

부상분리 공정의 접촉영역 모델을 이용한 이산화탄소와 공기 기포의 충돌 및 입자 분리효율 비교 평가

양종원^{1a} · 최용호^{1b} · 채인석^{1c} · 김미숙² · 정용훈^{3a} · 김태금^{3b} · 곽동희^{1d,3c,†}

¹전북대학교 생리활성소재학과

²목포대학교 환경공학과

³전북대학교 정읍산학협력지원센터

Comparative Evaluation on Collision and Particle Separation Efficiency between CO₂ Bubbles and Air Bubbles Using Contact Zone Model of Flotation Process

Yang, Jong-Won^{1a} · Choi, Yong-Ho^{1b} · Chae, In-Seok^{1c} · Kim, Mi-Sug² ·
Jeong, Yong-Hoon^{3a} · Kim, Tae-Geum^{3b} · Kwak, Dong-Heui^{1d,3c,†}

¹Dept. of Physically Active Material Science, Chonbuk National University

²Dept. of Environmental Engineering, Mokpo National University

³Center for Jeongeup Industry-Academy-Institute Cooperation, Chonbuk National University

(Received 25 November 2018, Revised 23 January 2019, Accepted 24 January 2019)

Abstract

In recent years, carbon dioxide (CO₂) bubbles emerged as the most widely applied material with the recycling of sequestered storage to decrease global warming. Flotation using CO₂ as an alternative to air could be effective in overcoming the high power consumption in the dissolved air flotation (DAF) process. The comparison of DAF and DCF system indicated that, the carbon dioxide flotation (DCF) system with pressurized CO₂ only requires 1.5 ~ 2.0 atm, while the DAF system requires 3.0 ~ 6.0 atm. In a bid to understand the characteristics of particle separation, the single collector collision (SCC) model was used and a series of simulations were conducted to compare the differences of collision and flotation between CO₂ bubbles and air bubbles. In addition, laboratory experiments were sequentially done to verify the simulation results of the SCC model. Based on the simulation results, surfactant injection, which is known to decrease bubble size, cloud improved the collision efficiency of CO₂ bubbles similar to that of air bubbles. Furthermore, the results of the flotation experiments showed similar results with the simulation of the SCC model under anionic surfactant injection. The findings led us to conclude that CO₂ bubbles can be an alternative to air bubbles and a promising material as a collector to separate particles in the water and wastewater.

Key words : Bubble, Carbon dioxide, Collision, Dissolved air flotation, Flotation

^{1a} 석사과정 (M.S. Student), didwhf2@daum.net, <http://orcid.org/0000-0002-5543-9112>

^{1b} 석사과정 (M.S. Student), so23gogo@naver.com, <http://orcid.org/0000-0001-5754-2538>

^{1c} 석사과정 (M.S. Student), dlstjr2379@naver.com, <http://orcid.org/0000-0002-4536-1243>

² 초빙교수(Visiting Professor), mskim.han@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8743-9280>

^{3a} 연구교수(Research Professor), yhjyoung0516@hanmail.net, <http://orcid.org/0000-0002-7501-8729>

^{3b} 교수(Professor), tgkim@jbnu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0003-4157-4986>

^{1d,3c,†} Corresponding author, 교수(Professor), kwak124@jbnu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0001-5692-7372>

1. Introduction

지구 온난화와 기후변화에 대응하기 위해서 다양한 기술이 요구되고 있으며, 특히 주요 온실가스로 지목되고 있는 이산화탄소는 배출 억제와 가스 포집 및 재활용 등의 다양한 기술개발과 실용화 등이 진행되고 있다. 다양한 기술로 포집된 이산화탄소를 활용하기 위한 수처리 분야의 기술로 이산화탄소 가스를 입자분리의 콜렉터로 이용하는 DCF (dissolved carbon dioxide flotation)공정이 개발된 바 있다. 이 DCF공정은 수처리 현장에서 전통적으로 적용되어져 온 DAF (dissolved air flotation)공정의 대안이 될 수 있으며, DAF에 비하여 포화장치(saturator)를 낮은 압력으로 운전이 가능함에 따라 적은 동력비로 운전비용이 절감될 수 있다 (Kwak and Kim, 2013).

최근 DAF 기술은 입자와 기포간의 수질화학에 대한 이론적 접근(Michaux et al., 2018; Xing et al., 2017)을 비롯하여, 부상분리 기술이 다양해짐에 따라 기존 부상공정의 세부 기작(mechanism)과 설계기법을 재정립하는 연구 (Prakash et al., 2018)와 조류입자를 주된 처리대상으로 하는 조류수거에 대한 연구(Zhang and Zhang, 2019)가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 다양한 부상기술의 조건에 부합하는 모델에 대한 검토와 평가가 필요한 상황이다.

DAF의 기본원리는 단일포집자 충돌효율(single collector collision efficiency, SCCE, η_T)의 개념을 사용하여 기포 표면에서의 입자침착(particle deposition)을 나타낸다. DAF 공정에서 플록과 기포간의 결합을 유도하는 기포-플록 접촉효율은 Malley and Edzwald (1991)에 의해 고안된 단일포집자 충돌(Single-collector collision, SCC) 모델을 통하여 성공적으로 해석되어 왔다(Malley 1990; Malley and Edzwald, 1991). 기포와 플록간의 충돌과 부착의 기작으로 수처리가 진행되는 점을 고려할 때, 저탄소 기술의 일환으로 개발되어진 용존이산화탄소(dissolved carbon-dioxide, DCF) 공정 (Lee et al., 2012)에서 적용되는 이산화탄소 기포와 플록의 충돌 부착을 통한 입자분리 특성도 단일포집자 충돌 모델을 통하여 해석이 가능하다.

