Journal of Environmental Science International
25(6); 829~837; June 2016

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2016.25.6.829

ORIGINAL ARTICLE

미세기포 발생 펌프 내 체류시간에 따른 미세기포의 발생 농도 예측

매튜스탠리암브로샤 · 이창한*

부산가톨릭대학교 환경행정학과

Prediction of Micro-Bubble Releasing Concentration with the Retention Time of a Micro-Bubble Generating Pump

Matthew Stanley Ambrosia, Chang-Han Lee*

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

The mechanism of micro-bubble generation with a pump is not clarified yet, so the design of water treatment systems with a micro-bubble generating pump is based on trial and error methods. This study tried to explain clearly quantitative relationships of experimental micro-bubble concentration (C_{air}) of continuous operation tests with a micro-bubble generating pump and theoretical air solubility. Operation parameters for the tests were discharge pressure (P_g), water (Q_{w0}) and air (q_0) flow rates, orifice diameter (D_O), and retention time (t). The experimental micro-bubble concentrations (C_{air}) at 4.8 atm of discharge pressure (P_g) were in the range of 21.04 to 25.29 mL/L. When the retention time (t) by changing the pipe line length (L_P) increased from 1.22 to 6.77s, the experimental micro-bubble concentrations (C_{air}) increased from 25.86 to 30.78 mL air/L water linearly. The dissolved and dispersed micro-bubble concentrations (C_{air}) are approximately 4 times more than the theoretical air solubility.

Key words : Micro-bubble, Retention time, Releasing concentration, DAF, Pump

1. 서 론

일반적인 용존공기부상(dissolved air flotation : DAF) 공정은 포화조(saturator), 미세기포 발생펌프 등에 의해 순환수에 공기를 용해/분산시키는 방식에 따라 전체 공정의 운전특성 및 성능이 달라질 수 있다(Lee et al., 2009). DAF 공정의 순환수 제조는 기포 발생방식에 따라 포화조형(saturator type), 공동화형(cavitation type), 회전흐름형(rotationing-flow type) 장치 등으로 구분되며, 기포발생 특성 및 성능평가에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다(Fujiwara, 2006; Ohnari, 2000; An et al., 2002).

Sadatomi et al.(2012)는 오리피스와 다공관이 설치된 다유체 혼합기(multi-fluid mixer)를 이용하여 미세기포 발생 속도를 실험치와 이론치를 비교하여 제시하였으며, 이 결과에서 오리피스와 다공관의 종류에 따라 유입되는 액체유량(20 ~ 65 L/min) 및 기체유량(1 ~ 20 L/min)이 증가하며 미세기포 발생에도 영향을 준다고 보고하였다. Ohnari et al.(1999)은 펌프에서 토출되는 배관에 회전 흐름형 미세기포 발생장치를 이용하여 기체

Received 21 March, 2016; **Revised** 11 April, 2016;
Accepted 11 April, 2016
***Corresponding author** : Chang-Han Lee, Department of Environ-mental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
Phone : +82-51-510-0624
E-mail : chlee@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.

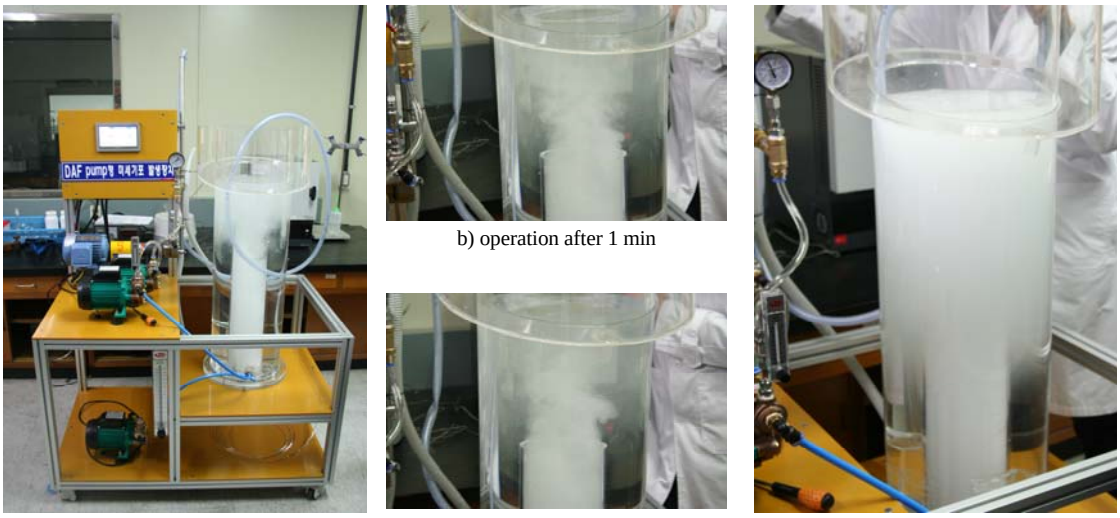
와 액체의 유입 위치 및 기액접촉비에 따라 미세기포 발생효율이 크게 달라진다고 하였다. Fukushi et al.(1995)는 DAF 장치를 이용하여 일정한 압력(0.4~0.5 MPa)에서 수중으로 토출되는 공기 미세기포의 이론적인 비체적(theoretical specific volume)을 산정하여 제시하였다.

