Journal of the Korean Society of Water and Wastewater
Vol. 17, No. 4, pp. 528-533, 2003

상하수도학회지. 논문
17권 4호, pp. 528-533, 2003

DAF에서 기포크기의 영향

Effect of Bubble Size in DAF

박용효[1] · 한무영[2,*]

Park, Yong-Hyo[1] · Han, Moo-Young[2,*]

1 버블테크
2 서울대학교 지구환경시스템공학부

(2003년 4월 28일 접수, 2003년 6월 5일 최종수정논문 채택)

Abstract

Bubble size is one of the most important parameters affecting DAF (Dissolved-Air-Flotation) process. It is generally known that small bubbles are preferred. However, the fact seems to be based on the particle removal efficiency at contact zone only, without considering separation zone. Besides, the effect of bubble size on the overall DAF process has not been fully investigated yet. Therefore, the effect of bubble size on collision efficiency, collision chances, and surface loading rate is calculated using theoretical models, and the results are discussed in this paper.

Key words: Bubble size, collision chances, collision efficiency, DAF, surface loading rate
주제어: 충돌효율, 충돌기회, 용존공기부상법, 표면부하율

1. 연구배경 및 목적

DAF공정은 미세기포를 이용하여 수중의 입자를 수면으로 부상시켜서 제거하는 공정이다. 이 공정에서 핵심이 되는 것은 입자와 기포의 기초특성이다(Han, 2001). 하지만, 기포의 측면에서는 측정상의 어려움으로 인해 이에 대한 연구는 미미하였다. 최근에 들어서는 화상분석을 이용하여 기포의 표면전하를 측정하는 방법이 개발되어 다양한 조건에서의 표면전위를 측정하고, 이에 따른 공정의 효율이 실험적, 이론적으로 연구되었다(Kim, 2001). 기포의 크기는 과거부터 화상분석을 이용하여 측정해왔으나 이 방법은 측정이 간단치 않고, 많은 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하고 기포크기 측정방법을 간편화하기 위하여 최근에 파티클카운터를 이용한 측정방법이 개발되었다(Han et al., 2001; Han et al., 2002c). 이 방법을 이용하여 DAF와 전해부상에서 운전조건에 따른 발생기포의 크기를 측정한 바 있다(Han et al., 2002a; Han et al., 2002b; Park and Han, 2003). 하지만, 현재까지도 기포의 크기가 전체 공정에 있어서의 역할은 구체화 되어있지 않은 상황이다.

DAF공정은 일반적으로 **Fig. 1**과 같은 장방형의 형상을 갖추고 있다. 이 공정은 크게 기포와 입자가 충

*Corresponding author Tel.: +82-2-880-8915, Fax: +82-2-875-1642, E-mail: myhan@gong.snu.ac.kr (Han, M.Y.)

상하수도학회지. 논문
17권 4호. pp. 528-533. 2003

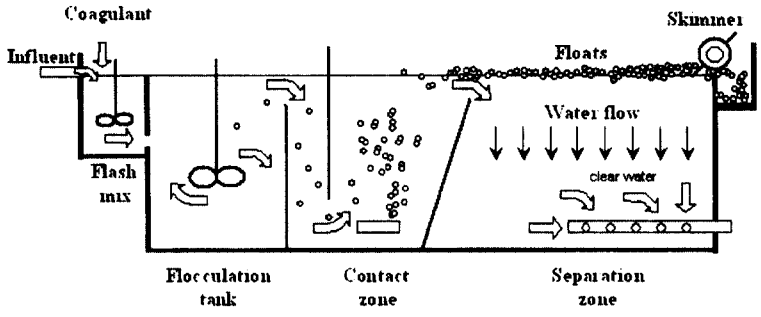
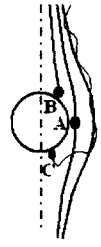
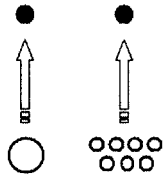
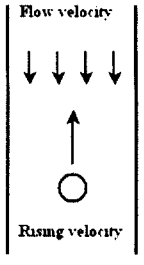


Fig. 1. General schematic of DAF process.