단일포집자 충돌효율은 간단히 플록-기포 접근율(floc-bubble approach rate)에 대한 플록-기포 충돌율(floc-bubble collision rate)로써 표현될 수 있으며 총 SCCE, η_T (Edzwald, 1995)는 다음 4가지 각 요소의 합으로 나타낼 수 있다(Zabel, 1985).

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_G + \eta_{IN} \tag{1}$$

여기서, η_D 는 브라운 확산(Brownian diffusion), η_I 는 포착(interception), η_G 는 중력침강(gravity force), η_{IN} 는 관성(inertia)이며 각 요소와 관련된 효율은 다음에 나타낸 식 (2) ~ 식(5)와 같다.

$$\eta_D = 6.18(k_B \cdot T/g\rho_w)^{2/3}(1/d_p)^{2/3}(1/d_b)^2 \tag{2}$$

$$\eta_I = 3/2(d_p/d_b)^2 \tag{3}$$

$$\eta_G = (\rho_p - \rho_w)/\rho_w(d_p/d_b)^2 \tag{4}$$

$$\eta_{IN} = g\rho_p d_b d_p^2 / (324\nu^2 \rho_w) \tag{5}$$

총 SCC효율에 미치는 영향인자는 기포의 직경, 플록입자의 크기 및 비중, 물의 비중 및 동점성, 입자의 밀도 등이다. 원수중의 불순물이 부상공정 이전에 적절히 응집되면 유입되는 플록의 크기는 100 ~ 1,000 μm 정도이다(Francois, 1988). 이것은 실제 부상공정에서 포착(interception)이 가장 중요한 기작임을 뜻한다. 식 (3)으로 볼 때 크고 강하고 안정화되고 단단한 플록을 만들기 위해서는 응집에 대한 중요성, 충분한 공기용해 등 적절한 시스템이 요구된다.

실제의 부상조에 유입되는 기포는 각각의 흐름방향과 속도가 크게 다르지 않고 기포구름(bubble-cloud)으로 이동하며 플록의 침전속도는 기포의 상승속도에 비하여 매우 작으므로, 안정된 층류에서의 각각의 기포와 플록간의 상대적 접근속도는 기포의 상승유속으로 요약 표현된다. 수중에서 일반적으로 150 μm 이하를 나타내는 기포의 Reynolds number는 층류 영역($Re < 1$)이고 open flow (Afkhani et al., 2019)이기 때문에, Stoke 방정식과 기포체적농도(bubble volume concentration: BVC, Φ_b), 기포수(N_b) 등의 관계를 이용하여 다음의 식 (6) ~ 식 (7)로 나타내어진다.

$$U_{pb} = \frac{g\rho_w d_b^2}{18\mu} = \frac{gd_b^2}{18\nu} \tag{6}$$

$$\Phi_b = \frac{\pi d_b^3 N_b}{6} \tag{7}$$

포화장치(saturator)에 의해 형성된 기포가 수중의 플록과 결합하여 입자 분리시키는 동역학은 1차 방정식으로 다음의 식 (8)과 같이 표현된다.

$$dN_p/dt = -(\alpha_{pb}\eta_T)A_b U_{pb} N_b N_p \tag{8}$$

식 (6) ~ 식 (7)을 활용하여 상기 식 (8)에 대입한 후 식 (9)과 같이 표현된다.

$$\frac{dN_p}{N_p} = -\frac{1}{12} \frac{\alpha_{pb}\eta_T d_b \Phi_b g}{\mu} dt \tag{9}$$

결국 기포구름(bubble-cloud)에 의하여 입자분리되는 플록의 fraction은 일반적인 1차 반응식의 형태로 상기 식 (8)으로 표현될을 알 수 있다. 이상적인 plugflow의 경우에서, 반응조에서 모든 플록은 동일한 체류시간을 가지며 식 (8)은 식 (9)과 같은 기포의 여과효율 방정식으로 전환될 수 있다. 아래 식 (10)은 접촉영역내의 기포에 대한 입자 분리효율을 설명하며, 본 연구에서는 식 (10) 입자분리효율(X)을 최종 제거효율로 산출하기 위해 모델에 적용하였다.

$$X = \frac{N_{p,i} - N_{p,e}}{N_{p,i}} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{12} \frac{\alpha_{pb}\eta_T d_b \Phi_b g}{\mu} \tau\right) \tag{10}$$

본 연구에서는 부상분리 공정에서 입자 포집자(particle collector)로 주입되는 CO₂ 기포와 공기 기포의 입자 충돌 효율을 SCC 모델을 이용하여 모의하고 이를 바탕으로 여러 영향인자들로 표현되는 입자 분리효율을 비교 평가하였다. 또한 별도 제작된 실험실 규모의 실험장치에서 기존의 DAF 공정과 DCF 공정과의 입자 분리효율 실험을 실시하고 그 결과를 SCC 모의실험 결과와 비교하여 상호 검증을 실시하였다. 본 모의평가 및 실험을 통한 검증결과는 부상 분리 수처리 현장에서 비교적 간편한 접촉영역 모델인 SCC를 이용하여 DCF 공정의 실용적 타당성에 대한 기초적 정보를 제공할 수 있을 것으로 여겨진다.