Fujiwara(2006)는 수중에 50 ppm의 펜타놀의 첨가하는 조건에서 100 ㎛의 미세기포를 발생시킬 수 있는 벤츄리 튜브형 미세기포 발생장치의 운전조건을 제시하였다. Pérez-Garibay et al.(2012)은 포화조형 DAF 공정의 운전에 있어 0.01 ~ 0.06 cm/s의 기체공간속도에서 기체체류량은 0.4 ~ 0.8%이며, 이 조건에서 발생되는 미세기포경은 약 80 ~ 150 ㎛를 나타낸다고 하였다. Murayama et al.(2013)은 기포탑을 이용하여 32 ~ 40 ㎛의 미세기포에 대한 기체 보유량(gas holdup)과 물질전달계수(mass transfer coefficient)를 구하여 물질전달 특성을 평가하였다. 선행연구(Lee et al., 2014)에서 미세기포 발생장치를 이용하여 기·액 유량비에 따른 미세기포 농도와 이론적인 미세기포 농도의 정량적인 상관관계를 제시한 바 있었다. 그러나 미세기포 발생에 대한 기존 연구(Fujiwara, 2006; Pérez-Garibay et al., 2012; Murayama et al., 2013)와 선행연구(Lee et al., 2014) 결과로부터 미세기포 발생장치에서 용해/분산되는 공기량이 이론적인 미세기포 농도보다 낮게 나타나는 원인을 밝히기는 어려운 부분이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구는 미세기포 발생장치에 토출압력과 유량을 조절할 수 있는 오리피스를 부착하여 토출압력(P_g), 오리피스 직경(DO), 체류시간(t) 및 미세기포 농도(C_{air})의 상관관계로부터 미세기포 발생량과 이론적인 미세기포 농도의 정량적인 관계를 구체화하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 미세기포 발생펌프

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연속식 미세기포 발생장치와 미세기포가 발생되는 원리를 나타내었으며, 공기 유입량, 가압수 유량, 및 압력에 따라 케이싱 내로 유입된 공기는 임펠러의 회전에 의해 용해/분산되면서 미세기포가 제조된다(Lee et al., 2009). Fig. 2와 같이 미세기포 발생펌프는 2개의 펌프(펌프 1(기포유입)와 펌프 2(기포 용해/분산))가 직렬로 연결되어 있는 구조이다. 미세기포 발생펌프가 구동되면, 펌프 1의 케이싱으로 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 유입수(Q_{w0})와 유입공기(q_0)가 동시에 유입된다. 유입수와 공기는 펌프케이싱과 배관 압력(P_g)를 유지된 상태에서 일정한 길이를 가지는 배관(L_P)에 체류하면서 공기가 용해/분산된다. 용해/분산된 가압수는 토출밸브를 통해 대기압 상태로 배출되면서 거대기포(q)



a) micro-bubble generating pump system

b) operation after 1 min

c) operation after 2 min

d) operation after 5 min

Fig. 1. Photographs of micro-bubble generating pump system and operation test.

는 제거되고 일정한 미세기포 농도(C_{air})와 유량(Q_w)이 Fig. 1 d)의 부상조 내로 유입되어 미세기포가 발생되는 구조이다. 유입공기(q_0)와 거대기포(q)의 유량은 soap-film flowmeter (HP, 1-10-100 mL)을 사용하여 측정하였다.

