

ORIGINAL ARTICLE

슬러지 부상농축장치의 기·액 유량비에 따른 미세기포 발생 특성

이창한·박종원¹⁾·안갑환*

부산가톨릭대학교 환경행정학과, ¹⁾일솜주식회사

Micro-Bubble Generating Properties on Gas/Liquid Flow Rate Ratio with the Sludge Flotation/Thickening Apparatus

Chang-Han Lee, Jong-Won Park, Kab-Hwan Ahn*

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

¹⁾ILSOM Co., Ltd. R&D CENTER, Daejeon 305-509, Korea

Abstract

The sludge flotation/thickening apparatus equipped a micro-bubble generating pump was used to investigate micro-bubble generating properties on operational parameters. We evaluated micro-bubble generating properties as results to be operated the apparatus by operational parameters which are pump discharge pressure, air/water ratio(A/W ratio), air flow rate, and water flow rate. Micro-bubble generating efficiencies in pumps without recycling flow and with 50% of recycling flow was found to be very efficient on optimum A/W ratio from 1.06 to 3.62% and optimum A/W ratio from 1.05 to 4.06%, respectively. In condition of 3.6% of A/W ratio, we showed that the apparatus could be generated 36,000 ppm of micro-bubble concentration to be optimum treatment efficiency in sludge thickening process.

Key words : Microbubble, Pump, DAF, Sludge, Thickening

1. 서론

우리나라 하수처리장의 경우 외국에서 성능이 검증된 정형화된 하수처리 공정이 도입이 일반적이었으나, 각 처리장의 부하량 및 원수 특성 때문에 하수 및 슬러지 처리를 위한 시설확장 및 신기술의 도입이 추진되고 있다(Kim, 2007). 하수슬러지를 포함한 슬러지 부상농축공정은 제지 및 펄프 제조공정에 펄프의 회수 및 처리 공정으로 도입되기 시작하였다. 하수슬러지 부상농축은 미국, 벨기에, 일본 등이 현장적용을

주도해 왔으며, 슬러지 농축효율에 큰 영향을 주는 DAF(Dissolved Air Flotation)의 공정효율을 높이기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있다(Rubio 등, 2002). 하수슬러지는 대부분의 하수처리장에서 슬러지 개량을 거친 후 중력농축, 부상농축, 및 원심분리를 이용하여 농축되고 있다. 슬러지 농축에 있어 저 밀도의 플록을 형성하는 하수슬러지는 공정의 효율면에서 중력농축 및 원심분리에 비해 부상농축이 유리하다는 연구결과가 보고된 바 있다(Bratby와 Ambrose, 1995; Choi와 Chung, 2000). 정수슬러지의 고품질 플럭스,

Received 18 July, 2013; Revised 5 September, 2013;

Accepted 10 September, 2013

*Corresponding author : Kab-Hwan Ahn, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

Phone: +82-51-510-0510

E-mail: ahnkh@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.

부상속도, 폴리머 주입량 등의 운전요소를 이용하여 중력과 부상농축의 성능을 비교한 결과에서 중력농축에 비해 부상농축이 더 높은 고형물플럭스를 나타낸다고 하였다(Park 등, 2006).

국내에 도입된 슬러지의 부상농축용 DAF 공정은 포화조(saturator)형과 DAF 펌프형 공정으로 구분된다. DAF 펌프형 공정은 기존의 포화조형 공정의 펌프, 공기 주입용 콤프레샤, 공기/순환수 접촉탱크를 DAF 펌프로 콤팩트화하여 개선한 것이다. 공기를 순환수에 용해/분산시켜 가압수 제조가 용이하기 때문에 최근 운전특성 및 성능에 대한 효율 비교 및 실용화 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다(Ministry of Environment, 2004). 그러나, DAF 펌프를 이용한 공정은 도입된 사례가 많지 않아 정수장의 DAF 펌프형 공정의 운전효율과 슬러지 농축에 대한 일부 연구결과만 제시되었으며(Lee 등, 2009a; Lee 등, 2009b), DAF 펌프효율, 운전자료 및 설계인자 등이 거의 정립되지 않았다.