2. Materials and methods

2.1 실험장치

본 연구에서 DCF 실험을 실시하기 위하여 실험실 규모로 회분식 DCF pilot plant를 제작하였다. 또한 전형적인 DAF와 DCF의 실험을 병행하여 비교 실험을 하였다. Saturator의 부피는 약 7.4 ℓ이며, 일정한 압력을 견뎌낼

수 있도록 스테인리스로 제작하였다. 반응조의 크기는 직경 7 cm의 원형 아크릴로 회분식 반응기를 제작하여 실험을 실시하였다. 또한 DCF와 DAF pilot plant에는 응집제 투입 및 교반장치를 설치하여 적절한 약품 혼합 및 완속 교반을 실시한 후 형성된 플록과 미세 기포가 원활히 결합할 수 있도록 하였다. 가압탱크의 정확한 압력을 가하기 위하여 saturator 상부에 압력계를 설치하였고, Air bomb와 CO₂ bomb를 사용하여 본 실험을 실시하였다. 또한, 특정 장치에 의한 부상특성의 변동을 줄이기 위하여 본 연구에서는 별도의 diffuser나 노즐을 사용하지 않았으며, 본 연구에서 사용한 DCF와 DAF pilot plant의 모식도는 Fig. 1에 나타났다.

2.2 실험 및 운전 방법

본 실험에서 사용된 시료는 수돗물에 Kaolin을 섞은 표준인공시료(탁도 50~60 NTU)를 제작하여 사용하였으며, 실험에 사용된 약품은 통상 응집 및 부상처리에서 사용되는 PAC (poly aluminum chloride)를 선정하고, 응집제에 요구되는 알칼리도의 보충을 위하여 소석회(Ca(OH)₂)를 사용

Table 1. Dimension of the DAF and DCF pilot plant and equipment

Compressor	Saturator	Reactor
Inflow air 111 ℓ/min	Diameter 148 mm	Length 441 mm
Outflow air 60 ℓ/min	Height 430 mm	Width 441 mm
80 bar (116 psi), 1,700 rpm	Total volume 7.4 ℓ	Height 594 mm
		Total volume 115 ℓ
Filter, Controller	Recycling tank	Recycling pump
Max pressure 9.9 kgf/cm ²	Recycling pot height 100 mm	Capacity 40 ℓ/min
Control range 0~10 kgf/cm ²	Head space height 94 mm	Total head 12 m
Air flow rate 0~10 ℓ/min	Effec. volume 78 ℓ	
	Total volume 115 ℓ	

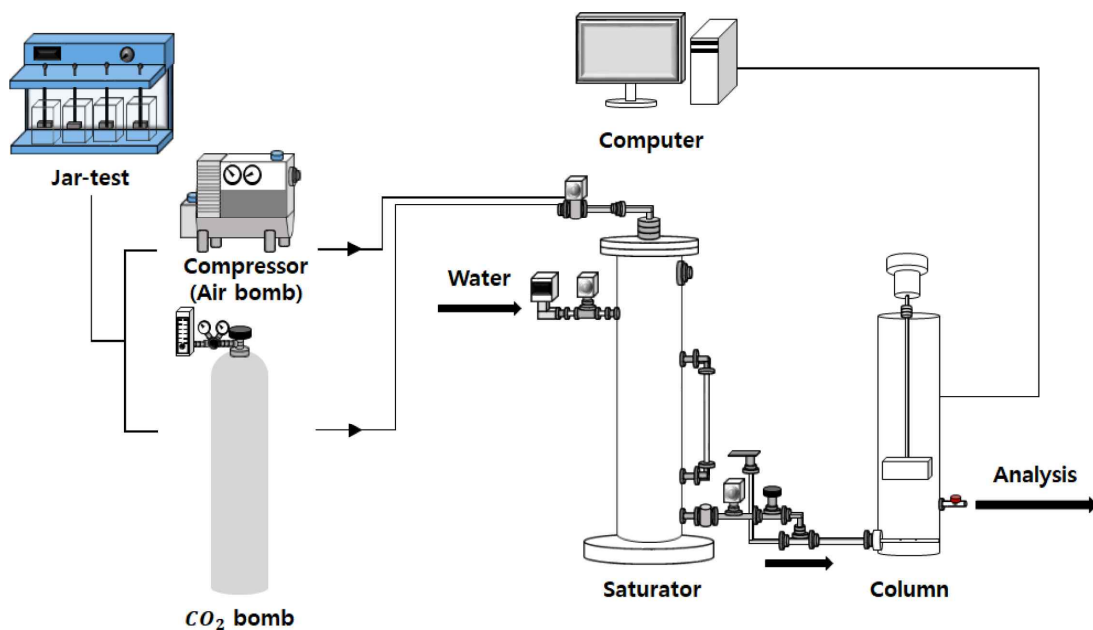


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale device for flotation experiments.

하였다. 응집제의 주입은 Jar-test를 실시한 후 확정된 최적의 응집제 주입율(ppm)로 운전하였다.

공기압축기(compressor)를 이용하여 대기 중 공기를 saturator에 가압하였고, CO₂는 CO₂ bomb을 통하여 saturator에 가압하였다. Saturator에서 공기와 CO₂를 용해시킨 가압수(milky water)는 column내 하단부에 연결된 산기관을 통해 주입한 후 대기압에서 미세기포를 발생시켰다.

DCF pilot plant에서의 부상 시간은 10분으로 하였으며, 부상이 끝난 후 부상컬럼 하단 20% 지점에서 시료를 채취하여 분석하였다. DAF 공정과 DCF 공정은 동일하게 응집제를 주입하였으며 부상 시간 및 채취지점도 동일 시 하였다. Kwak and Kim (2013)의 연구에 따르면 DCF saturator는 1.0~3.0 atm으로 운전 되었으며, 비교 대상인 DAF의 가압탱크는 3.0~6.0 atm으로 운전되었다(Zabel, 1985). 본 실험에서는 DCF 공정은 1.1~2.5 atm, DAF 공정은 3.0~6.0 atm으로 운전하였다. Saturator의 압력은 유입 측을 기준으로 변화시켰으며 각 압력조건 변화에 대한 입자분리효율을 평가하였다.

