

상수원수의 혼화 및 응집 조건에 따른 DAF pump 장치의 부상분리효율

안갑환 · 이창한*

부산가톨릭대학교 환경행정학과

(2011년 2월 22일 접수; 2011년 3월 30일 수정; 2011년 4월 11일 채택)

Flotation Efficiency of the DAF Pump System for Mixing and Coagulation Conditions in Raw Drinking Water

Kabhwan Ahn, Changhan Lee*

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

(Manuscript received 22 February, 2011; revised 30 March, 2011; accepted 11 April, 2011)

Abstract

This study found that flotation efficiencies for removing algae and micro particles in raw water were optimized on mixing intensity and time of the mixing and flocculation conditions with a continuous DAF system. It is more efficient for mixing intensity at 23.1 s^{-1} and time at 660 s(Gt value : 15246) to float flocculated floc with the raw water in M water treatment plant. Flotation efficiency was more than about 0.9 when operated pressure and A/S ratio were sustained at $5 \text{ kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$ and up to $0.056 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$. The continuous DAF system made by the study could be continuously operated for 20 days and sustained not exceeding 4 NTU with raw water with low turbidity(13.4 ~ 9.8 NTU).

Key Words : DAF, Algae, Coagulation, Flocculation, Drinking water

1. 서론

우리나라는 하절기에 집중적인 강우로 인하여 다량의 영양염류 및 난분해성 물질이 상수원 수역으로 유입되어 조류(algae)가 빈번하게 발생하고, 이로 인한 수역의 pH 변화와 용존산소 고갈 등의 수질저하가 빈번하게 발생되고 있다. 수도권 상수원보호구역은 각 지방자치단체가 인접하여 이 지역의 개발로 인한 상수원 수질 저하가 가중되고 있다(조, 2005). 또한, 외국의 경우 하천상류 유역의 공장과 농경지에서 발

생되는 난분해성 물질의 오염 부하량이 점차 증가되고 있어 각 정수처리장은 안정된 운영을 위해 다양한 고도처리공정을 적용하고 있는 실정이다(Rebhun과 Lurie, 1993). 국내에 적용된 고도정수처리 공정은 활성탄을 이용한 BAC, 부상분리 및 오존 등의 공정이 주로 적용되고 있다(강 등, 2005; 성 등, 2004).

친수성인 조류와 휴믹물질과 같은 저밀도 입자는 기존의 혼화/응집/침전공정에 의해 고액분리하는 것이 어렵기 때문에 효율적으로 처리방안으로 부상분리공정의 일종인 용존공기부상(Dissolved Air Flotation : DAF)을 적용하고 있다. 특히, 이 공정은 하절기에 하천 및 호소수에서 발생하는 저밀도 조류의 제거에 효율적이라고 알려져 있다(Zabel, 1985). 원수에 포함된 규조류와 남조류(Markham 등, 1997) 그리고

*Corresponding author : Changhan Lee, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea
Phone: +82-51-510-0624
E-mail: chlee@cup.ac.kr

*Cryptosporidium*과 *Giardia*(Plummer 등, 1995)는 혼화와 응집에 의해 형성된 플록이 밀도가 낮아 기존 침전공정보다는 DAF 공정을 사용한 부상분리가 더 효율적이라고 보고한 바 있다. 고탁도 원수에 포함된 조류의 처리를 위하여 기존의 침전지를 DAF 공정으로 개조하여 처리효율을 높이는 연구도 진행된 바 있다 (Arnold 등, 1995).

DAF 공정의 현장 적용은 포화조형 및 DAF 펌프형과 같은 방식의 차이도 영향을 받지만, 유입되는 고형물 및 플록 부하량에 따른 설계인자 및 부상조의 구조를 선택하는 것이 더 중요한 문제이다. 낮은 고형물 부하량의 DAF 공정은 기존의 적용사례를 통해 소개가 많이 이루어졌으나, 높은 고형물 부하량의 DAF 공정은 제지 및 펄프 제조공정에서 도입되기 시작하여 고형물 함량이 슬러지 및 플록 제거 분야로 확대되고 있다(Rubio 등, 2002).