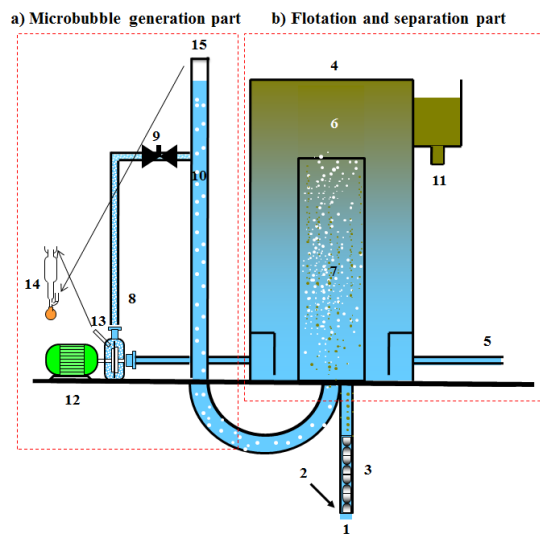
본 연구는 DAF 펌프 공정을 구성하기 위한 기초연

구로서 실험실 규모의 미세기포 발생펌프형 장치를 이용하여 유입 및 유출 공기량에 따른 미세기포 발생 효율을 검증하고 하수슬러지 농축장치의 기초설계요소를 도출하고자 한다.

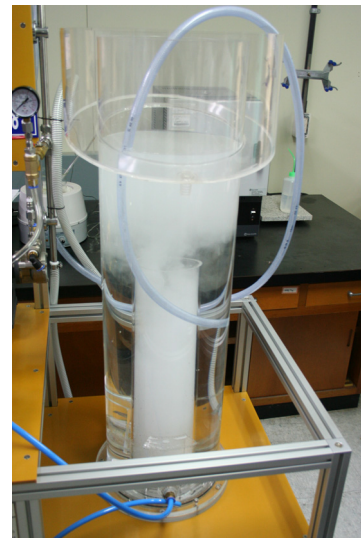
2. 재료 및 방법

2.1. 미세기포 발생장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연속식 미세기포 발생장치를 나타낸 것으로서 기존의 포화조를 미세기포 발생 펌프로 콤팩트화하고 부상분리시 높은 고형물 부하량에서도 운전할 수 있도록 설계된 구조이다. 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, 2009a). Fig. 1의 1)은 이 공정의 구조를 나타낸 것으로서 a) 미세기포 발생부와 b)는 부상



1) Schematic diagram



2) micro-bubble generating pump system

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

분리부로 구성되어 있고, 스키머는 부착되어 있지 않아 수위에 의해 스킴이 월류하는 구조로 되어 있다. 또한, Fig. 1의 2)와 같이 실험실에 설치하여 유입공기량 및 순환수에 용해/분산되는 공기량을 실험을 통해 정량화하였다. 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 효율을 평가하였다.

2.2. 흡입공기량/미세기포 발생량 및 슬러지 부상농축효율 측정

Fig. 1의 a)와 같이 흡입공기량 및 미세기포 발생량은 미세기포 발생부에 있어 (13)의 펌프케이싱으로 유입되는 공기량과 (15) 거대기포 분리장치로 배출되는 공기량을 Soap-film flowmeter(HP, 1-10-100 mL)을 사용하여 측정하였고, 이 자료를 펌프의 토출압력과 유량별로 정량화하여 용해/분산되는 공기량을 평가하였다. A/W ratio와 순 A/W ratio은 각각 $\frac{Q_A}{Q_w} \times 100$ 그

리고 $\frac{Q_A - Q_S}{Q_w} \times 100$ 로 정의하여 계산하였다. 여기에서

Q_w : 미세기포 발생펌프에 토출되는 물 유량(L/min),
 Q_A : (13)의 펌프케이싱으로 유입되는 공기 유량(L/min),
 Q_S : (15)의 거대기포 분리장치로 유출되는 공기 유량(L/min)이다.