한편, 본 연구에서 DAF 및 DCF의 충돌과 관련된 제반효율의 예측과 모의(simulation)를 위하여 일반적으로 사용되는 S/W인 MATLAB (R2018a)을 활용하여 그 결과를 비교 평가하였다. 모델에 적용된 인자들은 Table 2로 제시하였다.

Table 2. Simulation parameters for contact zone model

Parameters		Value	
Single collector collision efficiency	k_B	1.38×10^{-23} J/K	
	T	293 K (20°C)	
	g	9.81 m/s ²	
	ρ_p	1003 kg/m ³	
	ρ_w	998.23 kg/m ³	
	d_b	30, 60, 95 μ m	
	d_p	0.01 ~ 1,000 μ m	
	ν	1.007×10^{-6} m ² /sec	
	α_{pb}	0.3, 0.6	
Particle removal efficiency	η_T	DAF	0.5 ~ 0.9
		DCF	0.5 ~ 0.8
		DCFS	0.5 ~ 0.9
	d_b (μ m)	DAF	40 ~ 100*
		DCF	40 ~ 164**
		DCFS	3 ~ 50.6***
Φ_b (L/m ³)	DAF	2.4 ~ 4.8***	
	DCF	0.6 ~ 3.7***	
	DCFS	1.5 ~ 6.1***	
	τ	600 sec	
	μ	0.001 kg/m · s	

Note) * Dokko et al. (2004); Han et al. (2009); Leppinen (2000), ** Kwak et al. (2011), *** Yoo (2011).

3. Results and Discussion

3.1 기포와 입자의 충돌효율

부상공정에서는 입자와 기포의 부착을 위하여 응집을 통한 입자의 표면전위뿐만 아니라 크기의 상승을 꾀한다. 본 연구에서는 입자 크기의 관점에서 기포와 입자의 충돌효율을 살펴보았다. 먼저 DAF 공정의 일반적 조건 즉, 기포의 평균직경 60 μ m (Haarhoff and Edzwald, 2004; Leppinen and Dalziel, 2004), 플록의 비중 1,003 kg/m³ (Lagvankar and Gemmel, 1968), 평균수온 20 °C 등의 수처리 조건에 있어서 기포와 입자의 충돌효율을 모의하였다. 충돌 효율은 상기 식 (1)에 제시된 바와 같이 SCCE에 관련된 4가지의 주요 인자에 따라 모의하고 이 합을 다음의 Fig. 2에 나타내었다.

기포와 입자의 충돌효율 모의결과에 의하면, 다음의 Fig. 2와 같이 총 충돌효율(η_T)은 플록의 직경이 1 μ m 이하의 범위에서는 브라운확산 효율(η_D)이 주 영향 인자이고 1 μ m 이상의 범위에는 포착 효율(η_I)이 주요한 영향을 미치며 침전 효율(η_C)과 관성 효율(η_M)의 영향은 상대적으로 미소한 것으로 나타났다. 수처리에서 플록 크기는 5 μ m 이상이며 이 범위에서 총 충돌효율은 포착 기작(interception mechanism)에 의하여 주로 조절되어 진다. Fig. 2에서 기포직경 60 μ m에 있어서 flocc의 직경크기가 약 30 μ m를 초과하면 총 충돌효율(η_T)이 최소 한번 이상 접촉하게 되고 플록의 크기가 커질수록 접촉기회는 증가하게 된다. 그러나 기포가 갖고 있는 부력보다 플록의 크기가 커지게 되면 아무리 플록에 많은 기포들이 접촉하더라도 플록의 크기에 비해 기포의 부력이 작아서 부상 하다가 침전하게 된다.

가압식 기포발생장치는 DAF 공정에서 saturator를 활용하여 전통적으로 사용되어져 왔으나 최근 ejector 형식의 다양한 기포 발생장치가 개발되어 현장에 활용되어지고 있으며 이에 따라 부상공정에서 운전되는 기포 크기의 범위 또한 넓어지고 있다. 다음은 부상공정에서 주입되는 기포의 평균크기를 10 ~ 100 μ m로 확대하여 기포의 크기에 따라

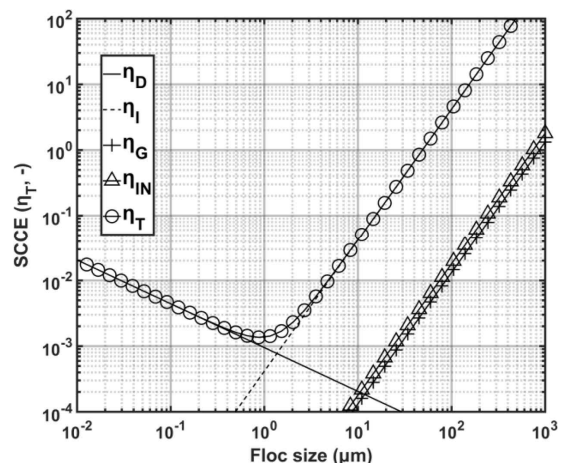


Fig. 2. Single-collector collision efficiency depending on floc size.

나타나는 충돌효율을 입자의 크기 관점에서 모의하였다.

모의한 결과는 다음의 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 평균기포 입경의 크기가 작아질수록 충돌효율이 증가할 수 록 요구되는 입자의 크기 또한 작아짐을 볼 수 있다. 이는 작은 기포를 활용하여 부상분리를 수행할 경우 입자분리의 효율을 높일 수 있을 뿐 아니라 응집시간의 단축 등을 도모할 수 있다는 것을 의미한다.