DAF 펌프형 장치는 기존의 포화조형 공정의 펌프, 공기 주입용 콤프레샤, 공기/순환수 접촉탱크를 DAF 펌프로 콤팩트화하여 개선한 공정이다. DAF 펌프를 이용한 공정은 도입된 사례가 많지 않아 DAF 펌프 효율, 운전자료 및 설계인자 등이 거의 정립되지 않았다. 따라서, 본 연구는 M 정수장 원수에 포함된 조류 및 미세입자들의 제거를 위해 회분식과 연속식 DAF 장치의 혼화/응집시 교반강도 및 시간을 최적화하고 이 조건에 따른 부상분리효율을 비교하였다. 최적의 운

전조건에서 연속식 DAF 장치를 20일 동안 연속운전하여 부상분리효율을 평가하였다. 또한, 각 운전조건에서 응집된 플록 크기 분석을 통해 혼화·응집 및 부상공정의 운전조건과 부상분리효율의 연관성을 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 원수 및 분석방법

상수원수는 낙동강 하류에 위치한 M 정수장으로 유입되는 원수를 사용하였다. 원수의 탁도는 실험기간인 9, 10, 11월을 기준으로 하여 측정일에 따라 차이는 있었지만 10 ~ 150 NTU를 나타내었다. 원수(T_0) 및 처리수(T)는 탁도계(2100N Turbidimeter, HACH)를 사용하여 탁도를 측정하였고, 원수(T_0) 및 처리수(T)의 탁도를 부상분리효율(탁도 제거효율($\eta_T = \frac{T_0 - T}{T_0}$))

로 환산하여 혼화와 응집 조건에 따른 처리성능을 비교하였다. 원수와 처리수에 포함된 입자 및 플록의 크기는 입도분석기(HELOS/BF, SYMPATEC)를 이용하여 분석하였으며, 혼화와 응집 과정에서 플록 크기의 변화를 관찰하였다.

2.2. 회분식 및 연속식 부상분리 실험방법

Table 1은 회분식 및 연속식 DAF 장치의 제원 및 운전 특성을 나타낸 것이다. 회분식 실험에서 응집/응

Table 1. Summary of DAF design and operating parameters

Parameter		DAF jar-tester (batch type)	Continuous DAF pump system	
Pretreatment	Mixing	Impeller	Inline mixer	
	Type	1120	-	
	Intensity (s^{-1})	60	10	
Coagulation	Retention time (s)	Impeller	Impeller	
	Type	51.6	30.0	
	Intensity (s^{-1})	1200	1200	
Flotation	Reaction zone	Retention time (s)	-	
	Hyd. Load. ($m \cdot hr^{-1}$)	-	-	
	Separation zone	Retention time (s)	600	500
		Hyd. Load. ($m \cdot hr^{-1}$)	-	-
Bubble generation	Type	Saturator	Saturator	
	Recycle	Pressure ($kg \cdot cm^{-2}$)	5.0 - 5.5	
	Retention time (s)	15	1	
	Ratio (%)	20.0 - 100.0	20.0 - 30.0	

결시 교반(Gt 값), 운전압력 및 운전조건(A/S 비)을 결정하고, 92 L 용량의 연속식 DAF 장치를 이용하여 연속운전을 수행하였다.

2.2.1. 회분식 부상분리 실험

혼화와 응집조건에 따른 부상분리효율은 DAF-jar tester(ECE engineering)를 이용하여 실험하였다. 이 장치는 포화조형 회분식 부상장치로서 1.3 L의 사각형 실린더가 6 초로 구성되어 있다. 실험조건은 가압수의 압력과 반송비를 각각 $4.0 \sim 6.0 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 와 20%로 하였으며, 운전조건은 A/S 비(공기/고형물 비 : $\text{mL} \cdot \text{mg}^{-1}$)로 환산하여 나타내었다.