2.3. 미세기포 발생펌프형 슬러지 부상농축장치

미세기포 발생펌프형 하수슬러지 부상농축 공정의 설계에 있어서 부상농축조의 고흡물 부하량에 따른 설계기준을 이용하였다(Cleverson 등, 2007). 본 연구에 적용된 부상농축조의 고흡물 부하량은 220 kgTS/m²/d(9.17 kgTS/m²/hr)로 하여 설계하였다. 슬러지 부상농축장치의 설계인자는 Table 1에 나타내었다. 미세기포 발생장치의 토출압력은 운전범위인 4.0 - 6.0 kg/cm² 중에서 5.0 kg/cm²로 하여 유량이 5.22 L/min인 조건으로 하여 설계기준을 산정하였다. 이 시스템의 처리유량은 4.8 m³/day(3.3 L/min)으로 하였고, 유입되는 하수슬러지 농도는 2000 mg/L를 기준으로 하였다.

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

Parameter			Micro-bubble generating pump system
Pretreatment	Coagulation	Type	inline mixer
		Velocity gradient, 1/s	900
	Reaction zone	Retention time, s	0.5
		Hyd. Load., m/hr	14.5 m/hr
Flotation	Separation zone	Volume, L	8.3
		Retention time, s	480
	Total	Hyd. Load., m/hr	5.0 m/hr
		Volume, L	58.4
Height, m			1.01
Reaction and separation zone, L			66.7
Bubble generation	Pump	Type	Wesco pump
		Number, ea	2
	Recycle flow	Flow rate, L/min	5 - 10
		Pressure, kg/cm ²	4.0 - 6.0
		Retention time, s	158
ratio, %			200

3. 결과 및 고찰

3.1. 공기 및 물 유량비(A/W ratio)에 따른 미세기포 발생 효율 : 가압수 미반송

Fig. 2는 미세기포 발생펌프의 미세기포 발생효율(A/W ratio)을 가압수 토출압력에 따른 물과 공기 유량 변화를 비교하여 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 거대기포 분리장치의 상부는 열린 상태 a) open bubble separator와 닫힌 상태 b) close bubble separator로 구분하여 성능을 평가하였다. 두 조건에서 bubble separator를 비교한 것은 needle valve를 통과한 가압수가 이송되는 배관의 조건에 따른 기포발생 효율을 비교하기 위한 것이다. a)와 b)의 경우에서 모두 가압수의 토출압력이 증가함에 따라 흡입 물 유량이 각각 9.77 - 3.18 L/min과 9.82 - 3.22 L/min이었으며, 흡입 공기유량도 흡입 물 유량에 따라 각각 0.269 - 0.074 L/min과 0.265 - 0.077 L/min으로 감소하는 경향을 보였다. 토출압력이 4.0 kg/cm²인 조건은 a)와 b) 조건에서 A/W ratio가 각각 2.68%와 2.63%이었으며, 4.5 - 5.5 kg/cm²의 범위에서 a)와 b) 조건에서 A/W ratio가 각각 2.27 - 2.36%와 2.20 - 2.34%로서 약간 감소하는 경향을 보였다. a)와 b) 조건에서 거의 유사

A/W ratio를 보였기 때문에 needle valve를 통과 후 가압수가 이송되는 배관의 조건에 따른 기포발생 효율의 변화는 거의 없었다. 이 결과로부터 미세기포 발생펌프는 A/W ratio가 약 2.3±0.1%에서 최적조건이었다. 토출압력이 4.0 kg/cm²이하의 조건은 공기흡입량은 증가하지만 과도한 공기가 펌프 케이싱으로 유입되어 미세기포발생펌프가 정상적으로 운전되지 않아 기포발생효율이 감소하는 결과를 보였다. 미세기포 발생효율에 있어 실제 토출되는 공기기포 또한 거대기포(입경 1000μm 이상)가 형성되어 부상분리 효율이 감소될 것으로 사료되었으며, 거대기포 발생량에 대한 부분은 검증 중에 있다. A/W ratio에 관계없이 토출압력이 6.0 kg/cm²이상이 되면 토출 유량이 1 L/min 이하로 낮아지며 펌프케이싱 내의 압력이 높아 공기가 거의 흡입이 되지 않는 현상이 발생되어 미세기포가 거의 발생되지 않는 결과를 보였다.