Table 1. Research items at contact zone and separation zone

Contact zone		Separation zone
① Collision efficiency	② Collision chance	③ Surface loading rate (Bubble rising velocity)
 A: Interception B: Sedimentation C: Diffusion	 One large bubble VS several small bubbles	

돌, 부착하는 contact zone과 기포-입자 결합체와 물이 분리되는 separation zone으로 나누어진다. 기포의 크기는 우선적으로 contact zone에서 입자와의 충돌효율, 일정한 기포발생량에 대해서 입자와의 충돌의 기회와 관련된 기포의 개수에 영향을 미친다. 또한, separation zone에서 기포의 상승속도와 관련된 표면부하율에 영향을 미친다. 즉, 기포의 크기에 따른 상승속도가 표면부하율로 표현되는 separation zone에서 수류의 하향속도보다 느리게되면 기포는 유출된다. 이 경우 효율적인 입자제거를 기대할 수 없으며, 후속공정인 여과지가 기포에 의해 폐색되는 문제점도 가지고 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 이론적 모델을 이용하여 기포의 크기에 따른 충돌효율, 충돌기회, 그리고 표면부하율에 미치는 영향을 알아보는 것이다.

2. 연구방법

본 연구에서는 **Table 1**에서와 같이 장방형 DAF 공정을 contact zone과 separation zone으로 나누어 각 zone에서 기포크기의 영향을 살펴보았다. 기포크기에 영향을 받는 충돌효율, 충돌기회, 그리고 표면부하율에 대하여 이론적 모델을 적용하였다.

2.1. 충돌효율

DAF공정의 입자제거의 핵심은 기포와 입자간의 충돌효율이다. 이 효율이 높을수록 입자제거율은 높아지고, 이와 관련된 이론도 다양하게 소개되었다. 그러나, 본 연구에서는 Edzwald 등에 의해 소개된 SCC 모델을 이용하였다(Edzwald et al., 1990; Edzwald, 1995). SCC 모델은 원래 여과공정에서 포집자와 입자간의 충돌효율을 알아보기 위해 개발이

되었으나(Yao et al., 1971), 입자와 포집자(여과사, 또는 기포) 간의 상호작용에 있어서는 여과와 부상분리가 유사하다는 판단으로 DAF에 적용이 되었다.

이 모델에서는 다음 식과 같이 Brownian diffusion (η_D), interception(η_I), differential settling(η_S), inertia (η_{IN}) 에 의한 각각의 충돌효율을 합산하여 전체 충돌효율(η_T)을 계산한다. 그러나, 여기서 입자나 기포가 150μm 이하의 크기에 대하여 inertia(η_{IN})는 그 영향이 거의 없기 때문에 무시한다.

$$\eta_D = [\frac{K_B T^\circ}{g\rho_w}]^{2/3}[\frac{1}{d_p}]^{2/3}[\frac{1}{d_b}]^2$$

$$\eta_I = \frac{3}{2}[\frac{d_p}{d_b}]^2$$

$$\eta_S = [\frac{(\rho_p - \rho_w)}{\rho_w}][\frac{d_p}{d_b}]^2$$

$$\eta_{IN} = [\frac{g\rho_p\rho_w d_b d_p^2}{324\mu^2}]$$

여기서 K_B = Boltzmann's constant
T° = absolute temperature
d_p = particle diameter
d_b = bubble diameter
ρ_p = particle density
ρ_w = water density
μ = water viscosity
g = gravitational constant of acceleration

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_S$$

충돌효율의 계산에 있어서는 위의 식과 같이 SCC 모델을 이용하였으며, 각 조건은 **Table 2**와 같다.

Table 2. Parameters and values used in the SCC model

Model parameter	Values
Bubble size	10-150μm
Particle size	1, 10, 40, 70μm
Water temperature	20°C
Particle density	1.01g/cm^3

2.2. 충돌기회

충돌기회는 특정한 입자와 몇 회의 충돌기회를 나타내는 것이다. 즉, 일정한 기포발생량에 대해서 기포의 크기에 따라 생성되는 기포의 개수, 즉 충돌기회가 변화한다. 특정한 기포발생량(V_T)에 대해서 기포의 개수(충돌기회, n_b)는 특정크기의 기포 한 개의 부피(V_i)와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$n_b = \frac{V_T}{V_i} = \frac{6V_T}{\pi d_i^3} = \frac{6V_T}{\pi} \times \frac{1}{d_i^3}$$

여기서, 양변에 로그를 취한 다음 $\log n_b = N$, $\log d_i = D$로 치환한 후 $V_T = 1ml$인 경우에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$N = 12.3 - 3D$$

특히, 큰 기포 하나와 동일한 체적을 가지는 작은 기포의 개수는 아래 식과 같다.

$$n_b = \frac{V_l}{V_s} = [\frac{d_l}{d_s}]^3$$

이와 같이 충돌기회는 특정 기포발생량에 대한 특정 직경의 기포의 개수와의 관계식을 가지고 계산할 수 있다.