회분식 부상실험은 혼화를 320 rpm ($G : 1000 \text{ s}^{-1}$)으로 60 초로 하고, 응집을 20 ($G : 23.1 \text{ s}^{-1}$), 30 ($G : 44.2 \text{ s}^{-1}$), 40 rpm ($G : 53.2 \text{ s}^{-1}$)으로 하여 교반시간을 60 ~ 1860 초로 변화시키면서 실험하였다. 혼화와 응집의 교반조건은 교반속도(rpm)를 속도경사(G)로 환산하고, 체류시간(t)을 곱하여 무차원인 Gt 값(-)으로 표시하였다. 또한 부상시간은 10 분으로 실험하였다. 회분식 실험에서 도출된 혼화와 응집조건은 연속식 DAF 펌프형 부상분리장치에 적용하였다.

2.2.2. 연속식 부상분리 실험

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연속식 DAF 장치를 나타낸 것으로서 기존의 포화조를 미세기포 발생 펌프

로 컴팩트화하고 부상분리시 높은 고형물 부하량에서도 운전할 수 있도록 설계된 구조이다. 이 장치는 a) 미세기포 발생부와 b)는 부상분리부로 구성되어 있고, 스키머는 부착되어 있지 않아 수위에 의해 스킴이 월류하는 구조로 되어 있다. 이 공정은 공기를 순환수에 용해/분산시켜 가압수 제조가 용이하며, 현재 운전특성 및 성능에 대한 효율 비교 및 실용화 연구가 진행되고 있다(이 등, 2009).

3. 결과 및 고찰

3.1. 교반조건에 따른 응집 특성

원수의 탁도는 실험조건에 따라 차이가 있을 수 있으나 13.2 ~ 15.3 NTU 범위로 측정되었고, 포화조형 회분식 부상장치를 이용하여 응집조건(완속교반 속도 및 시간)에 따른 응집된 플록 크기 및 부상분리효율을 실험하였다. 원수의 혼화와 응집 조건은 혼화시 교반속도와 시간을 각각 1000.0 s^{-1} 와 60 s로 일정하게 한 후 응집시 교반속도와 시간을 각각 23.1 ~ 53.2 s^{-1} 과 0 ~ 1800 s로 조절하였다. 응집제는 20 ppm으로 일정하게 주입하였다.

Fig. 2는 혼화시 교반속도를 23.1 s^{-1} 로 고정한 후 교반시간에 따른 응집된 플록의 크기를 나타낸 것이다. 원수에 포함된 입자의 크기는 약 10 ~ 20 μm 의 범위였지만, 응집제를 주입한 후 혼화를 하면 응집된 플록의 크기는 약 60 μm 로 증가하였다. 교반시간이 600 s에서 플록의 크기는 150 μm 로 성장하였지만, 그 이후에는 교반시간을 증가시키더라도 플록의 크기가 150 ~ 180 μm 으로 더 이상 성장하지 않았다. Fig. 3는 혼화시 교반속도를 44.2 s^{-1} 로 조절하여 교반시간에 따른 플록의 크기를 나타낸 것이다. 이 결과에서 교반시간에 따른 플록 크기 변화는 Fig. 2과 유사하게 나타났지만 교반시간이 1500 s 이상 되어야 플록의 크기가 150 ~ 160 μm 로 증가하는 경향을 보였다. Fig. 4은 혼화시 교반속도를 53.2 s^{-1} 로 조절하여 교반시간에 따른 플록의 크기를 나타낸 것이다. 교반속도를 53.2 s^{-1} 로 하면 교반속도를 44.2 s^{-1} 로 조절한 Fig. 3의 결과와 유사하게 교반시간이 1200 s 이상이 되면 플록의 크기로 170 μm 로 증가하는 경향을 나타내었다.

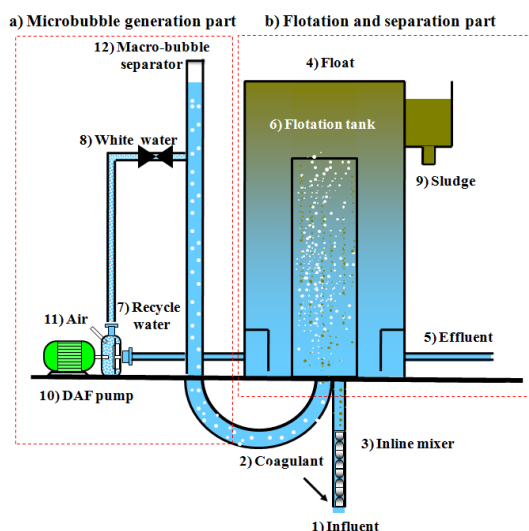


Fig. 1. Systematic diagram of a continuous DAF system.