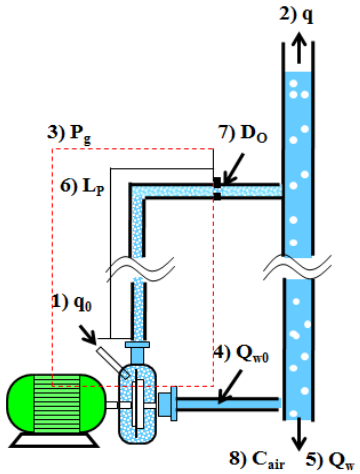


Fig. 2. Schematic diagram and mass balance of micro-bubble generating pump system. 1) q_0 : air inlet, 2) q : air outlet, 3) P_g : Pipe pressure, 4) Q_{w0} : water inlet, 5) Q_W : water outlet, 6) L_P : pipe length, 7) D_O : Orifice diameter 8) C_{air} : dispersed or dissolved air concentration.

2.2. 흡입공기량/미세기포 발생량 산정

2.2.1 압력에 따른 미세기포 농도(C_{air})

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Q_{w0} : 미세기포 발생펌프로 유입되는 물 유량(L/min), Q_w : 부상조로 유입되는 물 유량(L/min), q_0 : 펌프케이싱으로 유입되는 공기 유량(L/min), 및 q : 거대기포 분리장치로 유출되는 공기 유량(L/min)을 이용하여 미세기포 발생펌프로 유입되는 미세기포 농도(C_{air})를 식(1)과 같이 정의하였다(Lee et al., 2014).

$$C_{air} = \frac{q_0 - q}{Q_{w0}} \tag{1}$$

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.

$$p = k_{H,pc} C_{N_2 \text{ or } O_2} \tag{2}$$

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

$$C_{aq} = C_{N_2} + C_{O_2} \tag{3}$$

용액의 농도는 온도, 가스 종류 및 분압에 영향을 받기 때문에 반트호프 식(van't Hoff equation)를 사용하여 식(4)와 같이 온도에 따른 영향을 보정하였다(Letcher, 2007; Smith and Harvey, 2007)

$$k_{H,pc}(T) = k_{H,pc}(T^{\theta}) \exp\left[-A\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^{\theta}}\right)\right] \tag{4}$$

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.

2.2.2 관내 체류시간에 따른 미세기포 농도

정치된 조건에서 용해도가 낮은 기체상에서 액체상으로 용해도가 낮은 기체의 단위시간-면적당 질량흐름(mass flux)으로 표현될 수 있다. 기체-액체 사이의 질량전달 관계식을 적용하여 열린계(open system)에서 질량수지를 취하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C_t) \tag{5}$$

여기에서 dC/dt은 시간에 따른 농도 변화(g/m^3·s), V는 성분농도가 증가하는 부피(m^3), $K_L a$는 부피 질량전달계수(1/s), $a(\frac{A}{V})$: 단위부피당 질량전달 경계면의 면적(m^2/m^3)이다.

Table 1. Approximate coefficients of molecular diffusion and diffusion coefficients for gases of low solubility in water at 20℃

Gas	Coefficient of molecular diffusion, cm^2/h	Gas transfer coefficient (K_L), cm/h	Estimated film thichness, cm
O_2	6.7×10^{-2}	$32.3\times1.018^{T-20}$	$\sim2\times10^{-3}$
N_2	6.7×10^{-2}	$34.0\times1.019^{T-20}$	$\sim2\times10^{-3}$
Air		$32.1\times1.019^{T-20}$	$\sim2\times10^{-3}$

식(5)를 한계구간 $C=C_0$, $C=C_t$, 그리고 $t=0$, $t=t$에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$C_t = C_s - (C_s - C_0)e^{-(K_L a)t} \tag{6}$$

여기에서 C_s는 기체의 포화농도(mg/L), C_0는 기체의 초기농도(mg/L), C_t는 t에서 기체의 농도(mg/L), t는 접촉시간(s)이다. 또한, Adeney and Becker(1919)가 제시한 20℃의 물에서 낮은 용해도를 갖는 기체의 확산계수는 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토출압력(P_g), 유입수 유량(Q_{w0}) 및 오리피스 구경(D_O)의 상관관계

