결관 길이의 영향

가압탱크와 연결관의 길이를 1, 5, 10, 15m로 변화시키면서 발생되는 미세기포의 크기를 측정한 실험조건4의 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 가압탱크 쪽 밸브는 완전히 개방된 상태이고, 연결관 끝부근에서만 밸브개방을 조절하면서(실험 1), 연결관 길이만을 변화시킨 실험으로서 최종 유출전에 연결관내부는 가압

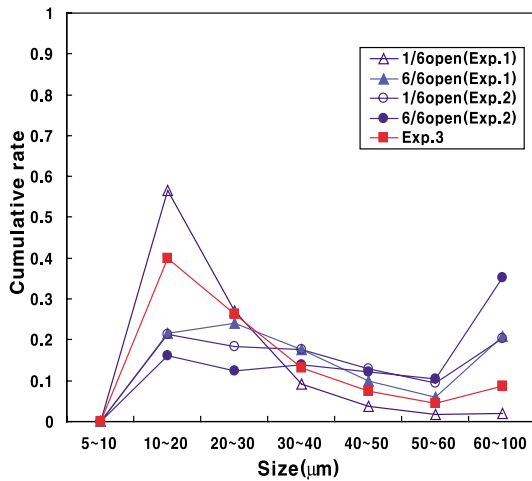


Fig. 2. 밸브 개방 정도에 따른 bubble size 분포

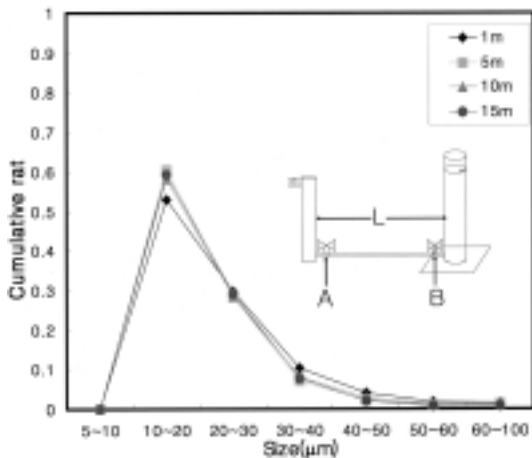


Fig. 3. 연결관 길이에 따른 bubble size 분포

탱크의 압력이 거의 동일하게 유지되었다. 실험 결과를 보면 연결관 길이 변화에 따른 발생기포 크기에는 큰 영향이 거의 없음을 알 수 있었으며, 이는 압력과 온도만 그대로 유지된다면 결국 연결관도 일종의 압력탱크와 같은 역할을 한다고 볼 수 있다.

3.3. 가압탱크내 압력변화가 기포크기와 반응효율에 미치는 영향

가압탱크의 운전압력은 DAF에서 일반적으로 4-5 기압을 사용하고 있으나, 실제로 저압상태하에서의 운전효율저하 및 원인에 대한 규명이 불확실하게 이