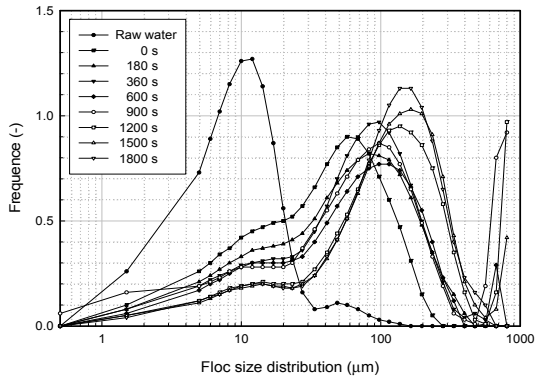


Fig. 2. Effect of mixing time at 23.1 s^{-1} of G value on floc size distribution.

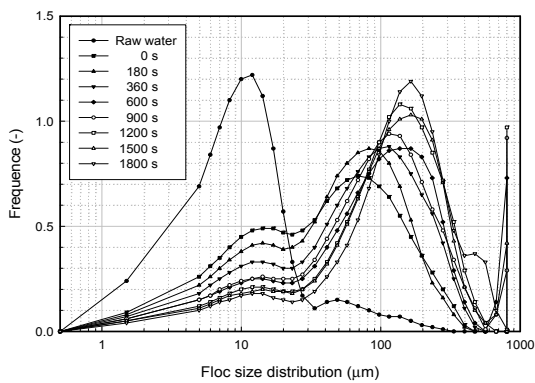


Fig. 3. Effect of mixing time at 44.2 s^{-1} of G value on floc size distribution.

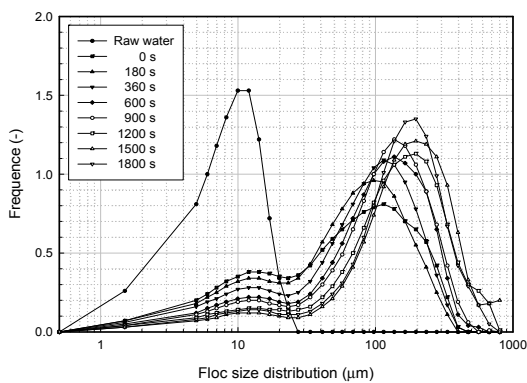


Fig. 4. Effect of mixing time at 53.2 s^{-1} of G value on floc size distribution.

Fig. 5는 응집시 교반속도와 시간에 따른 응집된 플록의 평균 입경을 나타낸 것이다. 급속교반을 하기 전 원수에 포함된 입자의 크기는 약 $10.0 \sim 20.0 \mu\text{m}$ 이었으며, 1000.0 s^{-1} 와 60 s로 혼화하게 되면 플록의 평균 입경은 $49.2 \sim 86.3 \mu\text{m}$ 으로 증가하는 경향을 보였다. 교반시간이 420 s에서 응집이 진행되면서 플록의 평균 입경이 $80.8 \sim 95.9 \mu\text{m}$ 로 점차 증가하기 시작하였다. 교반시간이 1000 s 이상이 되면 23.1, 44.2 및 53.2 s^{-1} 의 교반조건에 응집된 플록의 평균 입경이 $150 \mu\text{m}$ 이상으로 증가되었으며, 교반조건에 따른 플록이 성장한 후 다시 감소하는 경향을 보였다. 혼화/응집 후 침전되는 흐름의 정수시설은 응결공정의 G 값은 $10 \sim 60 \text{ s}^{-1}$ 와 체류시간은 1080 ~ 1500 s($Gt = 10800 \sim 90000$)으로 설계하며, 혼화/응집 후 직접여과되는 흐름의 정수시설 시설은 보다 작은 플록을 형성시키기 위하여 응집공정의 G 값은 $20 \sim 75 \text{ s}^{-1}$, 체류시간 900 ~ 1500 s($Gt = 18000 \sim 112500 \text{ s}^{-1}$)을 기준으로 설계어진다. 이 공정에서 형성된 플록의 입경은 $500 \sim 1000 \mu\text{m}$ 범위에서 형성되어 침전을 위한 고액분리에 효과적이라고 알려져 있다(환경부, 2004). Teixeira와 Rosa(2006)는 DAF와 침전공정을 이용하여 동일한 G 값(혼화 = 743 s^{-1} , 응집 : 24 s^{-1})과 교반시간(교반 = 120 s($Gt = 89610$), 응집 = 900 s($Gt = 21600$))에서 *Microcystis aeruginosa*의 제거효율을 비교하였고, 이