3.2. 공기 유입량에 따른 미세기포 발생효율 : 가압수 반송

Fig. 3은 가압수를 50% 반송한 미세기포 발생펌프의 미세기포 발생효율(A/W ratio)을 가압수 토출압력에 따른 물과 공기 유량변화를 비교하여 나타내었다. 가압수를 50% 반송한 조건은 가압수의 토출압력이

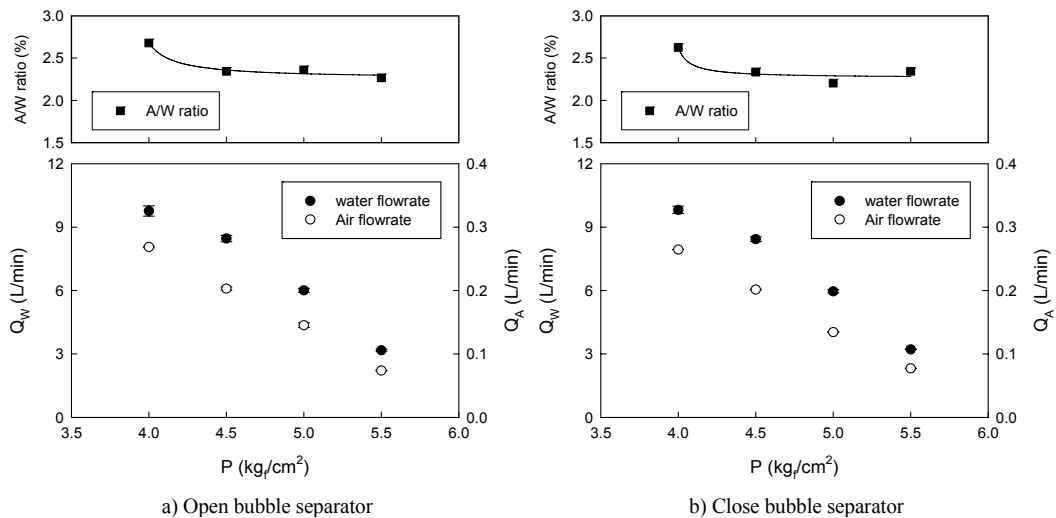


Fig. 2. The variation of Q_w and Q_a on discharge pressure using the micro-bubble generating pump without recycling flow.

3.0 - 4.0 kg/cm²로 비교적 낮은 토출압력에서도 운전이 가능하였다. Fig. 2와 유사하게 a)와 b)의 경우에서 모두 가압수의 토출압력이 증가함에 따라 흡입 물 유량이 각각 7.87 - 2.72 L/min과 7.79 - 2.73 L/min이었으며, 흡입 공기 유량도 각각 0.188 - 0.079 L/min과 0.191 - 0.080 L/min으로 감소하는 경향을 보였다. Fig. 3에서도 Fig. 2와 유사하게 needle valve를 통과 후 가압수가 이동되는 배관의 조건에 따른 기포발생 효율을 변화는 거의 없었다. 그러나, 토출압력이 3.0 - 4.0 kg/cm²의 범위에서 a)와 b) 조건에서 A/W ratio가 각각 2.34 - 2.81%와 2.28 - 2.85%를 나타내었으며, 가압수 반송이 없는 조건과 달리 토출압력의 증가함에 따라 흡입 공기 유량이 감소폭이 크게 나타나 A/W ratio도 증가하는 경향을 보였다. 또한, 가압수의 50% 반송에 의해 낮은 토출압력에서도 일정한 A/W ratio를 유지할 수 있어 미세기포 발생효율을 높일 수 있는 조건이라 판단되었으며, 가압수 반송에 의해 미세기포 발생펌프의 토출유량의 조절이 가능하였다.

