Journal of Environmental Science International
23(11); 1835~1842; November 2014

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2014.23.11.1835

ORIGINAL ARTICLE

미세기포 발생 펌프에서 생성되는 기포농도와 용존공기농도의 비교

이창한, 안갑환*
부산가톨릭대학교 환경행정학과

Comparison of Dissolved Air and Micro-Bubble Concentration by a Micro-Bubble Generating Pump

Chang-Han Lee, Kab-Hwan Ahn*
Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

Abstract

The goal of this study was to evaluate micro-bubble concentration (C_{air}) in water by air/water ratio (A/W ratio) with a micro-bubble generating pump. The estimation of micro-bubble concentration is based on the balance of inlet/outlet air and water flow rate. On net A/W ratio to be generated micro-bubble, we found that the obtained the C_{air} are shown as a function of discharge pressure (P_g) of the micro-bubble generating pump. The correlation of the C_{air} and the P_g ($C_{air} = 3.261P_g - 1.754$) was adequately described by the least square methods with a high correlation coefficient (r = 0.9459) and calculated values fit the experimental data quite well. The C_{air} was lower than theoretical dissolved air concentration (C_{aq}) calculated by Henry's law. The C_{air} for being operated the micro-bubble generating pump was 6.75 – 39.53 mL/L, however, we found that the optimum of the C_{air} to generate micro-bubble was the range from 10 to 12 mL/L.

Key words : Micro-bubble, DAF, Saturator, A/W ratio, Henry's Law.

1. 서 론

용존공기부상(Dissolved Air Flotation : DAF) 공정은 정수처리장의 원수로 유입되는 조류와 같은 저밀도 부유물질의 제거에서 기존 침전지보다 우수한 성능을 가지며, 하천 및 호소수에서 발생되는 조류의 제거에 효율적이라고 알려져 있다(Edzwald, 2010).

국내에 도입된 DAF 공정은 포화조(saturator)형과 미세기포 발생장치(미세기포 발생펌프)로 구분된다. 포화조형 장치는 펌프, 공기 주입용 콤프레샤, 공기/순환수 접촉탱크(saturator)를 포함하는 구조이며, 미세기포 발생펌프형 장치는 펌프, 공기 주입용 콤프레샤, 공기/순환수 접촉탱크를 미세기포 발생펌프로 컴팩트화한 공정이다. 공기를 순환수에 용해/분산시켜 가압수 제조가 용이하기 때문에 최근 운전특성 및 성능에 대한 효율 비교 및 실용화 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다

Received 4 August, 2014; **Revised** 16 September, 2014;
Accepted 16 October, 2014
***Corresponding author** : Kab-Hwan Ahn, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea
Phone: +82-51-510-0623
E-mail: khahn@cup.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Lee 등, 2009; An 등, 2002).

미세기포 발생장치는 기포 발생방식에 따라 포화조형(saturator type), 공동화형(cavitation type)과 회전흐름형(rotationing-flow type) 장치로 구분되며 여러 분야에서 다양한 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다(Fujiwara, 2006; Ohnari, 2000). 미세기포발생 및 처리효율은 A/S 비, 기포크기 및 갯수, 기포부상속도, 기포표면적, 기체체류량(gas holdup)의 주요 운전인자에 따라 달라진다(Rubio 등, 2002). 포화조형 DAF 공정에서 기체공간속도(superficial gas velocity)가 0.01 ~ 0.06 cm/s로 운전될 때 기체체류량이 0.4 ~ 0.8 %이며 80 ~ 150 ㎛의 미세기포가 발생된다고 하였다(Pérez-Garibay 등, 2012). Fujiwara(2006)은 공동화형 장치인 벤츄리관(venturi tube)을 이용하여 펌프 전단에서 공기를 주입하는 방식으로 발생되는 기포의 평균경이 100 ~ 250 ㎛으로 생성된다고 하였다. Ohnari 등(1999)은 펌프에서 토출되는 배관에 기액접촉장치를 설치하여 기액접촉비에 따라 미세기포 발생효율이 크게 차이를 보인다고 보고하였다. Okamoto 등(2005)은 미세기포 발생펌프와 유사한 기액접촉형 미세기포 발생장치에서 기액접촉비가 미세기포 발생효율에 미치는 영향은 비교적 낮다고 보고하였다.