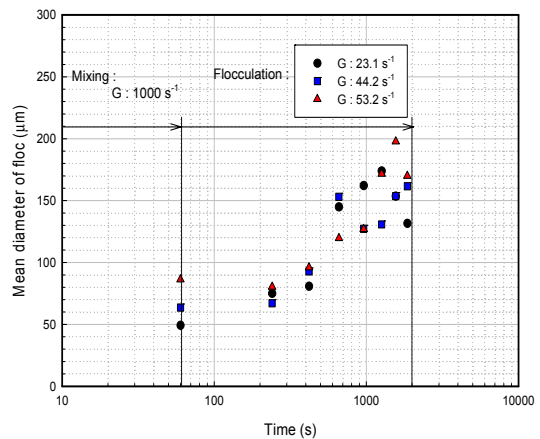


Fig. 5. Variation of mean diameter of floc by flocculation intensity.

결과에서 침전에 비해 DAF가 TOC와 클로로필-a의 제거효율이 우수하다고 보고하였다(Al-Sammaraee 등, 2009). 본 실험의 조건에서 DAF에 의한 상수원수의 부상분리의 혼화와 응집 조건은 23.1, 44.2 및 53.2 s^{-1} 의 교반조건에 따라 응집된 플록의 입경은 증가폭은 차이가 있었지만 응집시 교반시간이 1000 s 이상이 되면 플록의 평균 입경이 150 μm 이상으로 성장하였다.

Fig. 6는 Gt 값에 따른 응집된 플록의 평균 입경을 나타낸 것이다. 교반강도가 23.1, 44.2 및 53.2 s^{-1} 에서 Gt 값은 각각 5544 ~ 42966, 10608 ~ 82212 및 12768 ~ 98952이었으며, 로그 좌표상에서 Gt 값이 증가함에 따라 플록의 입경도 증가하는 경향을 보였다. 교반강도가 23.1 s^{-1} 에서 Gt 값이 29172 ~ 42432 이면 응집된 플록의 입경이 150 μm 로 성장하였지만, 44.2와 53.2 s^{-1} 에서는 Gt 값이 각각 55692 ~ 68952 와 51072 ~ 67032가 되어야 가능하였다. 이 결과를 이용하여 Gt 값(Gt)과 플록의 입경(D)의 관계를 최소자승법을 이용하여 $D = a \log(Gt) + \log b$ 의 관계로 선형화하였다. 교반강도가 23.1, 44.2 및 53.2 s^{-1} 에서 Gt 값(Gt)과 플록의 입경(D)의 상관관계를 나타내는 a와 log b는 각각 18.2, 18.1 및 23.7 그리고 -135.6, -121.3 및 -193.6이었다. 또한, 이 결과에서 Gt 값(Gt)과 플록의 입경(D)의 상관계수(r^2)는 0.7842, 0.6279 및 0.8741로서 높지 않았지만 Gt 값과 플록의 입경의 상관성을 확인할 수 있었다. 이 결과에서 M 정수장의

원수는 교반강도가 23.1 s^{-1} 에서 Gt 값이 29172 ~ 42432에서 응집된 플록의 입경이 150 μm 로 성장하는 이 조건이 DAF에 의한 부상분리에 효율이 좋은 것으로 판단되었다.