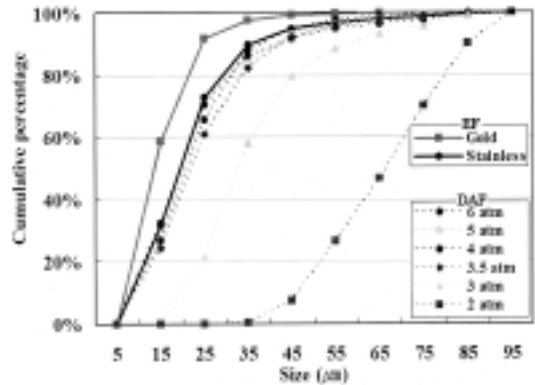


Fig. 4. 압력에 따른 발생기포의 크기분포

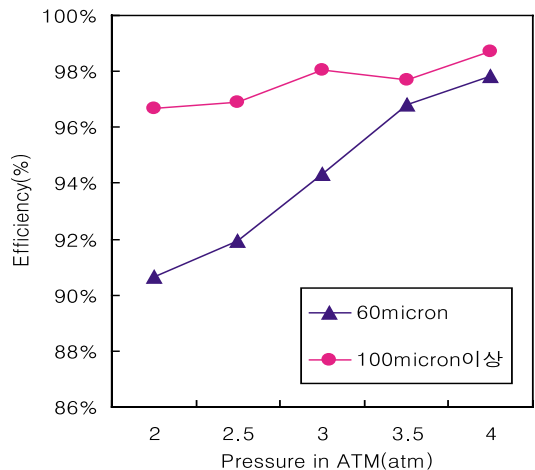


Fig. 5. 가압탱크 압력에 따른 반응효율

루어져 왔다. 이는 저압상태하에서 발생하는 미세기포의 크기에 대한 정확한 측정과 분석자료의 부족이라 사료되며, 본 실험에서는 2기압~4기압의 가압상태에서 발생된 미세기포의 크기를 측정한 실험자료 (Han et. al., 2002)에 근거하여 이 기압상태에서의 Kaolin 플록과의 반응효율을 검토하였다. Fig. 4는 저압상태하에서는 기포의 크기가 증가하게 되어 50~90 μ m 정도의 기포발생량이 증가하는 결과(Han et al., 2002)를 나타내는 것으로서, Fig. 5에 의하면 DAF의 전처리 과정에서 발생하는 플록의 크기인 60 μ m 정도의 크기에서는 100 μ m의 플록에 비하여 효율이 감소하게 됨을 알 수 있다. 실험 5에서의 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 즉, 기포의 크기가 증가하면 작은 플록

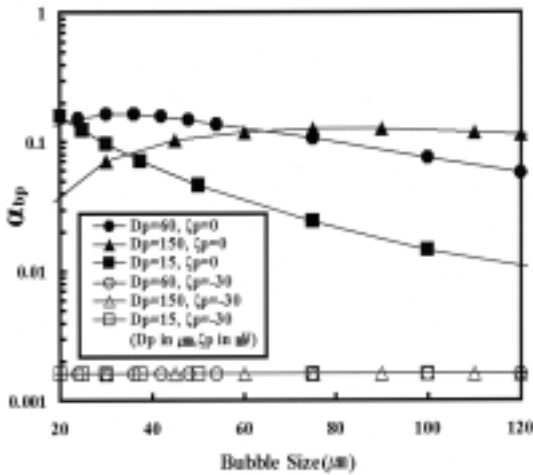


Fig. 6. 플록크기와 기포 크기의 충돌효율

과의 반응효율이 감소하게 됨으로 이로 인한 전체반응 공정의 효율이 감소되는 것을 보이고 있다.

상기의 결과는 모델링을 통한 결과인 Fig. 6에서도 명확하게 나타나 있다.

Fig. 6은 미세기포와 입자의 상대체적을 나타내는 식은 다음과 같은 미분방정식(식1)으로 나타낼 수 있으며, 초기값을 바꾸어 대입하여 계산할 수 있다. 궤적분석에 관한 보다 자세한 설명과 방법은 맨 뒤 참고문헌에 기재한 다른 논문에서 자세하게 나타나 있다 (Mooyoung Han et al., 2001).

$$y' = \frac{dr}{d\theta} = s \frac{V_r}{V_\theta} \quad (1)$$

$$= s \frac{-\cos\theta L(s, \lambda) V_{s12} - \frac{D_{12}}{kT} G(s, \lambda) \nabla \Phi_{12}}{M(s, \lambda) \sin\theta V_{s12}}$$

여기서 L, G, M은 입자와 미세기포간의 중심간 거리(s)와 크기의 비(λ)로 구성된 수리동역학 함수이고, r과 θ는 극좌표로 나타낸 것이고, U는 입자와 미세기포의 상대속도, D는 확산계수, k는 Boltzmann 상수, T는 절대온도, Φ는 입자와 미세기포 사이에 작용하는 힘의 합이다.