미세기포 발생펌프의 운전에 있어 미세기포 발생에 영향을 주는 요소들을 정량적으로 비교하기 위하여 Fig. 3과 같이 토출압력(P_g), 유입수 유량(Q_{w0}) 및 오리피스 구경(D_O)의 상관관계를 나타내었다. Fig. 2의 7) 위치에 오리피스 구경(D_O)로 설치하여 미세기포 발생펌프의 토출압력(P_g)과 유입수 유량(Q_{w0})을 조절하였다. 오리피스 구경(D_O)이 1.0 ~ 4.5 mm로 증가함에 따라 유입수 유량(Q_{w0})은 1.48 ~ 11.02 L/min으로 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 토출압력(P_g)은 5.92 atm에서 3.46 atm으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이 결과로부터 가압수가 유출되는 위치의 오리피스 구경(D_O)를 조절하여 가압수의 토출압력(P_g)과 유입수 유량(Q_{w0})을 일정하게 조절이 가능하다는 것과 동일한 조건에서 가압구간의 배관내 체류시간을 조절할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

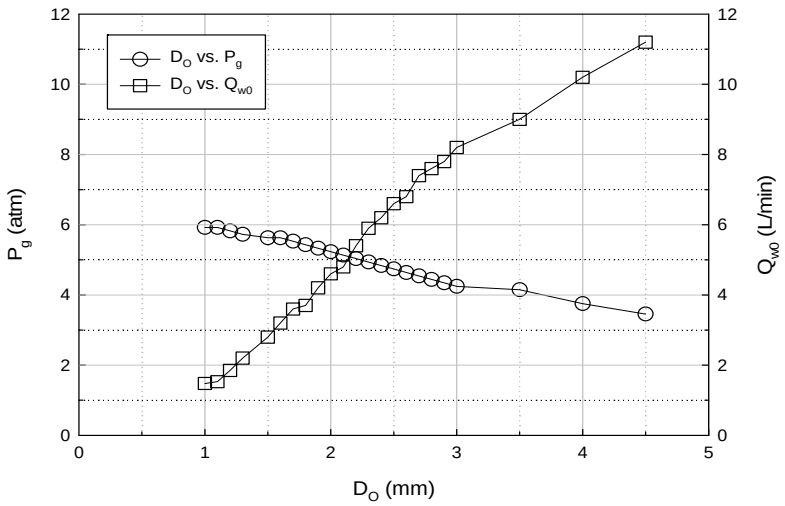


Fig. 3. Relationships of water flow rate (Q_{W0}) and the pressure of pump and pipe line (P_g) with Orifice diameter (D_O).

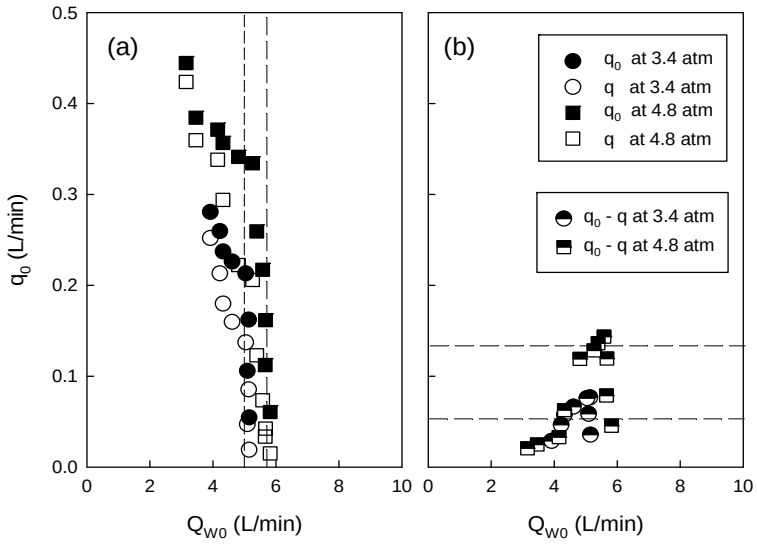


Fig. 4. Comparison of water (Q_{W0}) and air (q_0) flow rates at two micro-bubble generating pump and pipe line pressures (P_g).