3.3 공기 및 가압수 유량에 따른 미세기포 발생효율

Fig. 4는 Fig. 1에 나타낸 미세기포 발생장치로 흡입 공기 유량(1-Air flowrate), 거대기포 분리장치로 배출

공기 유량(2-Air flowrate), 및 토출 물 유량(water flowrate)을 비교하여 총 A/W ratio와 순 A/W ratio를 산정하여 나타낸 것이다. Fig. 2의 a)와 같이 Open bubble separator인 조건하에서 가압수를 반송하지 않은 경우, Fig. 4의 a)에 나타난 바와 같이 가압수의 토출압력이 4.5 - 5.5 kg/cm²인 범위에서 가압수의 토출압력이 증가함에 따라 토출 물 유량(water flowrate)과 공기 흡입유량(1-Air flowrate)이 각각 8.46 - 3.18 L/min과 0.203 - 0.074 L/min으로 감소하는 경향을 보였으며, 거대기포 분리장치로 배출 공기 유량(2-Air flowrate)은 0.088 - 0.066 L/min으로 약간 감소하였으나 크게 변화하지 않았다. Fig. 3의 a)와 같이 Open bubble separator인 조건하에서 가압수를 50% 반송한 경우, Fig. 4의 b)에서 나타난 바와 같이 가압수의 토출압력이 3.0 - 4.0 kg/cm²인 범위에서 가압수의 토출압력이 증가함에 따라 토출 물 유량(water flowrate)과 흡입 공기 유량(1-Air flowrate)이 각각 7.87 - 2.72 L/min과 0.189 - 0.078 L/min으로 급격하게 감소하는 경향을 보였으며, 거대기포 분리장치로 배출되는 공기 유량(2-Air flowrate)은 0.122 - 0.072 L/min으로 약간 감소하였으며 반송하지 않은 조건에 비해 높은 유량

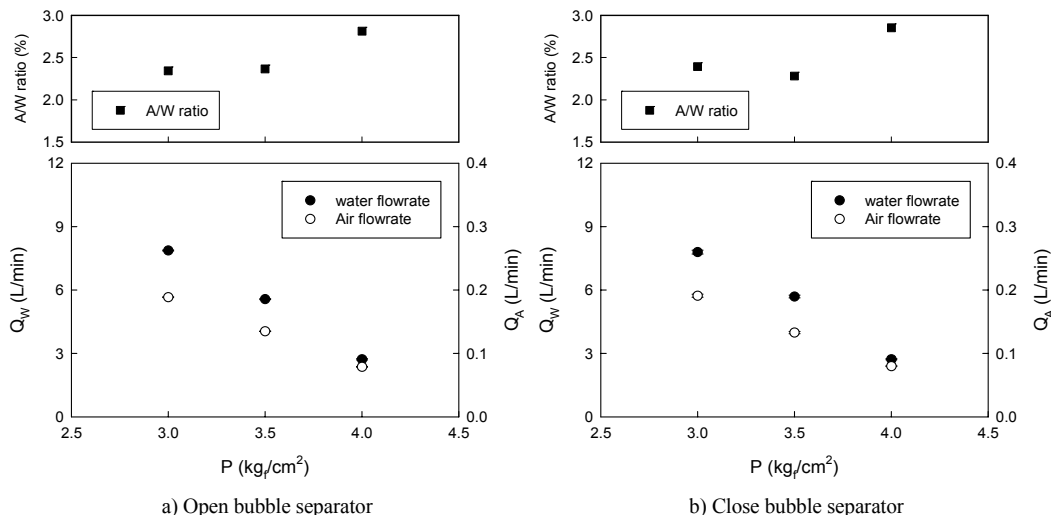


Fig. 3. The variation of Q_w and Q_a on discharge pressure using the micro-bubble generating pump with recycling flow(50%).