Lee 등(2014)의 선행연구에서 최적의 미세기포 발생효율을 가지는 총 A/W ratio가 가압수를 반송하지 않은 경우와 50 %의 가압수를 반송할 경우에서 각각 1.06 ~ 3.62 %와 1.05 ~ 4.06 %로 나타난다고 하였으며, 미세기포 발생펌프의 운전에 있어 운전압력과 기·액 유량비에 따른 영향을 제시하였을 뿐 미세기포의 용해/분산 현상에 대한 정량적인 상관관계는 제시하지 않았다. 따라서, 본 연구는 실험실 규모의 미세기포 발생 펌프의 공기/물의 비(A/W ratio)에 따른 미세기포 농도를 포화조형 DAF 장치에서 발생되는 미세기포 농도와 비교하여 미세기포 기술의 현장 적용을 위한 기본적인 설계 및 운전인자를 정량화하고자 한다. 또한, 미세기포 농도는 Henry의 법칙에 따른 이론적인 공기용해도(C_{aq})를 미세기포 발생펌프에서 생성되는 미세기포 농도(C_{air})와 비교하여 이론적으로 현장 공정을 해석할 수 있는 정량적인 상관관계를 도출하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 미세기포 발생펌프

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연속식 미세기포 발생장치의 구조를 나타내었다. 이 장치에 설치된 미세기포 발생펌프는 농축조 유입배관 및 토출구의 구조에 따른 공기 유입량, 가압수 유량, 및 압력에 따라 케이싱 내로 유입된 공기는 임펠러의 회전에 의해 용해/분산시켜 미세기포를 제조하는 원리이다(Lee 등, 2009; Lee와 Ahn, 2009). Fig. 1의 ①은 이 공정의 구조를 나타낸 것으로서 a) 미세기포 발생부와 b)는 부상분리부로 구성되어 있다. 미세기포 발생펌프는 2개의 펌프(펌프 1(기포유입)와 펌프 2(기포용해/분산))가 직렬로 연결되어 있으며 미세기포 발생효율을 평가하기 위해 용해/분산된 가압수를 0 ~ 50%로 펌프 1로 재순환을 하면서 운전하였다.

2.2. 흡입공기량/미세기포 발생량 측정

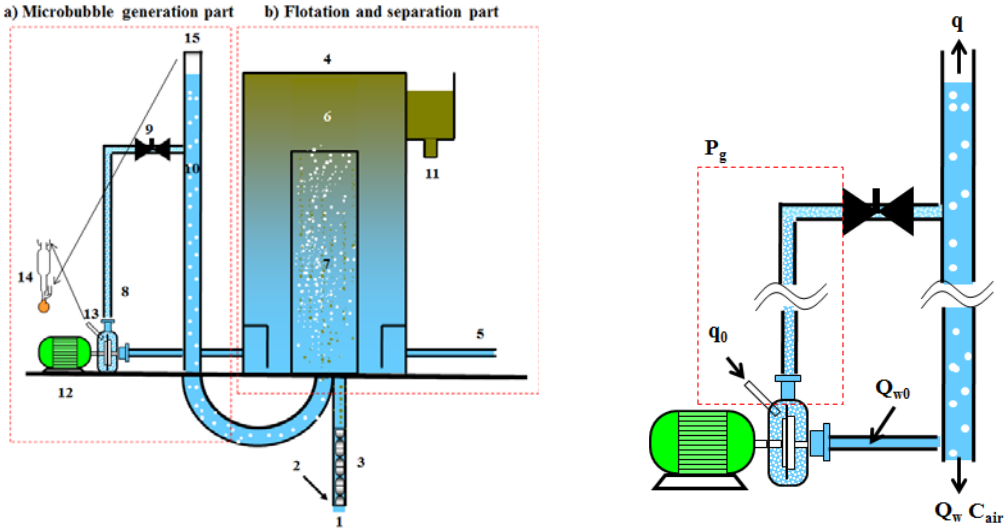
Fig. 1의 ②는 공기, 물 및 가압수의 유입과 유출량을 나타낸 것이다. 여기에서 Q_{w0} : 미세기포 발생펌프에서 토출되는 물 유량(L/min), Q_w : 부상조로 유입되는 물 유량(L/min), q_0 : (13)의 펌프케이싱으로 유입되는 공기 유량(L/min), q : (15)의 거대기포 분리장치로 유출되는 공기 유량(L/min)이다.