3.2. 유입유량(Q_w) 및 체류시간(t)에 따른 미세기포 농도 (C_{air})

Fig. 4 (a)는 미세기포 발생펌프의 유입유량(Q_{w0})에 따른 공기 유입량(q_0) 및 유출량(q)의 관계로서 공기의 용해/분산량을 정량화하여 나타낸 것이다. 토출압력(P_g)이 3.4 atm인 조건에서 유입유량(Q_{w0})이 3.87 L/min에서 5.16 L/min로 증가할수록 공기유입량(q_0)는 0.2808 L/min에서 0.0547 L/min으로 감소하였다. 또한, 토출압력(P_g)이 4.8 atm인 조건에서도 3.4 atm인 조건과 유사하게 유입유량(Q_{w0})이 3.16 L/min에서 5.63 L/min로 증가할수록 공기유입량(q_0)는 0.4444 L/min에서 0.0606 L/min으로 감소하는 경향을 보였다. 유입유량(Q_{w0})이 5.04 L/min (P_g = 3.4 atm)와 5.71 L/min (P_g = 4.8 atm)이 되는 지점에서 약간의 유입유량(Q_{w0}) 변화에도 공기 유입량(q_0)이 크게 감소되면서 미세기포가 발생되지 않았다. 미세기포 발생펌프는 펌프케이싱 내의 진공압력에 의해 공기 유입량(q_0)이 결정되기 때문에 5.04 L/min (P_g = 3.4 atm)와 5.71 L/min (P_g = 4.8 atm)의 지점까지만 유입유량(Q_{w0})에 따라 공기 유입량(q_0)이 증가하였다. Fig. 4의 (b)에 나타낸 것과 같이 순공기 유입량(q_0 - q)은 토출압력(P_g)이 3.4 atm에서 0.0587 - 0.0767 L/min이었지만 토출압력(P_g)이 4.8 atm에서는 0.1193 - 0.1435 L/min로서 토출압력(P_g)에 따라 증가하는 경향을 보였다.

미세기포 발생펌프가 안정적으로 운전되는 범위에서 오리피스 구경(D_O)에 의해 Fig. 4와 같이 도출된 유입유량(Q_{w0})과 공기 유입량(q_0)을 조절하면서 미세기포 발생펌프 및 배관 내의 체류시간(t)에 따른 미세기포 농도(C_{air})를 Fig. 5 (a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 5 (a)의 토출압력(P_g) 3.4 atm인 조건에서 체류시간(t)이 1.30 - 1.43 s일 때 미세기포 농도(C_{air})는 11.53 - 15.04 mL/L이었다. Fig. 5 (b)의 토출압력(P_g) 4.8 atm인 조건에서 체류시간(t)이 1.17 - 1.37 s일 때 미세기포 농도(C_{air})는 21.04 - 25.29 mL/L이었다. Fig. 5 (a)와 (b)를 비교해 보면, 토출압력(P_g)에 비례하여 용해/분산되는 미세기포 농도(C_{air})가 증가한 것으로 판단된다. Lee et al.(2014)의 연구결과에서 미세기포 발생펌프에 토출밸브를 설치하여 토출압력(P_g)을 3.5 - 5.0 kg_f/cm^2(3.4 - 4.8 atm)으로 유지하였을 때 미세기포 농도(C_{air})는 8.07 - 12.60 mL/L를 나타낸다고 보고하였지만, 미세기포 발생펌프에 설치된 오리피스에 의해 거대기포 발생이 감소하여 Fig. 5의 (a)와 (b)와 같이 미세기포 농도(C_{air})가 증가한 것으로 판단된다. 이것은 Okamoto et al.(2015)가 제시한 회전흐름형(rotationing-flow type) 장치에서 노즐의

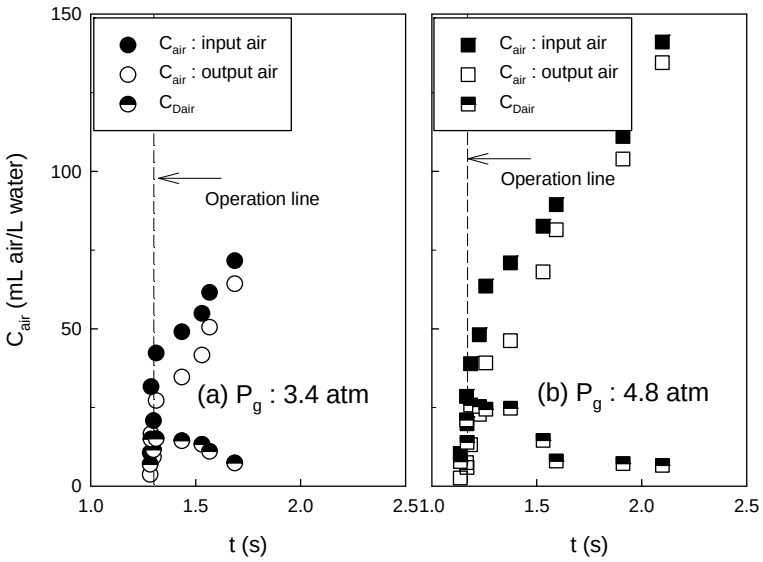


Fig. 5. Effect of retention time in the micro-bubble generating pump and pipe line on dissolved/dispersed air concentration (C_{air}).