3.2. 압력 및 A/S 비에 따른 부상분리 효율

Fig. 7은 응집시 교반속도와 시간에 따른 응집된 플록의 DAF에 의한 부상분리효율(η)을 나타낸 것이다. 회분식 부상장치의 운전조건은 가압수의 압력과 반송비를 각각 5.0 kg/cm^2 와 20%로 고정하였다. 이 결과에서 23.1, 44.2 및 53.2 s^{-1} 의 교반속도에서 모두 600 s 이상이면 부상분리효율이 가장 높아지는 경향을 보였다. 응집시간이 600 s 이하인 조건에서 44.2와 53.2 s^{-1} 보다는 23.1 s^{-1} 의 교반속도에서 부상분리효율이 0.88 ~ 0.89로서 다른 조건에 비해 약 0.05 정도 높은 경향을 나타내었다. 이 결과는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 23.1 s^{-1} 의 교반속도의 조건에서 다른 교반속도에 비해 약 600 s 정도의 짧은 교반시간으로 응집된 플록의 입경을 150 μm 이상 성장시킬 수 있기 때문에 부상분리효율이 높게 나타난 것으로 판단되었다. 900 s 이상의 교반시간에서는 교반속도에 따라 약간 차이가 있지만 부상분리효율이 약 0.9에서 거의 일정한 경향을 나타내었다. 따라서 본 실험에 사용된 원수는 교반강도와 교반시간이 각각 23.1 s^{-1} 와 660 s(Gt 값 : 15246)에서 응집된 플록의 입경이 150 μm 로 성장하며, 최적의 부상분리효율을 나타내는 조건으로 판단되었다.

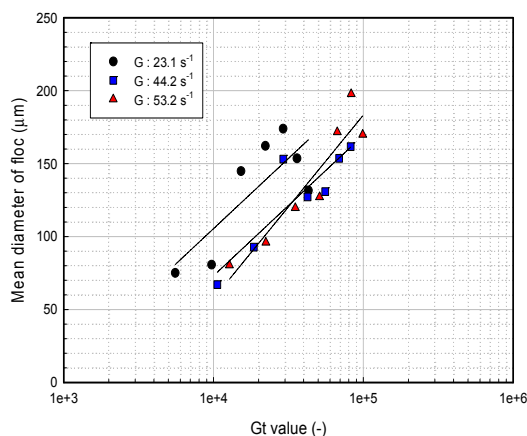


Fig. 6. Variation of mean diameter of floc by Gt value.

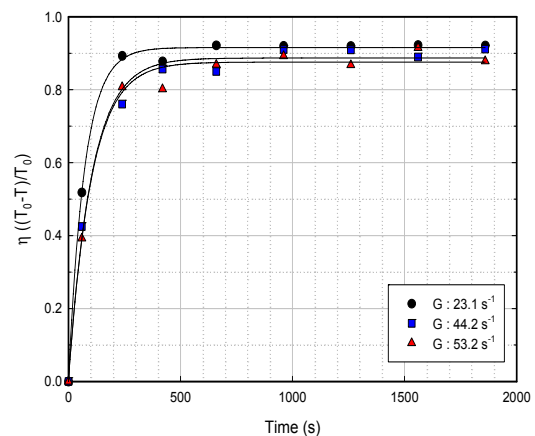


Fig. 7. Variation of flotation efficiency by G value.

Fig. 8은 A/S 비에 따른 응집된 플록의 DAF에 의한 부상분리효율(η_T)을 나타낸 것이다. DAF에 의한 부상분리는 약 147 NTU(SS : 198 mg/L)의 원수를 이용하여 운전압력을 4 ~ 6 $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ 로 조절하면서 실험하였다. 교반강도와 교반시간은 각각 23.1 s^{-1} 와 1200 s(Gt 값 : 27720)로 고정하여 응집된 플록의 입경이 $150 \mu\text{m}$ 로 성장하는 조건에서 수행하였다. 최적 반송율을 결정하기 위한 반송율과 A/S 비가 각각 10.0 ~ 30.0 %와 $0.0111 \sim 0.0667 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 인 조건에서 수행하였다. A/S 비가 $0.056 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이하인 $4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ 의 운전압력은 $5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ 이상의 운전압력에 비해 부상분리 효율이 약 10.0 % 정도 낮아지는 경향을 보였다. 또한, DAF의 고액분리효율은 원수 탁도 및 응집제 주입량, 혼화/응집 공정의 교반조건, pH, 수온 및 알카리도와 같은 응집조건에 따라 플록의 강도와 크기에 따라 달라지며, 반송율과 기포의 충돌효율, 기포크기와 같은 DAF의 부상조건에도 영향을 받는다고 보고된 바 있다(Eades와 Brignall, 1995; Edzwald, 1993). 이 결과로부터 혼화와 응집 후 부상분리하면, 형성된 플록과 미세기포 부착효율이 증가하여 A/S 비가 $0.056 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이상이 되면 부상분리효율이 0.9 이상 유지되었다. 따라서, 본 연구에서 M 정수장의 상수원수는 DAF에 의해 부상분리한다면 최적의 혼화와 응집 조건에서 운전압력과 A/S 비를 각각 $5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ 과 $0.056 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이상 유지되는 조건에서 약 0.9 이상의 부상분리효율을 얻을 수 있었다.