흡입공기량 및 미세기포 발생량은 Soap-film flowmeter(HP, 1-10-100 mL)를 사용하여 q_0과 q를 측정하였고, 이 자료를 A/W ratio(mL/L)와 net A/W ratio(mL/L)은 각각 $\frac{q_0}{Q_{w0}} \times 100$ 그리고 $\frac{q_0 - q}{Q_{w0}} \times 100$로 정의하여 산정하였다.

운전조건에 따른 미세기포 발생량의 상관관계를 도출하기 위하여 가압수 내의 공기 용해량은 식 (1)과 (2)과 같이 헨리의 법칙(Henry's Law)을 이용하여 헨리상수(Henry's Law constants)과 분압(partial pressure)에 따른 용액 중 산소와 질소 농도를 공기 농도로 환산하였다.

$$p = k_{H,pc} C_{N_2 \text{ or } O_2} \tag{1}$$

여기에서 p는 기체의 분압(atm)이고, $k_{H,pc}$는 헨리상



① Schematic diagram ② Mass balance of air and water

Fig. 1. Schematic diagram of micro-bubble generating pump system. (1) influent; (2) coagulent; (3) inline mixer; (4) float; (5) effluent; (6) flotation tank; (7) contact tank; (8) recycle water; (9) needle valve (orifice); (10) white water (microbuble); (11) scum; (12) micro-bubble generating pump; (13) air inlet (1-air flowrate); (14) soap-film flowmeter; (15) macro-bubble separator (2-air flowrate).

수(O_2 : 769.23 L・atm/mol, N_2 : 1282.05 L・atm/mol)이다. 또한, p는 수증기의 분압을 제외한 기체의 분압이다. C_{aq} 는 물에 용해되는 기체농도(mol/L)이고, C_{air} 는 물에 용해/분산되는 공기농도(mL/L)이다.

Table 1. Design and operating parameters with micro-bubble generating pump system

Parameter			Saturator type	DAF pump type
Flotation	Reaction zone	Retention time, s	60	
		Hyd. Load., m/hr	14.5 m/hr	
		Volume, L	8.3	
	Separation zone	Retention time, s	480	
		Hydraulic loading rate, m/hr	5.0 m/hr	
		Volume, L	58.4	
	Total	Height, m	1.01	
		Reaction and separation zone, L	66.7	
Bubble generation	Pressurization type	Type	Saturator	Wesco pump
		Number, ea	1	2
		Flow rate, L/min	5 - 10	5 - 10
	Recycle flow	Pressure, kgf/cm^2	4.0 - 6.0	4.0 - 6.0
		Retention time, s	1200	1-3
		ratio, %	5 - 15	5 - 30

$$C_{aq} = C_{N_2} + C_{O_2} \quad (2)$$

용액의 농도는 온도, 가스 종류 및 분압에 영향을 받기 때문에 반트호프 식(van't Hoff equation)를 사용하여 식 (3)와 같이 온도에 따른 영향을 보정하였다(Letcher, 2007; Smith와 Harvey, 2007)

$$k_{H,pc}(T) = k_{H,pc}(T^{\theta})\exp\left[-A\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T^{\theta}}\right)\right] \quad (3)$$

여기에서 $k_{H,pc}(T^{\theta})$는 각각 기준온도(298 K)에서 헨리상수이고, $k_{H,pc}(T)$와 T는 실제 온도이다. A는 상수(O_2 : 1700, N_2 : 1300)이다.