구경 및 구조와 기·액 유량비에 따라 수중에 용해/분산되는 공기 및 산소 농도가 증가한다는 보고와 일치하는 결과이다. 또한, 미세기포 농도(C_{air})도 Bahadori et al. (2013)이 Vandermonde matrix 프로그램에 의해 제시하였던 공기 농도(T = 30℃, P = 500 kPa)인 63.6 mL/L(90.9 mg/L)에 대해 33.1 - 39.8%에 해당하는 범위로 높아지는 결과를 보였다. 이 결과에서 미세기포 발생펌프는 토출압력(P_g)에 따라 미세기포 농도(C_{air})가 약간 달라지지만 유입유량(Q_{w0})에 대해 약 1.2 ~ 2.6% 정도의 공기가 미세기포로서 용해/분산될 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 미세기포 농도 (Cair)와 체류시간 (t)의 상관관계

Fig. 6은 식(2) - 식(4)을 이용하여 헨리 법칙에 의한 수온별 공기의 용해량을 산정한 것이다. 이 결과에서 수온이 30℃인 조건에서 미세기포 발생펌프의 운전 압력이 3.4와 4.8 atm에서 공기가 물에 충분히 녹을 수 있는 평형시간이 주어진다면, 수중으로 용해되는 이론적인 용존공기농도는 53.1과 74.9 mL air/L water이다. 미세기포 발생펌프에 의해 용해/분산되는 미세기포 농도(C_{air})는 3.4와 4.8 atm에서 각각 11.53 - 15.04 mL/L와 21.04 - 25.29 mL/L로서 식(2) - 식(4)로서 산정된 이론적인 용존공기농도에 비해 약 20 - 30%로서 매우 낮은 값을 나타내었다. 이 결과는 이론적인 용존공기농도(C_{air})가 평형시간에 대한 가정으로부터 산정된 것이므로 미세기포 발생장치의 배관내 체류시간이 1.13 - 2.12초로서 평형시간과 같은 공기용해량은 나타나지 않아 Fig. 6에서 이론적인 용존공기농도에 비해 용해/분산되는 미세기포 농도(C_{air})가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

수온이 30℃인 조건에서 미세기포 발생펌프의 운전 압력이 3.4와 4.8 atm인 조건에서 Table 1과 같이 공기의 K_L 값이 $32.1\times1.019^{T-20}$, 분산되는 공기방울크기가 100 ㎛, 그리고 미세기포 발생펌프의 토출유량이 5.0 L/min라고 가정하고 식(6)을 이용하여 시간에 따른 공기용해량을 Fig. 7와 같이 계산하였다. 이 결과에서 2000초 이상이 되어야 거의 공기용해량이 평형조건에 도달한다는 것을 알 수 있었다. 체류시간이 1.3초로 하여 운전 압력이 3.4와 4.8 atm에서 공기용해량(C_{air})를 산정하면 각각 1.53과 1.59 mL air/L water이었다. 평형시간의 공기용해량인 54.64와 78.06 mL air/L water에 비하여 2.0 - 2.8%정도만 용해되고 나머지 약 97.2 - 97.1%는 기계적으로 분산되는 것으로 판단되었다. 그러나, 미세기포 발생조건을 정량화하기 위하여 운전조건에 대한 많