3.2 DAF와 DCF의 충돌효율의 비교 평가

전통적인 DAF 공정에서 4.0 atm으로 운전되었을 때 측정된 기포 평균 직경 40 μm (Dokko et al., 2003; Han et al., 2009)와 1.8 atm에서 운전된 DCF의 기포 평균 직경인 95 μm (Kwak et al., 2011)를 각각 적용하여 충돌효율을 모의하였다. 각 공정의 최적 조건으로 모의한 단일포집자 충돌효율은 다음의 Fig. 4와 같이 나타났다. 본 모의결과 Fig. 4에 나타난 결과로 볼 때, 기포의 크기가 충돌효율에서의 중요한 인자로 나타났다. 앞 4.1에서 모의한 바와 같이, 기포의 입경에 따라 기포-입자간 충돌효율이 달라지므로 기포의 평균입경이 작은 DAF 공정이 DCF 공정보다 충돌효율이 더 높게 나타났다. 이는 당연한 결과로 볼 수 있으며, DCF는 매우 적은 동력비가 요구되는 장점에도 불구하고 DCF공정에서 발생하는 기포의 평균입경을 감소하는데 한계가 있는 이상 DCF의 충돌효율은 DAF의 충돌효율보다 높을 수는 없을 것으로 보여 진다.

한편, 기포의 평균입경은 계면활성제 등을 활용하면 크기를 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있으며(Grieves et al., 1970; Kwak and Kim, 2015), 다음 Fig. 4에는 음이온 계면활성제(sodium dodecyl sulfate: SDS)를 투입한 경우인 DCFS (dissolved carbon dioxide flotation added surfactant)의 기포 평균입경 30 μm (Yoo, 2011)를 적용하여 기포-입자의 충돌효율을 모의한 결과를 나타낸다.

이와 같이 음이온 계면활성제를 주입한 경우 입자의 충돌효율이 상승한 이유는 계면활성제가 계면장력의 저하를 유발하여 기포의 발생을 용이하게 하고 발생된 기포의 크

기도 가능한 한 작게 형성되게 하는 것(Yoo, 2011)이 근본적인 원인으로 여겨진다.

3.3 접촉시간에 따른 입자 분리효율

접촉영역내의 입자분리효율(X)은 식 (10)에 나타낸 바와 같이 접촉영역 내에서 운전되는 기포의 평균입경에 따른 기포-입자간 충돌효율(η_T)을 기초로, 초기 부착효율(initial attachment efficiency, α_{pb}), 기포의 체적농도(ϕ_b), 체류시간(τ) 등의 운전인자와 점성계수(μ)와 같은 수처리 조건에 의하여 복합적인 요소가 관여되어 결정된다. 여기서 초기 부착효율은 부상분리공정에서 입자의 특성에 따라 결정되는 변수로서, 입자가 미세 기포에 부착되는 성질(affinity)에 따라 실험을 통해 결정된다. 보통 본 실험에서 적용된 카올린(kaolin)입자와 같은 무기입자의 경우 DAF 공정에서 0.3 ~ 0.4 (Kwak et al., 2005)가 적용된다. 본 연구에서는 DAF와 DCF 공정의 초기 부착효율 계수 0.3과 DCFS 공정의 초기 부착효율 계수 0.6 (Yoo, 2011)을 이용하여 모의실험 결과를 토대로 pilot plant의 실험결과를 비교하였다.

다음은 앞에서 모의한 운전압력의 변화에 따라 달라지는 입자의 분리 효율의 모의결과를 검증하기 위하여 실제 실험값과 비교 실험을 실시하였다. Fig. 5의 경우 DAF, DCF, DCFS 공정의 입자 분리효율의 모의결과 및 실험결과를 체류시간에 따라 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 모의결과에 의하면, DAF에서는 입자 분리효율이 체류시간 300 sec를 초과 할 때 3~6 atm의 압력범위에서 모의값(predicted values)의 분리효율이 100%에 도달하였다. 이에 비하여 DCF에서는 입자 분리효율이 체류시간 180 sec를 초과 할 때 1.5~2.5 atm의 압력범위에서 예측된 분리효율이 100%에 도달하였고, DCFS의 경우에는 입자 분리효율이 체류시간 120 sec를 초과 할 때 1.5~2.5 atm의 압력범위에서 분리효율이 100%에 도달하는 것으로 나타났다.

한편, 여기서 주목할 만한 것은 예측값과 실제 실험에 의한 관찰값(observed values)의 차이가 크게 나타나고 있는 바, DAF에서는 접촉시간 300 sec를 기준으로 모의값과 실

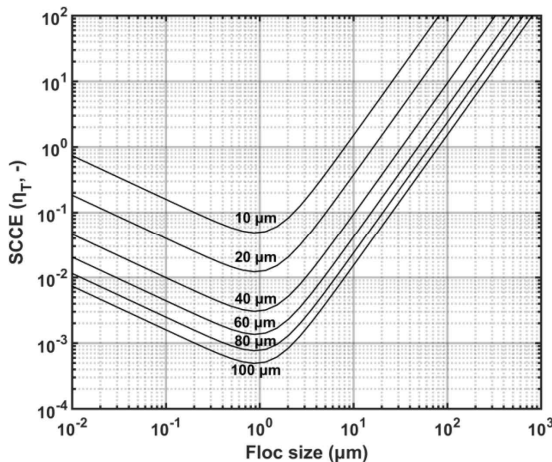


Fig. 3. Variation of SCC efficiency in terms of floc size for bubble size range 10~100 μm.

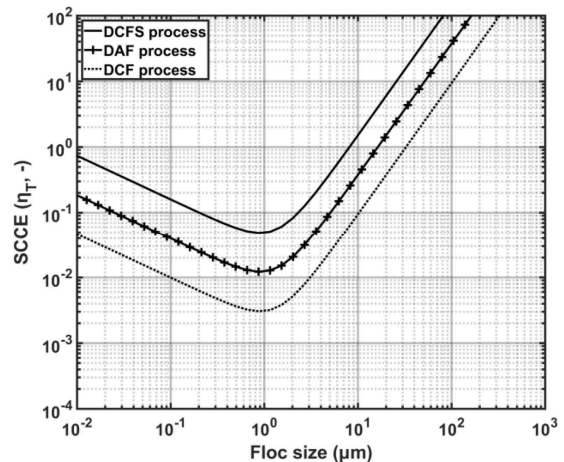


Fig. 4. Variation of SCC efficiency in terms of floc size for DAF, DCF and DCFS.