2.3. 미세기포 발생펌프형 부상분리장치

Fig 1. 1)의 b)에 제시한 미세기포 발생펌프형 부상분리조는 고형물 부하량에 따른 슬러지 부상분리조의 설계기준을 이용하였다(Cleverson 등, 2007). 본 연구에 적용된 부상분리조의 고형물 부하량은 220 kgTS/m^2/d로 하였으며, Table 1에 나타낸 것과 설계 및 운전인자 중에서 이전의 연구와 달리 미세기포 발생펌프에서 토출밸브로 이송되는 배관길이를 최소로 하여 체류시간을 감소시켜 운전하였다(Lee 등, 2014). 미세기포 발생장치의 토출압력은 운전범위인 4.0 ~ 6.0 kg$_f$/cm^2 중에서 5.0 kg$_f$/cm^{2}로 하여 유량이 5.22 L/min인 조건으로 하여 설계기준을 산정하였다. 이 시스템의 처리유량은 4.8 m^3/day(3.3 L/min)으로 하였다.

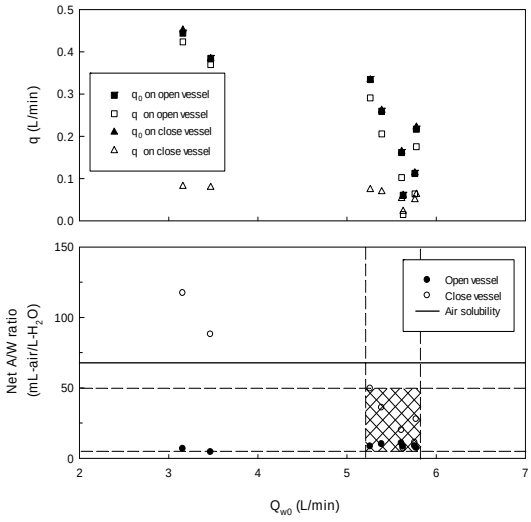


Fig. 2. The variation of A/W ratio on flow rate with the DAF pump at 5.0 kg$_f$/cm^2.

3. 결과 및 고찰

3.1. 가압수 유량에 따른 net A/W ratio

Fig. 2는 미세기포 발생펌프의 토출압력이 5.0 kg$_f$/cm^{2}인 조건에서 가압수 유량에 따른 net A/W ratio을 나타낸 것이다. Fig. 1의 15) 거대기포 분리장치는 열린 상태와 닫힌 상태로 구분하였다. 거대기포 분리장치가 열린 상태에서 Q_{w0}가 3.15 - 5.78 L/min일 때 q_0와 q는 각각 0.444 ~ 0.061 L/min와 0.424 ~ 0.015 L/min로 Q_{w0}에 반비례하는 경향으로 감소하였으며, 이 결과에서 q_0로 유입되는 공기는 일정한 양만 용해/분산되고 잉여공기는 거대기포로서 q로 유출되었다고 사료된다. 거대기포 분리장치가 닫힌 상태에서 Q_{w0}는 3.15 ~ 5.78 L/min일 때 q_0는 0.452 ~ 0.061 L/min이었지만 q는 0.082 L/min이하로서 q_0로 유입되는 공기는 대부분이 용해보다는 가압수 내로 분산되는 현상이 나타났다.

Fig. 2의 점선으로 표시된 범위인 5.26 ~ 5.78 L/min의 Q_{w0}에서 미세기포가 발생되었으며, 이 조건에서 net A/W ratio는 거대기포 제거장치가 열린 상태와 닫힌 상태에서 각각 7.18 ~ 10.57 mL/L와 6.75 ~ 27.57 mL/L이었다. 거대기포 제거장치가 닫힌 상태의 net A/W ratio는 열린 상태의 net A/W ratio보다 약 3배이상 높았지만, net A/W ratio가 약 10 mL/L (1 v/v%)인 조건에서 최적의 미세기포 발생효율을 나타내었다.

