

DAF 공정에서 부상속도 향상을 위한 플럭형성 조건 평가

Evaluation of Floc Formation Conditions for Increasing Flotation Velocity in DAF Process

권순범* · 민진희 · 박노석 · 안효원

Kwon, Soon-Buhm* · Min, Jin-Hee · Park, No-Suk · Ahn, Hyo-Won

한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

(2006년 1월 9일 논문 접수; 2006년 3월 24일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Dissolved air flotation is a solid-liquid separation system that uses fine bubbles rising from bottom to remove particles in water. In order to enhance the flotation velocity and removal efficiency of flocs in the flotation process, we tried to obtain pretreatment conditions for the optimum DAF process operation by comparing and evaluating features of actual floc formation and flotation velocity etc. according to coagulant types and conditions for flocculation mixing intensity by using PIA, PDA, and FSA. Accordingly, generating big flocs that have low density at low flocculation mixing intensity may reduce treatment efficiency. In addition, generating small flocs at high flocculation mixing intensity makes floc-bubbles smaller, which reduces flotation velocity. In this study, it was found that high flocculation mixing intensity could not remove the remaining micro-particles after flocculation, which had negative effects on treated water quality. Therefore, in order to enhance treatment efficiency in a flotation process, flocculation mixing intensity around 50 sec^{-1} is effective.

Key words: dissolved air flotation(DAF), floc-bubble agglomerate, flocculation, mixing intensity, rising velocity

주제어: 용존공기부상법, 플럭-기포 결합체, 응집, 응집강도, 부상속도

1. 서 론

DAF(Dissolved Air Flotation: DAF) 공정에서 미세 기포와 플럭과의 부착과 부상효율에 영향을 주는 인자로서 미세기포 및 플럭형성이 중요하게 작용하고 있다(Edzwald, 1995). 특히 플럭의 밀도 및 크기 등의 물리적인 특성은 여러 연구자들에 의해 많은 연구

가 진행되어 왔다(Tambo, 1979, 1995, Gregory, 1997). 그러나 이는 주로 침전을 목적으로 하는 경우의 연구가 대부분이었다. Edzwald(1995)가 DAF에서 최대 효율을 위해 플럭형성지에서 플럭은 핀 플럭크기($10 \sim 30 \mu\text{m}$)가 적절하므로 장시간 플럭형성이 불필요하다고 주장한 반면, Fukushi(1998)는 $10 \sim 1,000 \mu\text{m}$ 의 거대플럭이 효율적이라는 상반된 견해를 주장하였다. 또한 Han(2001, 1999)은 비슷한 크기의

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0380, FAX: +82-42-960-0399, E-mail: chester@kowaco.or.kr (Kwon, S.B.)

Table 1. Flotation velocity of bubble-floc agglomerate by model equation, $v_{pb}(10^\circ\text{C})$

Particle diameter $d_d(\mu\text{m})$	Number bubbles ($d_b = 40\mu\text{m}$) with attachment	Bubble-particle volume ratio $\beta(\text{m}^3/\text{m}^3)$	Bubble-particle density $\rho_{pb}(\text{kg}/\text{m}^3)$	Bubble-particle rise velocity, (calculation) $v_{pb}(\text{m}/\text{hr})$
200	1	0.01	995	0.33
	5	0.04	964	2.35
	10	0.08	929	4.74
	50	0.4	717	19.91
	100	0.8	558	33.32

입자와 기포간의 충돌효율이 높고, 입자가 안정한 상태보다 불안정한 상태에서 높은 충돌효율계수를 가지며, 작은 크기의 미세기포는 작은 크기의 입자와 큰 크기의 미세기포는 큰 입자와의 충돌에서 충돌효율계수가 높을 때 처리효율이 증가한다는 모델을 발표한 바 있다. 또한 Ree (1979) 등은 DAF 처리를 위한 응집강도의 경우 70sec^{-1} 을 Valade(1996) 등은 $30\sim 70\text{sec}^{-1}$ 을 주장하였으나 부상속도와와의 연관성에 대한 평가는 하지 않았다. Schers와 Dijk(1992)은 플러-기포 결합체의 부상속도 모델식을 제시하였으며, 플러과 기포 결합체의 부상속도 모델식은 Reynolds No. 1 이하일 때 다음의 Stokes equation을 적용하여 기포/플러의 체적비(=기포체적/플러체적)를 통해 계산된 결합체의 부상속도(v_{pb}) 모델식을 적용하였다.

$$v_{pb} = \frac{g(\rho_w - \rho_{pb})d_{pb}^2}{18\mu} \quad (\text{Eq. 1})$$

where, ρ_w : density of water

ρ_{pb} : density of floc-bubble agglomerate

d_{pb} : diameter of floc-bubble agglomerate

μ : absolute viscosity

여기서 v_{pb} 는 플러-기포 결합체 부상속도(m/hr)이며, 플러에 부착한 기포의 개수를 보완하여 밀도를 구한 식은 다음과 같다.