험값의 차이가 5~15%를 보인 반면, DCF 공정에서는 접촉시간 180 sec를 기준으로 50~65%의 매우 큰 차이를 보였고, DCFS에서도 접촉시간 120 sec를 기준으로 약 60%의 분리효율 차이를 보였다. 이와 같이 DCF 공정과 DCFS 공정에서 모의값에 비하여 실험값의 차이가 크게 발생한 이유는 기포주입과정에서 형성된 거대기포(macro-bubbles)가 기포-플록 응집체(bubble-floc agglomerates)를 파괴하거

나 기포-플록간 결합을 방해한 영향이었으며, 이는 현장 실험에서의 육안으로 쉽게 관찰되었다. 이에 따라 실제 실험장치나 수처리 현장에서 발생하는 거대기포 발생을 차단하거나 최소화할 수 있는 대책이 요구된다. 또한 본 SCC 모델은 접촉영역을 중요하게 다루는 반면, 수리적 부하율(hydraulic loading rate) 등에 의하여 나타나는 분리영역(separation zone)에서의 입자 분리효율(Y)을 충분히 반영하는 데에는 한계가 있고, 기포 입경이 상대적으로 큰 DCF에서는 수리동력학적 영향에 따라 실험결과와의 차이가 발생할 수 있다.

또한 DAF, DCF, DCFS 공정의 모든 실험결과에서, 모의 결과뿐만 아니라 실험결과에서도 접촉시간의 증가에 따라 입자 제거효율도 분리효율(X)과 같이 상승하는 것을 볼 수 있으며, 이는 부상분리 실험시작과 함께 주입되는 거대기포의 영향이 다소 줄어든 결과로 관찰되었다. 그러나 본 연구의 실험은 회분식으로 실시되었으므로 실제 수처리 현장에 연속식으로 적용될 경우 거대기포에 의한 입자 제거효율의 저하현상은 본 연구결과에 비하여 적어질 수 있을 것

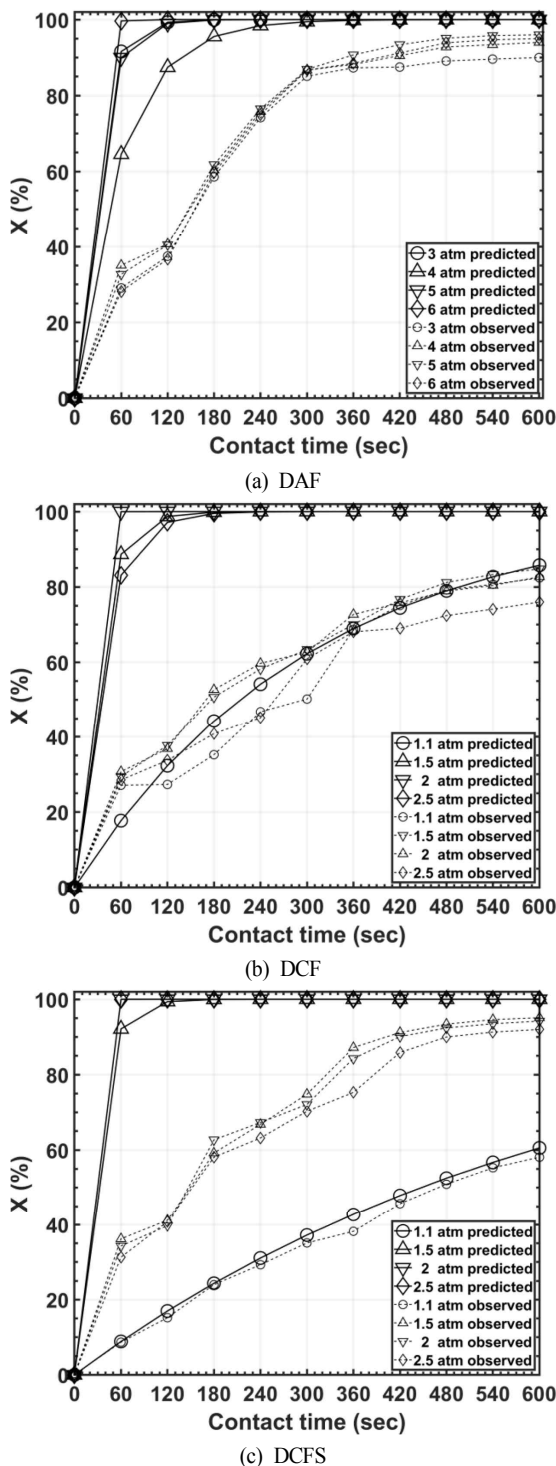


Fig. 5. Particle separation efficiency (X) in terms of contact time.