Fig. 3는 미세기포 발생펌프의 운전압력을 낮추기 위하여 가압수의 50%를 반송하여 미세기포 발생펌프의 토출압력을 3.5 kg$_f$/cm^{2}로 하여 가압수 유량에 따른 net A/W ratio을 나타낸 것이다. Fig. 2와 동일하게 거대기포 분리장치를 열린 상태와 닫힌 상태로 하여 운전하였다. 거대기포 분리장치가 열린 상태에서 Q_{w0}가 3.88 ~ 5.16 L/min일 때 q_0와 q는 각각 0.281 - 0.055 L/min와 0.261 ~ 0.020 L/min로 Q_{w0}에 반비례하였으며, 토출압력이 5.0 kg$_f$/cm^{2}에서 3.5 kg$_f$/cm^{2}로 낮아졌기 때문에 q_0

와 q가 감소되었다. 거대기포 분리장치가 닫힌 상태에서 q_0는 0.287 ~ 0.055 L/min이었지만 q는 0.075 L/min 이하로서 토출압력이 5.0 kg$_f$/cm^{2}에서 보다는 q_0와 q의 차이가 적어 q_0로 유입되는 공기가 물에 용해/분산되는 비율이 높아진 것으로 판단된다.

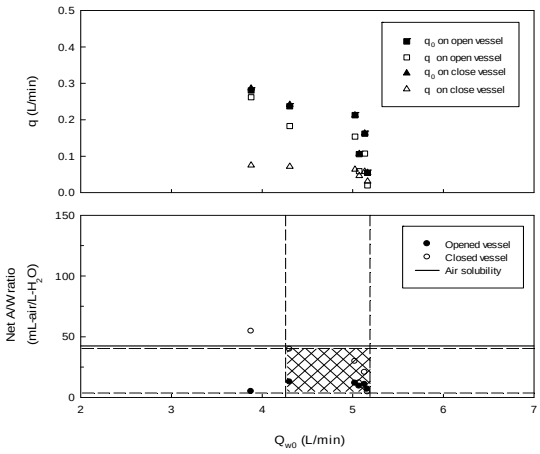


Fig. 3. The variation of A/W ratio on flow rate with the DAF pump at 3.5 kg$_f$/cm^2.

Fig. 3의 점선으로 표시된 범위인 Q_{w0}가 4.31 ~ 5.16 L/min로서 5.0 kg$_f$/cm^{2}에서 보다 넓은 Q_{w0}에서 미세기포가 발생되었으며, 이 조건에서 net A/W ratio는 거대기포 제거장치가 열린 상태와 닫힌 상태에서 각각 6.70 ~ 12.61 mL/L와 4.55 ~ 39.53 mL/L이었다. 토출압력이 3.5 kg$_f$/cm^{2}에서도 거대기포 제거장치가 닫힌 상태의 net A/W ratio는 열린상태의 net A/W ratio보다 약 3배 이상 높게 나타났다. 또한, Fig. 2의 결과와 유사하게 net A/W ratio가 약 12 mL/L (1.2 v/v%)인 조건이 최적의 미세기포 발생효율을 나타내었으며, net A/W ratio를 조절하기 위해 Q_{w0}를 5.16 L/min이상으로 높이면 미세기포 발생펌프로 유입되는 q는 오히려 더 감소하여 net A/W ratio가 낮아지는 경향을 보였다.

토출압력이 3.5와 5.0 kg$_f$/cm^{2}인 조건에서 net A/W ratio가 6.75 ~ 39.53 mL/L 조건에서 미세기포 발생펌프에서 토출되는 가압수의 미세기포 평균경이 약 40～43 ㎛(토출압력 : 4.5 ~ 6.0 kg$_f$/㎠)인 이전의 연구결과를 적용하면 약 10 mL/L이상으로 유입되는 공기는 미세기포로 형성하지 못하고 거대기포로 배출되는 것으로 판단된다(An 등, 2002).

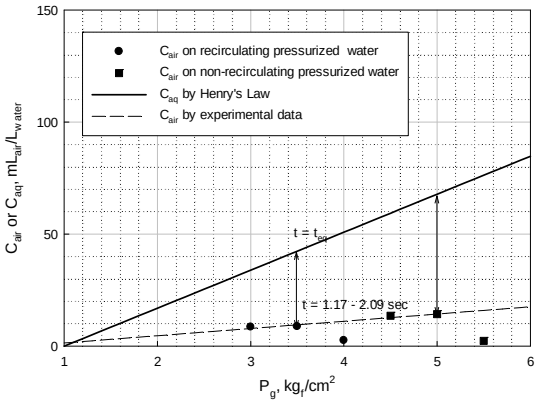


Fig. 4. Variation of Cair on pressurized pressure at 30℃ by the DAF pump.