2.3. 표면부하율

DAF공정에서 수류의 하향유속으로 표현되는 표면부하율은 기포의 상승속도에 따라 결정될 수 있다. 즉, 표면부하율은 기포의 상승속도보다 낮을 때에만 유효하며, 이보다 높을 때는 기포가 유출되어 전체공정의 처리효율이 현저하게 감소하게 된다. 일반적으로 기포의 상승속도는 다음 식과 같이 스토크식을 사용하여 계산할 수 있으며(AWWA, 1999), 본 연구에서는 20°C의 경우를 적용하였다.

상하수도학회지, 논문
17권 4호, pp. 528-533, 2003

$$V_b = \frac{g(\rho_w - \rho_b)d_b^2}{18\mu}$$

여기서 d_b = bubble diameter

ρ_p = particle density

ρ_w = water density

μ = water viscosity

g = gravitational constant of acceleration

3. 연구결과

3.1. 충돌효율

기포크기에 따른 특정크기의 입자와의 충돌효율을 SCC 모델을 이용하여 계산한 결과는 **Fig. 2**와 같다. 모든 입자에 대해서 기포의 크기는 작을수록 높은 충돌효율을 나타낸다. 즉, contact zone에서 입자제거율 측면에서는 기포의 크기는 작을수록 유리하다는 것을 알 수 있다. 이러한 측면에서 작은 기포를 생성하기 위한 기포발생장치나 특수노즐 개발을 위한 연구가 필요하다.

동일한 기포크기에 대해서는 입자크기가 클수록 충돌효율이 높게 나타나고 있다. 즉, 오랜 플록형성시간 등으로 큰 플록을 만들어서 입자제거 효율을 높일 수 있다. 하지만, 이 부분에 있어서는 이미 실험적으로 핀플록 정도(10-30μm) 크기면 DAF에서 효과적으로 제거된다는 사실이 밝혀졌기 때문에 실질적으로는 필요하지 않다(Edzwald et al., 1992).

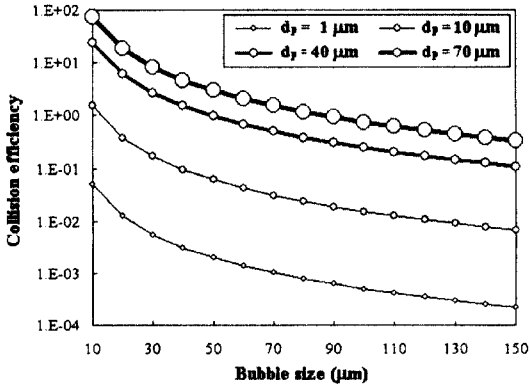


Fig. 2. Collision efficiency depending on bubble and particle size.

3.2. 충돌기회

특정 기포 발생량에 대하여 기포의 크기에 따른 개수는 **Fig. 3**과 같은 관계를 가진다. 즉, 기포의 크기가 작을수록 입자와 반응하는 기포의 개수(충돌기회)는 현저히 증가하며, 결과적으로 입자의 제거에 유리하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 DAF에서 발생되는 기포의 크기는 150μm 이하이다. 이 범위에 있어서 150μm 크기의 기포에 대하여 이에 상대적인 기포의 개수비는 **Fig. 4**와 같다. 즉, 150μm 크기를 기준으로 이 기포 하나의 체적이면 30μm 크기의 기포 125개와 같다. 특히, 기포의 크기가 크다는 것은 전체 공정에 있어서 충돌효율이 낮은 적은 개수의 기포가 생성된다는 것이기 때문에 공정의 효율적 에너지 활용측면에서도 작은 기포의 생성이 바람직하다.