으로 운전이 가능하였다. 따라서, Fig. 4에 나타난 바와 같이 가압수를 0%와 50%로 반송한 운전결과는 가압수의 토출압력이 각각 5.0 kgf/cm^2 와 3.5 kgf/cm^2 인 조건에서 A/W ratio(순 A/W ratio)가 각각 2.36%(1.41%)와 2.37%(0.87%)로 최적의 운전조건이었으며, 가압수의 토출압력이 더 높아지면 순 A/W ratio가 급격하게 감소하는 결과를 나타내었다.

3.4. A/W ratio에 따른 미세기포 발생효율

Fig. 5는 미세기포 발생효율을 정량화하기 위하여 공기/물 비율에 따른 흡입 공기 유량(1-Air flowrate), 배출 공기 유량(2-Air flowrate), 토출 물 유량(water flowrate), 및 순 A/W ratio를 나타낸 것이다. Fig. 5의 a)에서 나타난 바와 같이 open bubble separator와 가압수를 반송하지 않고 토출압력이 5.0 kgf/cm^2 인 조건에서 토출 물 유량(water flowrate)을 5.39 - 5.78 L/min로 유지하면서 흡입 공기 유량(1-Air flowrate)과 배출 공기 유량(2-Air flowrate)은 각각 0.061 - 0.259 L/min과 0.015 - 0.206 L/min으로 증가시킬 수 있었으며, 이 때 A/W ratio이 1.07 - 4.59%이었다. 그러나 A/W ratio이 9.97%이상으로 증가하게 되면 토출 물 유량(water flowrate)이 3.47 L/min로 감소하면

서 미세기포 발생펌프의 성능이 급격하게 저하되어 운전이 불가능한 것으로 확인되었다. Fig. 5의 b)에서 나타난 바와 같이 open bubble separator와 가압수를 50% 반송한 조건에서 가압수의 토출압력이 3.5 kgf/cm^2 인 조건에서 토출 물 유량(water flowrate)을 5.03 - 5.16 L/min로 유지하면서 흡입 공기 유량(1-Air flowrate)과 배출 공기 유량(2-Air flowrate)은 각각 0.055 - 0.213 L/min과 0.020 - 0.154 L/min으로 증가시킬 수 있었으며, 이 때 A/W ratio이 1.05 - 4.06%로 나타났다. 그러나, 공기/물 비율이 5.22%이상으로 증가하게 되면 토출 물 유량(water flowrate)이 4.31 L/min로 감소하게 되어 미세기포 발생펌프의 성능이 급격하게 저하되는 것으로 확인되었다.

Fig 5의 a)와 같이 가압수를 반송하지 않은 경우, 미세기포 발생펌프는 A/W ratio가 1.06 - 3.62%의 범위에서 최적의 미세기포 발생효율을 나타내었다. Fig. 5의 b)와 같이 50%의 가압수를 반송할 경우, 미세기포 발생펌프는 가압수를 반송하지 않은 결과에 비해 A/W ratio가 1.05 - 4.06%의 범위로서 넓은 범위에서 최적의 미세기포 발생효율을 나타내었으며, 그 이상의 A/W ratio에서는 토출 물 유량이 크게 감소하여 운