3.2. 토출압력(P_g)과 C_{air}의 상관관계

Fig. 4는 미세기포 발생펌프의 P_g에 따른 가압수의 C_{air}를 비교하여 나타내었다. 미세기포 발생펌프의 P_g은 3.0 ~ 4.0 kg$_f$/cm^2(가압수 : 50% 반송)와 4.5 ~ 5.5 kg$_f$/cm^2(가압수 : 미반송)로 조절하였다. 가압수의 C_{air}는 P_g에 따라 증가하는 경향을 보였다. 4.0과 5.5 kg$_f$/cm^{2}의 P_g에서 가압수의 C_{air}는 2.5와 2.4 mL/L로 급격히 낮아지는 경향을 보였는데 이 결과는 미세기포 발생펌프가 가압수를 제조할 수 있는 운전 범위를 벗어나 q_0로 공기가 거의 유입되지 않았기 때문이다. 따라서, q_0가 정상적으로 유입되는 3.0 ~ 3.5 kg$_f$/cm^{2}와 4.5 ~ 5.0 kg$_f$/cm^{2}의 운전조건이 미세기포를 생성하기 위한 최적조건이라 판단하였으며, 이 조건에서 최소자승법을 이용하여 P_g와 C_{air}의 상관관계를 도출하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{air} = 3.261P_g - 1.754 \ (r = 0.9459) \quad (4)$$

$$C_{aq} = 16.958P_g \quad (5)$$

식 (4)에서 계기압력으로 표시되는 P_g를 고려하여 -1.754 mL/L의 절편값을 제외하고 식 (4)의 기울기를 기준으로 식 (5)와 비교하면 $C_{aq} = 16.958P_g$와 $C_{air} =$

$3.261P_g$의 비례관계가 성립된다는 것을 확인할 수 있었다. 이론적인 값인 C_{aq}는 공기가 용액 중에 완전히 포화되어 평형을 이루는 $t = t_{eq}$의 조건에서 산정된 값으로 $t = 1.17 - 2.09$초로 평형에 도달하지 않는 C_{air}는 $P_g = 5$ kg$_f$/cm^{2}에서 14.40 mL/L으로 C_{aq}가 67.83 mL/L에 비해 약 4.7배 정도 낮게 나타났다. Bahadori 등(2013)은 Vandermonde matrix가 적용된 예측 프로그램을 사용하여 수온과 게이지 압력이 각각 30℃와 500 kPa(5.098 kg$_f$/cm^2)인 조건에서 예측한 DAF 공정의 공기 농도는 63.6 mL/L(90.9 mg/L)로서 Henry 법칙을 사용한 본 연구결과와 거의 일치하였다. 이 결과로부터 미세기포 발생펌프로 유입되는 q_0는 C_{aq}이하의 범위에서 물리화학적으로 용해/분산되며, 가압수가 배관 내에 체류하는 시간이 $t = 1.17 - 2.09$초보다 증가한다면 C_{air}는 이론적인 공기용해도, C_{aq}에 더 근접할 것으로 판단된다. Fig. 3와 Fig. 4에서 net A/W ratio는 Henry 법칙에 의해 산정된 공기용해도 보다 낮은 조건이며, 거대기포제거장치가 열린 상태에서 net A/W ratio가 약 10 ~ 12 mL/L만이 수중에서 용해/분산되는 공기농도, C_{air}, 인 것으로 판단된다.

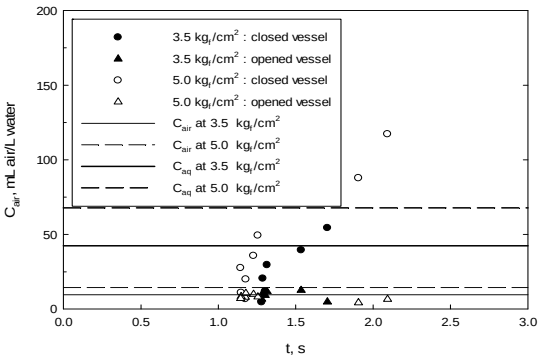


Fig. 5. Variation of C_{air} on retention time in the DAF pump.