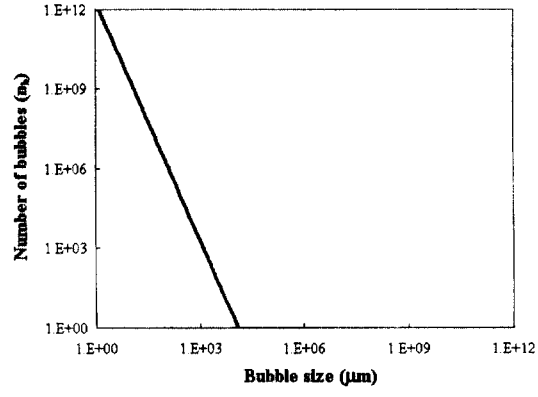


Fig. 3. Number of bubbles depending on bubble size.

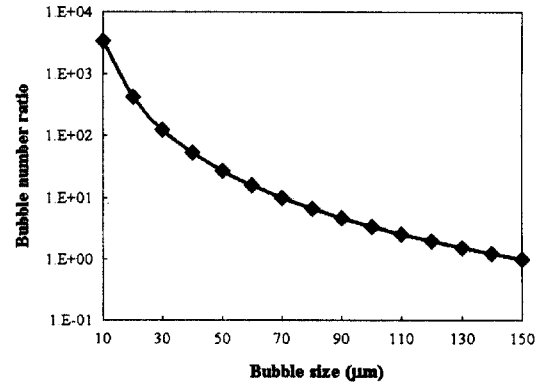


Fig. 4. Bubble number ratio relative to a bubble sized 150μm.

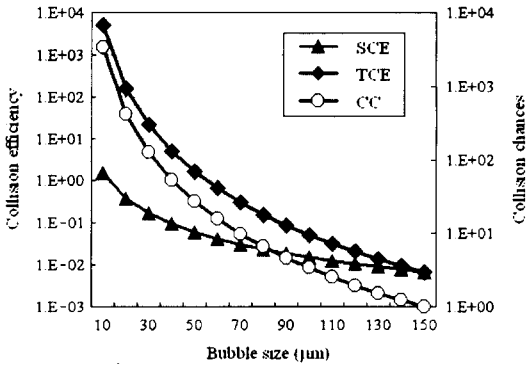


Fig. 5. Total collision efficiency (TCE) based on single collision efficiency (SCE) coupled with collision chances (CC).

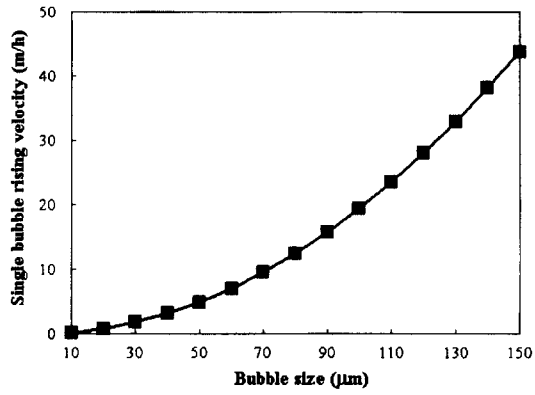


Fig. 6. Single bubble rising velocity dependi ng on bubble size.

여기서, 하나의 입자의 제거효율은 특정크기의 기포와의 충돌효율 및 그 입자와 반응할 수 있는 기포의 충돌기회(기포의 개수)의 함수이다. 즉, 특정한 입자 하나에 대한 기포의 전체충돌효율(Total collision efficiency; TCE)은 하나의 기포에 의한 충돌효율(Single collision efficiency; SCE)과 충돌기회(Collision chances; CC)의 곱으로 나타낼 수 있다. **Fig. 5**는 10μm 크기의 입자에 대한 SCE, CC 및 TCE를 나타내고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 SCE와 CC는 기포의 크기가 작을수록 높아진다. 여기서, 하나의 특정한 입자에 있어서 그 입자의 제거효율, 즉 전체충돌효율 값을 살펴보면 기포의 크기가 작은 쪽이 월등하게 유리해진다는 것을 알 수 있다.