상기의 입자크기 변화에 따른 미세기포 크기와와의 충돌반응에서 얻어진 충돌효율계수 a_{bp}의 최대치를 분석한 후, 입자플록의 크기를 미세기포의 크기로 나

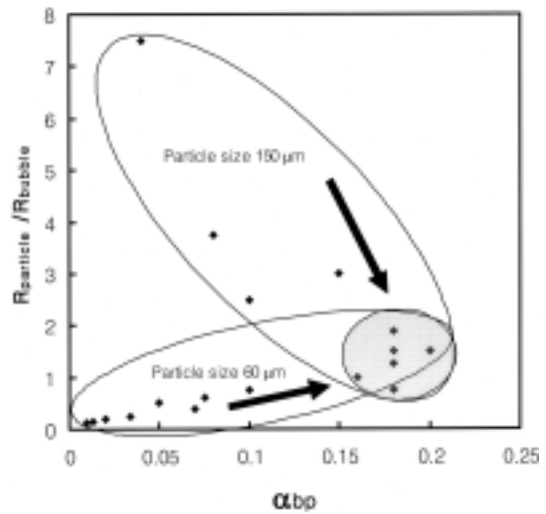


Fig. 7. P/B ratio 와 충돌효율계수의 관계

는 값에 대하여 다시 정리한 것이 Table 3이다. 이것은 입자와 기포의 크기차이 정도가 충돌에 미치는 영향을 알려주는 결과이다.

이 결과에 의하면 $0.75 < P/B \text{ ratio} = (R_{\text{particle}}/R_{\text{bubble}}) < 2.0$ 에 있을 때 충돌반응이 가장 활발하다는 것을 나타내고 있다. 이것은 크기가 유사한 플록과 기포가 서로 크기가 상이한 경우에 비하여 반응이 쉽게 발생하는 것임을 나타내 주는 결과이다. 즉 아래 Fig. 8과 같은 크기 관계가 DAF 반응에 유리하다. 그러나 Fig. 5에 의하면 60μm의 경우에는 저압에서 발생된 큰 기포와 반응이 적게 발생하고 있으나, 100μm에서는 큰 기포와는 물론 반응이 활발하며 작은 기포와도 반응이 상대적으로 감소되지 않고 있음을 보이고 있다.

이것은 Fig. 9(b)와 같이 해석할 수 있다. 즉, 큰 플록의 경우는 작은 기포가 상대적으로 포착이 유리한 물리적 성상을 지니고 있으므로, 충돌을 피하기 힘들다. 반면 Fig.9(a)와 같은 큰 크기의 기포는 기포표면을 타고 빠른 수리학적 흐름을 지니고 있기 때문에 상대적으로 작은 플록(입자)들이 충돌하기 보다는 빠른 흐름을 타고 빗겨 나가기 때문이라고 해석할 수 있다. 따라서 모델링의 가정에서 두개의 입자와 기포가 모두 구형으로 제시되어 있기 때문에 생긴 오차라고 할 수 있으며, 이러한 실제 상황을 고려한다면 상당히 실제 반응을 잘 나타내 주는 결과라고 할 수 있다.

Table 3. 플록크기/기포크기가 충돌반응에 미치는 영향분석

		Bubble Size(μm)					
Particle Size(μm)		20	40	60	80	100	120
15	$R_{\text{particle}}/R_{\text{bubble}}$	0.75	0.375	0.25	0.1875	0.15	0.125
	α_{bp}	0.18	0.07	0.034	0.02	0.013	0.01
60	$R_{\text{particle}}/R_{\text{bubble}}$	3.0	1.5	1.0	0.75	0.6	0.5
	α_{bp}	0.15	0.18	0.16	0.1	0.075	0.05
150	$R_{\text{particle}}/R_{\text{bubble}}$	7.5	3.75	2.5	1.875	1.5	1.25
	α_{bp}	0.04	0.08	0.1	0.18	0.2	0.18