3.3. 체류시간(t)과 C_{air}의 상관관계

Fig. 5는 대기압으로 토출되기 전 미세기포 발생펌프와 배관의 체류시간(t)에 따른 C_{air}를 나타내었다. 미세기포 발생펌프의 P_g은 3.5 kg$_f$/cm^{2}와 5.0 kg$_f$/cm^{2}로 조절하였고, 이 P_g에서 거대기포 분리장치는 열린 상태와 닫힌 상태로 운전하였다. 거대기포 분리장치가 닫힌 상태에서 C_{air}는 t에 따라 4.55 ~ 117.20 mL/L로 점차 증가하였으며, 미세기포 발생펌프로 유입되는 공기가 거의 대부분 가압수로 유입되어 토출되어 Fig. 4에서 제시한 C_{air}의 범위보다는 높게 나타났다. 거대기포 분리장치가 열린 상태에서 C_{air}는 t에 따라 8.07 ~ 12.60 mL/L로 일정한 값을 나타내었으며, 이 결과에서 약 13 mL/L 이상으로 주입된 공기는 가압수 중에 용해/분산되지 않고 대부분 거대기포 분리장치로 배출되는 결과를 보였다. 이 조건에서 미세기포 평균경이 43 ㎛이고 가압수 반송비가 10%라고 하면, 반응조(reaction zone) 내의 미세기포 수는 2.14×10^4 ~ 3.34×10^4 bubbles/mL이었다. Li (2006)는 미세기포 발생펌프가 장착된 단일 유도공기 부상조(One-cell IAF system)를 이용한 미세기포 제조에 있어 토출압력이 0.3 ~ 0.5MPa(3.0588 ~ 5.098 kg$_f$/cm^2)인 조건에서 A/W ratio가 35.71 ~ 50.00 mL/L으로 미세기포 평균경과 농도가 각각 52 ~ 63 ㎛과 2.5×10^4 ~ 4.9×10^4 bubbles/mL의 기포농도로서 본 연구결과와 유사한 A/W ratio를 나타내었다.

포화조의 경우, 포화조의 압력을 $P_g = 5$ kg$_f$/cm^{2}로 운전하고 Table 1에 나타낸 것과 같이 체류시간이 1200초($t = t_{eq}$)로 완전히 포화되었다고 가정한다면 가압수로서 부상조로 유입되는 C_{air}는 67.83 mL/L일 것이다. Haarhoff와 Edzwald(2004)가 제시한 평균 미세기포크기가 60 ㎛인 조건에서 DAF의 부상조 내 미세기포 개수와 농도는 각각 4.4 ~ 8.8×10^4 bubbles/mL와 5,000 ~ 10,000 ppm이라고 결과와 비교하면 미세기포 발생펌프는 포화조에 비해 반송률이 약 10%정도 높게 운전되어야 한다. 또한, 미세기포 발생펌프에서 발생되는 미세기포 농도를 높이려면, 미세기포 발생펌프와 배관의 체류시간의 증가를 통해 공기의 용해/분산량을 증가시킬 수 있을 것으로 판단되며 이 조건에서 부상분리조를 운전한다면 가압수의 반송률을 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 실험실 규모의 미세기포 발생 장치를 이용하여 유입 및 유출 공기량 실험자료를 이용하여 net A/W ratio에 따른 미세기포 농도(C_{air})와 이론적인 미세

기포농도(C_{eq} : Henry의 법칙)를 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

토출압력이 3.5와 5.0 kg_f/cm^2인 조건에서 net A/W ratio는 6.75 ~ 39.53 mL/L 이었으며, 10 ~ 12 mL/L의 net A/W ratio에서 가압수로 유입되는 공기가 미세기포로서 용해/분산되는 것으로 판단된다. 또한, 거대기포 분리장치가 열린 상태에서 체류시간, t에 따른 C_{air}는 8.07 ~ 12.60 mL/L로 일정한 값을 나타내었다.