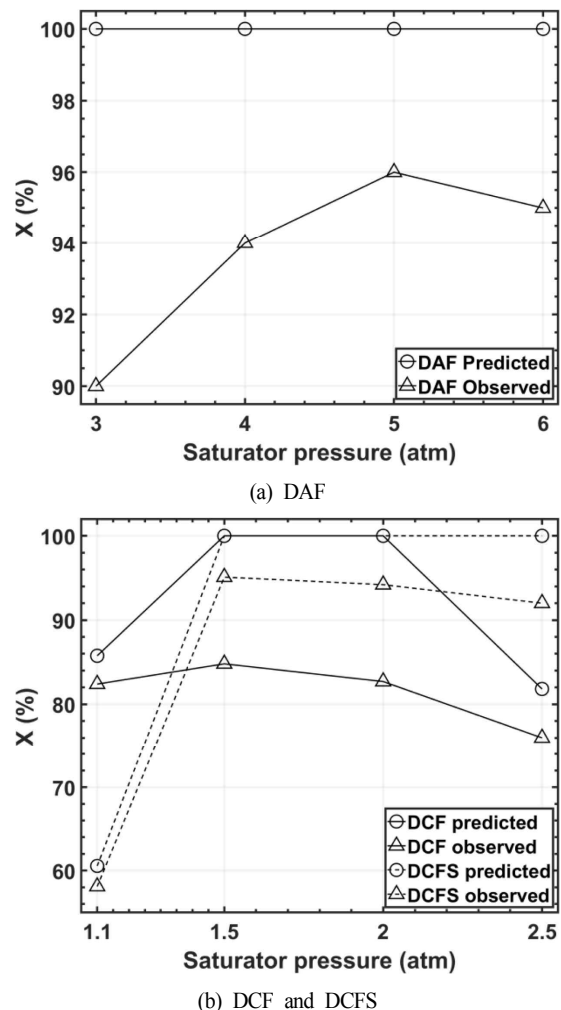


Fig. 6. Comparison of particle separation efficiency between predicted values and observed values under the contact time, 600 sec.

이다. 특히, DCFS 공정에서 접촉시간을 약 600 sec 정도로 운전할 경우, 거대기포의 영향이 적은 DAF의 효율과 거의 유사한 입자 제거효율 거둘 수 있었다.

3.4 압력에 따른 입자 분리효율

앞에서 살펴본 접촉시간에 따른 입자의 분리효율을 토대로 기포와 플록이 충분히 접촉될 수 있는 시간을 확보할 수 있는 600 sec의 조건에서 포화장치의 압력변화에 따른 입자분리효율을 살펴보았다. 모의에서는 Yoo (2011)의 연구에서 얻은 기포체적농도 경험식(DCF: $y = 7.83x - 7.95$, $y = -3.97x + 11.04$, DCFS: $y = -11.67x - 11.33$, $y = -2.4x + 10.88$)을 이용하여 각 공정의 예측된 입자 분리효율(X) 값 및 실제 실험에서 얻어진 입자 제거효율을 비교하여 나타내었다. 거대기포의 영향이 다소 낮아진 접촉시간 600 sec에서 다음의 Fig. 6과 같이 입자분리효율(X) 예측값과 실제의 입자 제거효율을 나타내는 실험값과의 보다 가까워진 것을 볼 수 있으며, 이 값의 차이는 분리영역(separation zone) 운전 에 의하여 변동되는 입자의 최종 부상효율(Y)에 의한 것으로 판단된다. 또한 포화장치의 압력에 의한 입자 제거효율에서, Fig. 6(a)의 DAF공정의 압력 6.0 atm 실험값과 Fig. 7(b)의 압력 2.5 atm에서 나타난 실제 실험의 입자 제거효율의 감소는 포화장치(saturator) 압력이 일정 수준을 초과 하면 거대 기포가 형성되기 때문에 기포-플록 응집체가 표면으로 부상 중 거대 기포가 터지면서 입자 제거효율의 감소를 유발하는 현상을 나타내고 있다.

4. Conclusion

CO₂ 저감 및 재이용을 목적으로 개발되어진 DCF 공정은 매우 적은 동력비가 요구되는 장점에도 불구하고 DCF 공정에서 발생하는 기포의 큰 평균입경으로 인해 DAF보다 낮은 효율을 나타내며, DCFS 공정과 같이 계면활성제를 주입하여 평균기포입경을 감소를 도모할 수 있는 바, 본 연구에서는 DCF 및 DCFS 공정의 운전조건 변화로 인하여 나타나는 기포입경분포의 변화를 토대로 접촉영역의 입자 분리효율을 모의하여 입자분리 특성을 살펴보고, 실제 부상 실험 결과와 비교하여 부상공정의 접촉영역에서의 효율과 영향인자 및 입자분리 특성을 이해하고자 하였다.

접촉영역 모델로 비교적 간단한 SCC 이론과 입자분리효율(X)을 이용하여 충돌효율과 입자 분리효율을 모의한 후 실제 실험 결과와 비교분석한 결과, DAF 공정은 플록의 크기가 30 μm 이상에서, DCF 공정은 플록의 크기 75 μm 이상에서, 그리고 DCFS 공정은 플록크기 20 μm 이상인 범위에서 기포와 플록이 최소 한번 이상 접촉하게 되며, 플록의 크기가 커질수록 접촉기회는 증가하게 되는 것으로 나타났다. 특히, 기포의 입경이 작아질수록 충돌효율이 높아지는 것을 확인하였으며 부상분리 공정에서 효율향상을 위해서는 기포의 크기분포를 줄이는 것이 중요한 것으로 확인되었다.

또한 예측 값과 실제 실험에 의한 관찰 값의 비교 평가

에서, DAF에 비하여 DCF와 DCFS에서 분리효율이 큰 차이를 보였으며, 이는 기포주입과정에서 형성된 거대기포가 기포-플록 응집체를 파괴하고 기포-플록간 결합을 방해한 영향으로 관찰되었다. 이에 따라 거대기포에 의한 영향이 적은 포화장치의 운전압력 구간을 확인할 수 있었으며 DCF와 DCFS에서 1.5 atm 이하 그리고 2.5 atm 이상에서는 거대기포의 영향이 증가하여 입자의 제거효율이 감소하였다.

접촉영역의 모델인 SCC 모델은 수리적 부하율 운전 등의 분리영역의 영향을 입자의 최종 부상효율(Y)을 반영하지 못하므로, 보다 정확한 부상분리효율의 예측을 위해서는 부상분리 모델에 분리영역에서의 관련 인자를 포함하여야 할 것으로 판단되었다.