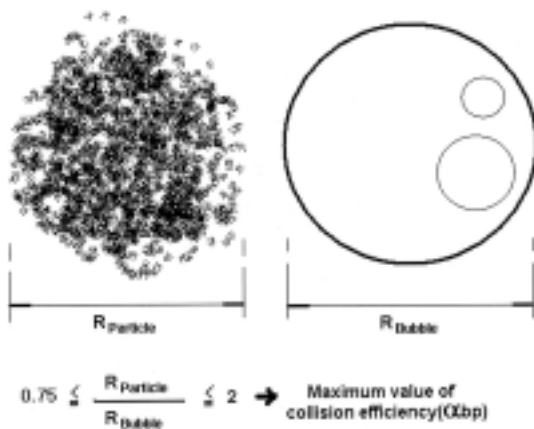


Fig. 8. 크기가 서로 유사한 플록과 미세기포

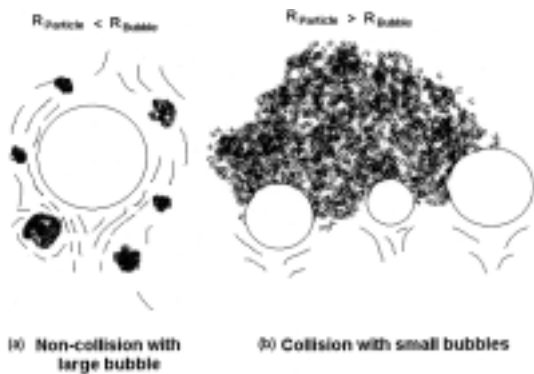


Fig. 9. 크기가 서로 상이한 플록과 미세기포

상기에서 얻어진 결과는 이제까지 무조건 작은 기포만이 DAF 공정에 효율적이라는 기존의 연구결과에 대하여 작은 기포는 작은 플록에, 큰 기포는 큰 플록이 반응 유리하다는 보다 구체적인 결과를 설명해주는 결과라 할 수 있다. 그러나 실제 상황에서는 작

은 기포가 큰 플록 표면에 대부분 포집되기 수월하기 때문에 큰 기포와 작은 플록과의 효율만이 저하되는 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 저압하에서 운전을 한다고 하더라도 플록의 크기를 크게 만들게 되면 상대적으로 반응효율이 좋게 유지할 수 있다는 것을 시사해 주는 결과이다.

4. 결론

- 1) 가압탱크에서 기포발생 노즐사이에 중간 밸브를 설치할 경우 완전 개방하여 운전해야 중간 압력저하를 방지하여 최종 노즐에서 발생하는 기포의 크기를 감소시킬 수 있다.
- 2) 가압탱크와 노즐간의 연결관은 미세기포의 크기제어에 큰 영향을 미치지 못한다.
- 3) 탱크내의 압력을 저하시키면 미세기포의 크기가 증가하여 작은 크기의 플록과 반응효율이 감소하게 되기 때문에 불가피하게 저압상태하에서 운전하는 경우에는 플록의 크기가 커지도록 전처리를 해야 한다.
- 4) P/B ratio는 $0.75 < P/B \text{ ratio} = (R_{\text{particle}}/R_{\text{bubble}}) < 2.0$ 에 있을 때 충돌반응이 가장 활발하다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 한국과학재단 <젊은 과학자 연구비 지원사업; R08-2003-000-10254-0>의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

Aldrich, C., Feng, D., (2000) The effect of frothers on bubble

- size distributions in flotation pulp phases and surface froths, *Minerals Engineering*, **13**(10-11), pp. 1049-1057
- Chen, F., Comez, C.O., Finch, J.A., (2001) Bubble size measurement in flotation machines, *Minerals Engineering*, **14**(4), pp. 427-432
- Mooyoung Han, Wontae Kim, Seok Dockko (2001). Collision efficiency factor of bubble and particle (α_p) in DAF: theory and experimental verification, *Water Science Technology*, **43**(8), pp. 139-1443.
- Han M.Y., Park Y.H. and Yu T.J. (2002), Development of new method of measuring bubble size, *Wat. Sci. & Tech.: Water Supply*, **2**(2), pp 77-83.
- K. Edzwald, J., (1995) Principles and applications of DAF, *Water Science and Tech.*, **31**, pp. 1-23
- R.T.Rodrigues, J. Rubio, (2003) New basis for measuring the size distribution of bubbles, *Minerals Engineering*, **16**, pp. 67-73.