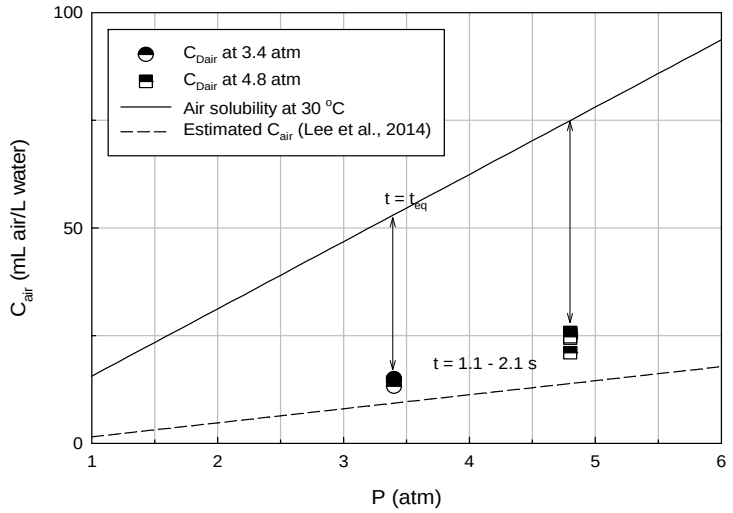


Fig. 6. Variation of C_{air} for micro-bubble generating pump and pipe line pressures at 30℃.

은 가정이 포함되어 있어 미세기포 발생펌프에서 발생되는 미세기포의 용해와 기계적인 분산 현상을 해석하기 위해서는 보다 세밀한 해석이 필요할 것으로 사료된다.

미세기포 발생펌프의 토출압력(P_g)을 4.8 atm으로 고정한 조건에서 Fig. 2의 7) 배관길이(L_P)을 조절하여 체류시간(t)에 따른 미세기포 농도(C_{air})를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 배관길이(L_P)가 0.5 - 10.0 m로 증가하여 체류시간(t)가 1.22 - 6.77초로 증가하게 되면 미세기포 농도(C_{air})는 25.86 mL air/L water에서 30.78 mL air/L water로 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 체

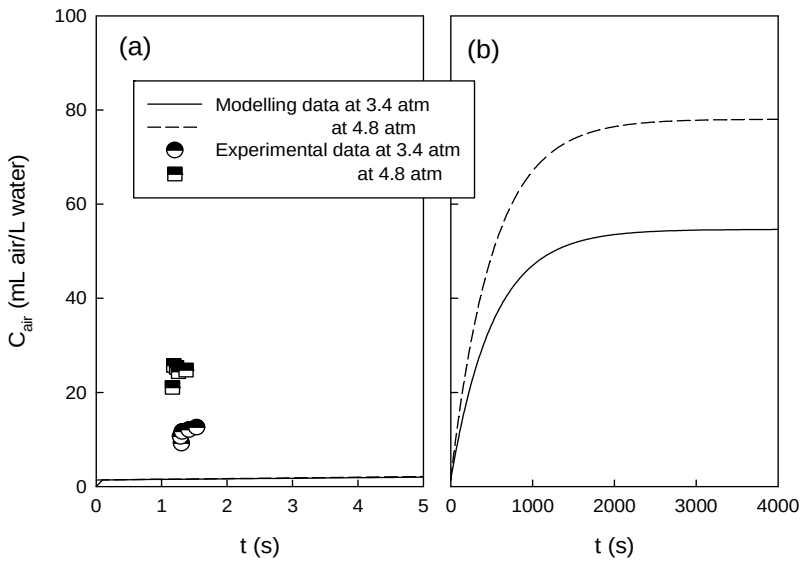


Fig. 7. Variation of C_{air} for the retention time of micro-bubble generating pump and pipe line compared to theoretical dissolving rate.

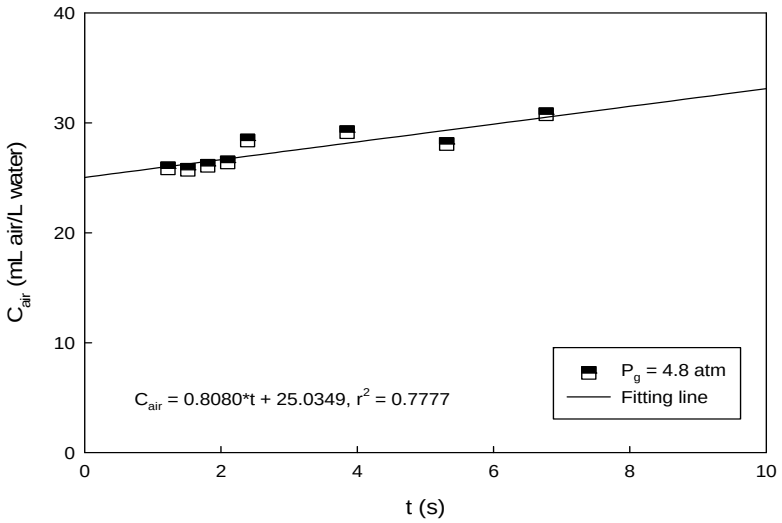


Fig. 8. Variation of C_{air} for the retention times of DAF pump.