C_{air}는 $P_g = 5$ kg_f/cm^2에서 14.40 mL/L으로 C_{aq}가 67.83 mL/L에 비해 약 4.7 배 정도 낮게 나타났으며, 가압수가 배관 내에 체류하는 시간이 $t = 1.17 - 2.09$ 초보다 증가한다면 가압수 내로 용해/분산되는 C_{air}는 이론적인 공기용해도, C_{aq}에 더 근접할 것이다.

미세기포 발생펌프의 최적운전조건에서 미세기포 평균경이 43 ㎛이고 가압수 반송비가 10%라고 하면, 반응조(reaction zone) 내의 미세기포 수는 2.14×10^4 ~ 3.34×10^4 bubbles/mL이었다. 이 조건에서 미세기포 발생펌프의 가압수 반송율은 기존 DAF 부상조에 비해 약 10 % 정도 높게 운전되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2013년도 부산가톨릭대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 과제이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

An, D. M., Lee, C. H., Choi, Y. C., Cho, S. H., Ahn, K. H., Kim, S. S., 2002, Bubble Concentration and Flotation Efficiency in Domestic DAF Pump, Theor. and App. of Chem. Eng., 8(1), 1553-1556.

Bahadori, A., Zahedi, G., Zendehboudi, S., Bahadori, M., 2013, Estimation of air concentration in dissolved flotation(DAF) systems using a simple predictive tool, Chem. Eng. Res. & Design, 91, 184-190.

Cleverson, V. A., Marcos, S., Fernando, F., 2007, Sludge Treatment and Disposal, IWA Publishing, 78-81.

Edzwald, J. K., 2010, Dissolved Air Flotation and Me, Wat. Res., 44(7), 2077-2106.

Fujiwara, A., 2006, Microbubble Generation Using Venturi Tube, ECO Industry, 11, 27-30.

Haarhoff, J., Edzwald, J. K., 2004, Dissolved Air Flotation Modelling: Insights and Shortcomings, J. Wat. Supply: Research & Technology-AQUA, 53, 127-150.

Letcher, T. M., 2007, Developments and applications in solubility (1st ed.), Royal Society of Chemistry, RSC Publishing Inc., Dorset, 66-77.

Lee, C. H., An, D. M., Kim, S. S., Cho, S. H., Ahn, K. H., 2009, Pretreatment Condition in the Full Scale Dissolved Air Flotation Process, KSEE, 31(1), 58-63.

Lee, C. H., Ahn, K. H., 2009, Effect of Chemical Conditioning on Flotation and Thicken Properties of Sludge using a Microbubble generating Pump, KSEE, 31(8), 641-648.

Lee, C. H., Park, J. W., Ahn, K. H., 2014, Micro-Bubble Generating Properties on Gas/Liquid Flow Rate Ratio with the Sludge Flotation/Thickening Apparatus, JESI, 23(1), 97-104.

Li, P., 2006, Development of Advanced Water Treatment Technology Using Microbubbles, Ph. D. Dissertation, Keio University, Tokyo, Japan.

Okamoto, R., Takeda, T., Shakutsui, H., Ohnari, H., 2005, Performance of Micro-Bubble Generators, Japanese Society for Multiphase Flow Annual Meeting, Tokyo, Japan, August.

Ohnari, H., 2000, Swirling Type Micro-Bubble Generation System, Japan Patent, WO0069550.

Ohnari, H., Saga, T., Watanabe, K. Maeda, K. Matsuo, 1999, High Functional Charateristics of Micro-bubbles and Water Purification, Resources Processing, 46, 238-244.

Pérez-Garibay, R., Martínez-Ramos, E., Rubio, J., 2012, Gas dispersion measurements in microbubble flotation systems, Miner. Eng., 26, 34-40.

Rubio, J., Souza, M.L., Smith, R.W., 2002, Overview of flotation as a wastewater treatment technique, Miner. Eng., 15(3), 139-155.

Smith, F. L., Harvey, A. H., 2007, Avoid Common Pitfalls When Using Henry's Law, Chem. Eng. Prog., Sept., 33 - 39.