3.3. 표면부하율

Separation zone에서 기포의 상승속도, 즉 적용 가능한 표면부하율은 스토크식에 따라 **Fig. 6**과 같다. 여기서는 기포의 크기가 클수록 높은 속도로 상승하고, 그 만큼 높은 표면부하율(수류의 하향속도)에 휩쓸려 유출되지 않는다. 따라서, 기포의 크기가 클수록 동일한 부지에 대해서 처리상의 양적 측면에서는 유리하다는 것을 알 수 있다. DAF에서 기포의 크기는 30-40μm 정도인 것으로 알려져 있는데, 실제 운전 가이드라인은 10-20m/h 정도의 표면부하율을 제시하고 있다. 즉, 실제 적용 가능한 표면부하율은 기포 하나의 상승속도보다 높게 나타나는데(Kawamura, 2000), 이는 우선적으로 separation zone 전단면에서 수류의 하향속도가 일정하지는 않기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 실제로는 여러 개의 기포들이 동시에 상승하기 때문에 이 경우는 한 개의 기포가 상승하는 속도보다는 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기포의 크기가 DAF공정에 미치는 영향을 이론적 모델을 이용하여 살펴보았으며, 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1) 입자제거효율, 즉 충돌효율과 충돌기회의 측면에서는 작은 기포가 유리하다.

2) 표면부하율 측면에서는 큰 기포가 유리하다.

3) 위의 두 가지를 모두 만족시킬 수 있도록 작은 기포를 안정적으로 발생시키면서 높은 표면부하율로 운전할 수 있는 기술이 필요하다.

본 연구를 통하여 DAF공정에서 기포의 크기는 작을수록 좋은 것만은 아니라는 것을 알 수 있었다. 즉, 처리수의 질적 측면이 중요한 경우에는 작은 기포가 유리할 것이고, 처리수의 양적 측면이 중요한 경우에는 큰 기포가 유리할 것이다. 따라서, 처리대상 및 처리목적에 따라 최적 기포의 크기는 다르다고 할 수 있다.

사사

본 연구는 건설교통부 2001 산·학·연 공동연구개발사업(과제번호: 2001-자유 A08) 지원으로 수행

되었으며, 또한 서울대학교 공학연구소의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

American Water Works Association (1999) *Water Quality and Treatment 5th Ed*, McGraw Hill, USA.

Edzwald, J.K. (1995) Principles and applications of dissolved-air-flotation, *Wat. Sci. & Tech.* **31**(3-4). pp. 1-23.

Edzwald, J.K., Malley, J.P., and Yu, C. (1990) A Conceptual Model for Dissolved Air Flotation in Water Treatment., *Water Supply*, **8**, pp. 141-150.

Edzwald, J.K., Walsh, J.P., Kaminski, G.S., and Dunn, H.J. (1992) Flocculation and Air Requirements for Dissolved-Air-Flotation, *J. of AWWA*, **84**(3).

Han M.Y. (2001) Modeling of DAF: the effect of particle and bubble characteristics, *J. of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **51**(1), pp. 27-34.

Han M.Y., Park Y.H., Kwak D.H. and Kim I.K. (2001), Development of measuring bubble size in flotation process using on-line particle counter, *J. KSWW*, **15**(6), pp. 559-565.

Han M.Y., Park Y.H., Lee J. and Shim J.S. (2002a) Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation, *Wat. Sci. & Tech.: Water Supply*, **2**(5-6). pp. 41-46.

Han M.Y., Park Y.H., Lee J. and Shim J.S. (2002b), The size characteristics of micro-bubbles in DAF according to pressure conditions, *J. KSWW*, **16**(2), pp. 177-182.

Han M.Y., Park Y.H. and Yu T.J. (2002c) Development of new method of measuring bubble size, *Wat. Sci. & Tech.: Water Supply*, **2**(2), pp. 77-83.

Kawamura, S. (2000), *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities. 2th Ed.*, John Wiley & Sons, INC., USA.

Kim W.T. (2001) A Study of Removal Mechanism from Fundamental Characteristics of Micro-bubbles and Particles in Electro-flotation, M.S. Thesis, Seoul National University.

Park Y.H. and Han M.Y. (2003) Effect of generation conditions on bubble size in electro-flotation, *J. of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, Submitted.

Yao, K.M., M.T., Habibian, and C.R. O'Melia (1971) Water and Wastewater Filtration: Concepts and Applications, *Environmental Sci. & Tech.*, **5**(11).