List of Symbol

η_D	브라운 확산효율(Brownian diffusion)
η_I	포착효율(interception)
η_g	침전효율(gravity force)
η_{IV}	관성효율(inertia)
η_T	총 효율(total scce)
k_B	볼츠만 상수, J/K
T	절대온도, K
g	중력가속도, m/sec ²
ρ_w	물 비중, kg/m ³
ρ_p	입자나 플록의 비중, kg/m ³
d_b	기포 직경, m
d_p	입자나 플록의 직경, m
ν	동점성도, m ² /sec
α_{pb}	초기 부착효율(initial attachment efficiency)
A_b	기포가 분사되는 면적, m ²
T	시간, s
U_{pb}	기포와 플록간의 접근속도, m/s
N_b	기포농도, 수/m ²
N_p	플록농도, 수/m ²
η_T	단일포집자 충돌효율(SCCE)
X	입자수에 기초한 분리된 floc의 fraction
$N_{p,i}$	유입수의 floc농도, 수/ ℓ
$N_{p,e}$	유출수의 floc농도, 수/ ℓ
Φ_b	기포체적 농도(BVC), L/m ³
τ	평균체류시간, s
μ	유체의 점도, kg/m · s

Acknowledgement

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반 공공기술개발사업의 지원으로 연구되었으며(2018 000200001), 일부는 한국연구재단의(NRF-2015R1D1A3A0302 0597) 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Afkhami, M., Hassanpour, A., and Fairweather, M. (2019) Effect of Reynolds number on particle interaction and agglomeration in turbulent channel flow, *Powder Technology*, 343, 908-920.
- Dockko, S., Kwak, D. H., and 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. [Korean Literature]
- Edzwald, J. K. (1995). Principles and applications of dissolved air flotation, *Water Science and Technology*, 31(3-4), 1-23.
- Francois, R. J. (1988). Growth kinetics of hydroxide flocs, *Journal of American Water Works Association*, 80(6), 92-96.
- Grieves R. B., Conger, W. L., and Malone, D. P. (1970). Foam separation clarification of natural waters, *Journal of American Water Works Association*, 62(5), 304-311.
- Han, M. Y., Kim, C. I., and Kwak, D. H. (2009). Measurement of bubble bed depth in dissolved air flotation using a particle counter, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 58(1), 57-63.
- Harrhoff, J. and Edzwald, J. K. (2004). Dissolved air flotation modeling: insight and shortcomings, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 53(3), 127-150.
- Kwak, D. H. and Kim, M. S. (2013). Feasibility of carbon dioxide bubbles as a collector in flotation process for water treatment, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 62(1), 52-65.
- Kwak, D. H. and Kim, M. S. (2015). Flotation of algae for water reuse and biomass production: Role of zeta potential and surfactant to separate algal particles, *Water Science and Technology*, 72(5) 762-769.
- Kwak, D. H., Kim, S. J., Jung, H. J., Park, Y. K., Yoo, Y. H., and Lee, Y. D. (2011). Particle separation and flotation efficiency by dissolved carbon dioxide flotation process, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 25(4), 471-478. [Korean Literature]
- Kwak, D. H., Jung, H. J., Kim, S. J., Won, C. H., and Lee, J. W. (2005). Separation characteristics of inorganic particles from rainfalls in dissolved air flotation: A Korean perspective, *Separation Science and Technology*, 40, 3001-3006.
- Lagvankar, A. L. and Gemmel, R. S. (1968). A size-density relationship for flocs, *Journal of American Water Works Association*, 60(9), 1040.
- Lee, J. Y., Kim, S. J., Yoo, Y. H., Chung, P. G., Kwon, Y. H., Park, Y. K., and Kawk, D. H. (2012). Evaluation of flotation efficiency and particle separation characteristics of carbon dioxide bubbles and using collision model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(1), 129-136. [Korean Literature]
- Leppinen, D. M. (2000). A kinetic model of dissolved air flotation including the effects of interparticle forces, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 49(5), 259-268.
- Leppinen, D. M. and Dalziel, S. B. (2004). Bubble size distribution in dissolved air flotation tanks, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 53(8), 531-543.
- Malley, J. P. (1990). Removal of organic halide precursors by dissolved air flotation in conventional water treatment, *Journal of Environmental Technology*, 11, 1161-1167.
- Malley, J. P. and Edzwald, J. K. (1991). Conceptual model for dissolved-air flotation in drinking water treatment, *Journal of Water SRT-AQUA*, 40(1), 7-17.
- Michaux, B., Rudolph, M., and Reuter, M. A. (2018) Challenges in predicting the role of water chemistry in flotation through simulation with an emphasis on the influence of electrolytes, *Minerals Engineering*, 125, 252-264.
- Prakash, R., Majumder, S. K., and Singh, A. (2018) Flotation technique: Its mechanisms and design parameters, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 127, 249-270.
- Xing, Y. Gui, X., Pan, L., Pinchasik, B. E., and Butt, H. J. (2017). Recent experimental advances for understanding bubble-particle attachment in flotation, *Advances in Colloid and Interface Science*, 246, 105-132.
- Yoo, Y. H. (2011). *Solid separation and flotation characteristics using carbon dioxide micro-bubble*, Master's Thesis, Chonbuk National University, 59-62, 80-91. [Korean Literature]
- Zable, T. (1985). The advantages of dissolved-air flotation for water treatment, *Journal of American Water Works Association*, 77(5), 42-45.
- Zhang, H. and Zhang, X. (2019). Microalgal harvesting using foam flotation: A critical review, *Biomass and Bioenergy*, 120, 176-188.