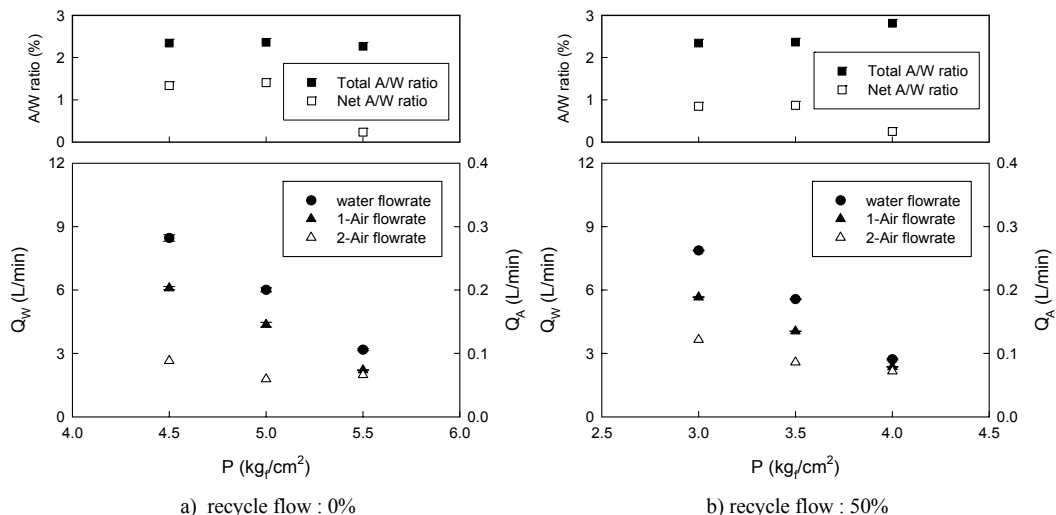


Fig. 4. The variation of Q_w , Q_A , and A/W ratio on discharge pressure using the micro-bubble generating pump.

전에 적합한 범위를 초과하였다. 포화조형 DAF 공정의 운전조건(Edwald, 2010)에 있어 20°C에서 반송율을 10%라고 하면 미세기포 농도(Φ_b)와 개수(n_b)는 각각 7,300 ppm와 65,000 개수/mL이다. 이 결과를 반송율이 50%인 슬러지 농축공정에 적용하여 미세기포농도는 각각 36,500 ppm으로 계산되며, 이 장치에서 토출되는 미세기포 크기는 토출압력이 4.5 ~ 6.0 kg/cm²에서 약 40~43 μ m범위를 나타낸다는 것을 이전의 연구에서 보고한 바와 같이(An 등, 2002), 본 연구 결과에서 A/W ratio가 3.6%일 경우 발생하는 미세기포 농도가 36,000 ppm로서 기존 포화조형과 유사한 처리 효율을 나타낼 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 미세기포 발생펌프형 하수슬러지 부상농축시스템에서 펌프 토출압력 및 유량, A/W ratio의 비교를 통하여 미세기포 발생효율을 평가한 실험으로서 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

미세기포 발생효율은 open bubble separator와 가압수를 반송하지 않고 운전할 경우, 토출압력이 5.0 kg/cm²에서 공기/물 비율이 1.91 - 2.8%로 범위에서

운전이 가능하며, 토출 물 유량(water flowrate)도 5.61 - 5.76 L/min의 범위에서 일정하게 운전이 가능하다. Open bubble separator와 가압수를 50%의 반송율로 운전할 경우, 토출압력이 3.5 kg/cm²에서 A/W ratio가 2.04 - 3.06%로 범위에서 운전이 가능하며, 토출 물 유량(water flowrate)도 5.07 - 5.13 L/min의 범위에서 일정하게 운전이 가능한 것으로 확인되었다.

가압수를 반송하지 않은 경우, 미세기포 발생펌프는 총 A/W ratio가 1.06 - 3.62%의 범위에서 최적의 미세기포 발생효율을 나타내었다. 50%의 가압수를 반송할 경우, 미세기포 발생펌프는 가압수를 반송하지 않는 결과에 비해 총 A/W ratio가 1.05 - 4.06%의 범위로서 넓은 범위에서 최적의 미세기포 발생효율을 나타내었으며, 이 이상의 A/W ratio에서는 토출 물 유량이 크게 감소하여 운전에 적합한 범위를 초과하였다. A/W ratio가 3.6%인 조건을 반송율이 50%인 슬러지 농축공정에 적용하면 미세기포 농도가 36,000 ppm로서 기존 포화조형과 유사한 처리효율을 나타낼 것으로 판단된다.