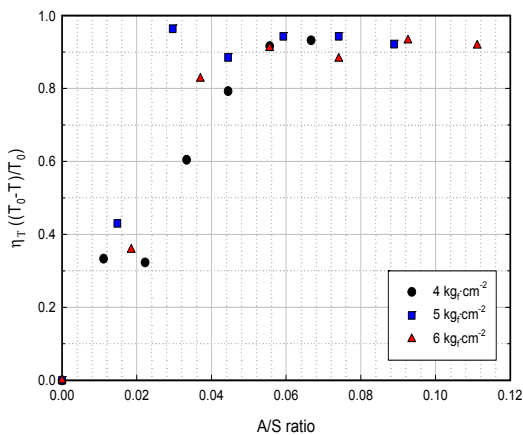


Fig. 8. Variation of flotation efficiency by pressurized conditions.

3.3. 연속운전에서 부상분리 효율

Fig. 9는 연속식 DAF 장치를 이용하여 20일 동안 연속 운전에 따른 처리수 탁도 및 부상분리 효율을 나타낸 것이다. 운전기간은 2009년 10월 20일부터 2009년 11월 10일까지였으며, 초기운전부터 8일까지는 강우에 의해 원수의 탁도가 147.6 ~ 158.6 NTU로 높아졌으며, 10일 이후 13.4 ~ 9.8 NTU로 낮아졌다. 이 장치는 이 등(2009)이 제시한 응집제 주입조건과 회분식 실험에서 도출된 교반조건($G = 23.1 \text{ s}^{-1}$ 와 $t = 900 \text{ s}$)과 압력조건($5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$)을 고려하여 정상상태에서 운전하였으며, 응집제 주입량은 원수의 탁도에 따라 조절하였다.

운전기간이 강우기간이 포함된 8일까지는 부상분리효율이 82.5 ~ 94.3 %으로서 10일 이후 64.6 ~ 72.2 %에 비해 약 20 %가 높게 유지되었다. 그러나 이 장치는 저탁도 원수(13.4 ~ 9.8 NTU)의 경우 유출수 탁도를 4 NTU이하로 운전하는 것이 가능하였지만, 고탁도 원수(147.6 ~ 158.6 NTU)의 경우 유출수 탁도를 10 NTU이하로 낮추기는 어려웠다. A/S 비가 $0.05 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이상이면 부상분리효율의 감소를 최소화할 수 있었으며, 스크 제거장치가 부착되지 않아 부상된 플록이 일정하게 배출할 수 없어 부상분리효율이 약간 감소되는 경향을 보였다.

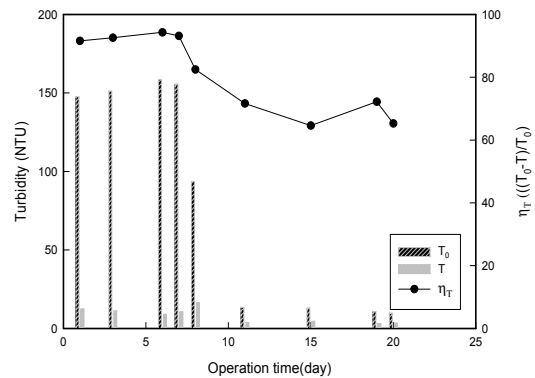


Fig. 9. Operation efficiencies with the continuous DAF system for 20 days.