류시간(t)에 따라 이론적인 공기용해량이 0.807 mL air/L water 정도 증가하는데 비해 용해/분산되는 미세기포 농도(C_{air})는 약 4배정도 높아진다는 것을 확인할 수 있었다. 미세기포 농도(C_{air})와 체류시간(t)은 $C_{air} = 0.8080t - 25.0349$, $r^2 = 0.7777$의 상관관계를 나타내었다. 이 결과는 Sadatomi et al.(2012)가 기·액유량비를 조절하여 다유체 혼합기(multi-fluid mixer) 내의 체류시간을 증가시키면 기포탑 내에서 발생하는 미세기포경은 약 3 - 4배정도 감소하여 용존산소농도가 높아진다는 보고와 일치하는 경향이었다. 그러나 배관길이(L_P)에 의해 체류시간(t)을 증가시키는 것은 미세기포 발생펌프의 손실수두를 증가시키기 때문에 1.22 - 6.77초의 제한적인 범위에서만 실험이 가능하였다.

4. 결 론

본 연구는 실험실 규모의 미세기포 발생 장치를 이용하여 토출압력(P_g), 오리피스 직경(D_O), 체류시간(t) 및 미세기포 농도(C_{air})의 상관관계를 도출하였고, 체류시간(t)에 따른 미세기포농도(C_{air})와 이론적인 공기용해도를

Table 1. Variation of operating parameters for different pipe lengths (L_P) of micro-bubble generating pump

L_P, m	Water inlet (Q_{w0}), LPM	t, s	Air inlet (q_0), LPM	Air outlet (q), LPM	C_{air} ((q_0-q)/Q_{w0}), mL air/L water
0.5	4.7783	1.2216	0.1829	0.0594	25.8628
1	4.5954	1.5137	0.1760	0.0578	25.7185
1.5	4.5090	1.8057	0.1773	0.0597	26.0875
2	4.4259	2.0978	0.1743	0.0575	26.3938
2.5	4.3457	2.3898	0.1723	0.0489	28.3878
5	4.2474	3.8500	0.1725	0.0487	29.1403
7.5	4.1022	5.3102	0.1649	0.0498	28.0728
10	3.7206	6.7705	0.1659	0.0514	30.7817

$C_{D_{air}} = 0.8080t + 25.0349, r^2 = 0.7777$

비교하여 미세기포 발생펌프의 성능을 정량적으로 평가하였다.

토출압력(P_g) 3.4 atm와 4.8 atm인 조건에서 체류시간(t)이 1.30 - 1.43 s과 1.17 - 1.37 s일 때 미세기포 농도(C_{air})는 각각 11.53 - 15.04 mL/L와 21.04 - 25.29 mL/L이었으며, 토출압력(P_g)에 비례하여 용해/분산되는 미세기포 농도(C_{air})가 증가하는 경향을 보였다.

배관길이(L_P)에 따라 체류시간(t)가 1.22 - 6.77초로 증가시키면 미세기포 농도(C_{air})는 25.86 - 30.78 mL air/L water로 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 이론적인 공기용해량보다 용해/분산되는 미세기포 농도(C_{air})는 약 4배정도 높게 나타났다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 부산가톨릭대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 과제이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Adeney, W. E., Becker, H. G., 1919, The Determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water Part I, Philo. Maga. Series 6, 38, 317-337.

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. App. Chem. Eng., 8, 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.

Fujiwara, A., 2006, Microbubble generation using venturi tube, ECO Industry, 11, 27-30.

Fukushi, K., Tambo, N., Matsui, Y., 1995, A Kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment, Wat. Sci. Tech., 31, 37-47.

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, 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, J. Environ. Sci. int., 23, 97-104.

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

Muroyama, K., Imai, K., Oka, Y., Hayashi, J., 2013, Mass transfer properties in a bubble column associated with micro-bubble dispersions, Chem. Eng. Sci., 100, 464-473.

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, Resour. Pros., 46, 238-244.

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

Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H., Shikatani, 2012, Micro-bubble generation and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube, Exp. Therm. Fluid Sci., 41, 23-30.

Smith, F. L., Harvey, A. H., 2007, Avoid common pitfalls when using Henry's law, Chem. Eng. Prog., Sept., 33-39.