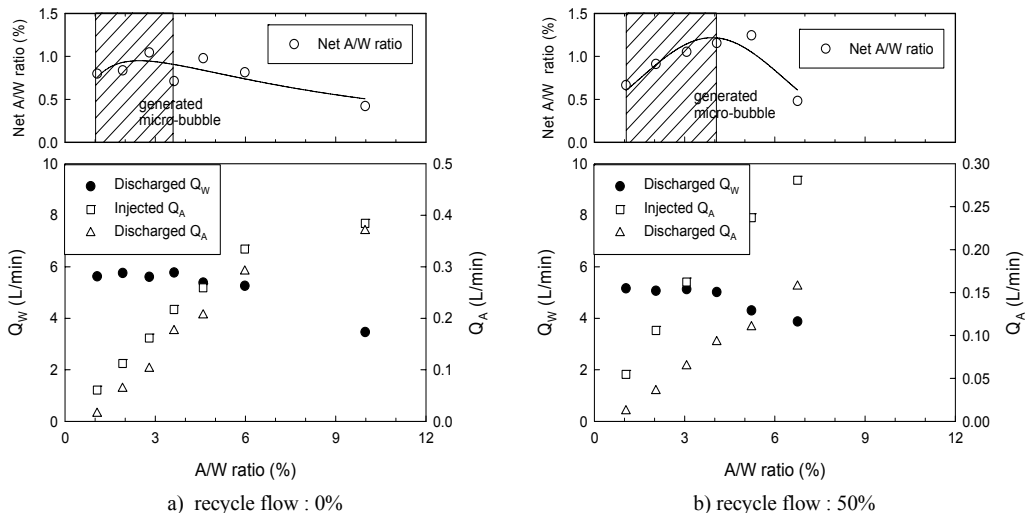


Fig. 5. The variation of Q_w, Q_a, and net A/W ratio on A/W ratio using the micro-bubble generating pump.

감사의 글

본 논문은 산학협동재단 2012년도 학술연구비 지원사업에 의해 수행된 과제이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Bratby, J. R., Ambrose, W. A., 1995, Design and control of flotation thickeners, *Wat. Sci. Tech.*, 31(3-4), 247-261.
- Choi, Y. G., Chung, T. H., 2000, Effects of humus soil on the settling and dewatering characteristics of activated sludge, *Wat. Sci. Tech.* 42(9), 127-134.
- 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.
- Kwak, D. H., Kim, S. J., Lim, Y. H., Flotation Separation of Biological Floc Using the Dissolved Air Flotation Process, *J. of the Korean Society of Water and Wastewater*, 18(5), 649-655.
- Kim, K. S., 2007, The Present State and Improvement of Sludge Disposal from Sewage Treatment Plants, 29(1), 8-16.
- Park, S. C., Han, M. Y., Dockko, S., Kwon, S. B., 2006, Thickening of Sludge from DAF process by Flotation Application of Solid Flux Theory and Effective Factors, *J. of the Korean Society of Water and Wastewater*, 20(4), 617-626.
- Rubio, J., Souza, M. L., Smith, R. W., 2002, Overview of flotation as a wastewater treatment technique, *Miner. Eng.*, 15(3), 139-155.
- Ministry of Environment, 2004, Improvement of Drinking-Water Treatment Plant and Advanced Water Treatment Technology, 63-65.
- Lee, C. H., An, D. M., Kim, S. S., Cho, S. H., Ahn, K. H., 2009a, Pretreatment Condition in the Full Scale Dissolved Air Flotation Process, *KSEE*, 31(1), 58-63.
- Lee, C. H., Ahn, K. H., 2009b, Effect of Chemical Conditioning on Flotation and Thicken Properties of Sludge using a Microbubble generating Pump, *KSEE*, 31(8), 641-648.
- 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, *Theories and Applications of Chemical Engineering*, 8(1), 1553-1556.