4. 결론

본 연구는 회분식과 연속식 DAF 장치를 이용하여 M 정수장 원수의 혼화/응집시 교반강도 및 시간에 따른 부상분리효율을 비교하였다. 회분식 실험에서 도출된 최적의 교반조건을 이용하여 연속식 DAF 장치를 20 일동안 연속운전하여 부상분리효율을 평가하였다.

교반조건(Gt 값)에 따른 응집된 플록의 평균 입경의 비교한 결과에서 M 정수장으로 유입되는 원수는 교반강도가 23.1 s^{-1} 와 660 s (Gt 값: 15246)일 때 응집된 플록의 입경이 $150 \mu\text{m}$ 로 성장하여 부상분리에 효율적이었다. 또한, 운전압력과 A/S 비가 각각 $5 \text{ kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$ 과 $0.056 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이상 유지되는 조건에서 부상분리효율이 약 0.9 이상이었다.

연속식 DAF 장치를 이용하여 20일 동안 연속 운전 에 따른 처리수 탁도 및 부상분리 효율을 비교하였다. 저탁도 원수(13.4 ~ 9.8 NTU)의 경우 유출수 탁도를 4 NTU 이하로 운전하는 것이 가능하였지만, 고탁도 원수(147.6 ~ 158.6 NTU)의 경우 유출수 탁도를 10 NTU 이하로 낮추기는 어려웠다. A/S 비가 $0.05 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이상이면 부상분리효율의 감소를 최소화할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 부산가톨릭대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강태희, 오병수, 이훈, 변규식, 권순범, 손병용, 안효원, 강준원, 2005, Ozoflotation 공정의 정수처리 적용에 관한 연구, 한국물환경학회지, 21(1), 528-534.
 성낙창, 박현석, 이성식, 이용희, 이종팔, 윤태경, 2004, 정수처리공정상 염소소독부산물형성에 미치는 오존의 영향, 한국환경과학회지, 13(1), 55-59.
 이창한, 안대명, 김성수, 조석호, 안갑환, 2009, DAF 펌프를 이용한 실규모 용존공기부상 공정의 전처리 조건, 대한환경과학회지, 31(1), 58-63.

조항문, 2005, 상수원에 조류 이상 증식시 대응방안, 서울시정개발연구원 연구보고서, 1-120.
 환경부, 2004, 국산 DAF pump를 이용한 패키지형 소규모 정수장치 개발, 최종보고서, (주)신신기계, 190-202.
 Al-Sammaraee, M., Chan, A., Salim, S. M., Mahabaleswar, U. S., 2009, Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I: Particle settling performance, Chem. Eng. J., 152(2-3), 307-314.
 Arnold, S. R., Grubb, T. P., Harvey, P. J., 1995, Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design, Wat. Sci. Technol., 31(3-4), 327-340.
 Eades, A., Brignall, W. J., 1995, Counter-current dissolved air flotation/filtration, Wat. Sci. Technol., 31(3-4), 173-178.
 Edzwald, J. K., 1993, Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation, Wat. Sci. Technol., 27(10), 67-81.
 Markham, L., Porter, M., Schofield, T., 1997, Algae and zooplankton removal by dissolved air flotation at severn trent Ltd. Surface Water Treatment Works. In Schofield, Proceedings of CIWEM Dissolved Air Flotation International Conference, The Lavenham Press, London, 112-119.
 Plummer, J. D., Edzwald, J. K., Kelley, M. B., 1995, Removing *Cryptosporidium* by dissolved-air flotation, J. of AWWA, 87(9), 85-95.
 Rebhum, M., Lurie, M., 1993, Control of organic matter by coagulation and floc separation, Wat. Sci. Technol., 27(11), 11-20.
 Rubio, J., Souza, M. L., Smith, R. W., 2002, Overview of flotation as a wastewater treatment technique, Miner. Eng., 15(3), 139-155.
 Teixeira, M. R., Rosa M. J., 2006, Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa* Part 1: The key operating conditions, Sep. and Purif. Technol., 52(1), 84-94.
 Zabel, T., 1985, The Advantages of dissolved-air flotation for water treatment, J. of AWWA, 77(5), 42-45.