$$\rho_{pb} = \left[\frac{\rho_p d_p^3 + N_{ab} \cdot \rho_p d_b^3}{d_p^3 + N_{ab} \cdot d_b^3} \right]^{1/3} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 v_{pb} 는 플러-기포 결합체 밀도(kg/m^3)이고, N_{ab} 는 입자에 부착한 기포의 개수이다. 이때 플러-기

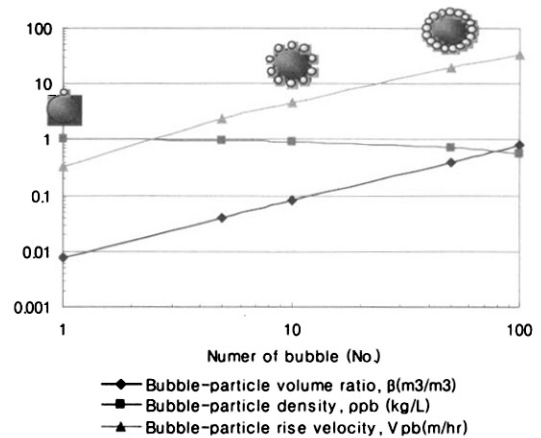


Fig. 1. Flotation velocity of floc-bubble agglomerate.

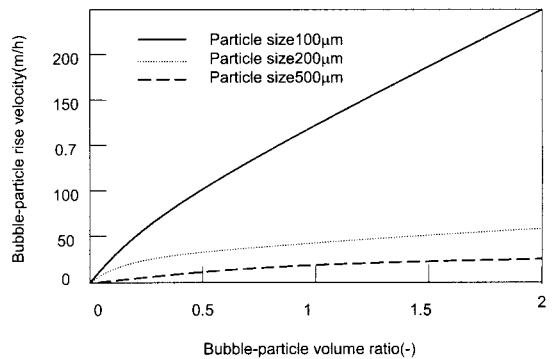


Fig. 2. Effect of floc-bubble ratio(β) and the size of a floc.

포 결합체의 크기는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$d_{pb} = [d_p^3 + N_{ab} \cdot d_b^3]^{1/3} \quad (\text{Eq. 3})$$

부상속도에 관한 이론식(Schers, 1992)을 통해 얻은 입자와 기포 결합체의 부상속도는 **Table 1, Fig. 1,**

2 등에 나타내었으며, 부상속도식의 예를 들면 다음과 같다. 모델식에서는 수온 10°C에서 플럭 직경 200 μm 하나에 직경 40 μm 인 기포가 10개 결합했을 때 부상속도는 4.74m/hr로 나타났다. 이는 플럭에 기포가 많이 붙을수록 결합체의 밀도는 낮아져 부상속도는 증가하며, 플럭-기포비(β)가 증가할수록 부상속도가 증가하기 때문이다. 이러한 부상속도와 플럭의 물리적 특성과의 상관성 평가 연구는 일부의 학자들에 의해 제시되어 왔다(Ljunggren, 2003). 그러나 주로 부상속도를 Stokes equation에 근거하여 플럭의 특성을 가정을 통해 제시한 것으로, 실제 측정을 통한 분석은 제시되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 이론식을 바탕으로 부상공정에서 부상속도 및 플럭의 제거효율 향상을 위해 응집공정에서 응집제의 종류, 응집 G값 조건에 따른 실제 플럭 형성의 특성 및 부상속도 등을 비교 평가하여 최적의 DAF 공정 운영을 위한 전처리 조건을 도출하고자 하였다. 이러한 분석을 위해, 현미경을 사용하여 실시간 플럭이 성장하는 과정과 미세기포 및 입자의 거동을 화상장치로 촬영하여 Image를 분석하는 입자화상장치(Particle Image Analyzer; PIA)와 850nm의 광선을 이용하여 생성되는 플럭의 성장속도를 간접적으로 분석하는 연속 응집 플럭 측정기(Photometric Dispersion Analyzer; PDA) 그리고, 레이저광을 이용하여 빛의 산란도를 측정하여 원수 또는 최종 처리수에 포함된 입자분포 또는 개수를 측정하는 플럭입자계수기(Floc Size Analyzer; FSA)를 이용하였다. 이러한 기기를 이용하여 기포 및 플럭의 크기를 측정하고, 침강속도를 이용하여 플럭의 밀도를 간접 측정하여 부상을 위한 플럭의 형성조건을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 원수는 H 댐에서 취수하는 S 정수장의 원수를 사용하였으며, 원수의 특성은 Table 2와

같이 H 댐의 년 간 대부분을 차지하는 저탁도의 원수를 사용하였다. 실험에 사용된 응집제는 PAHCs (17% as Al_2O_3 , Poly Aluminum Hydroxy Chloro Sulfate, Samgu Chemical Co., Korea), PAC(11% as Al_2O_3 , Poly Aluminum Chloride, Hanbit Chemical Co., Korea), LAS(8% as Al_2O_3 , Liquid Aluminum Sulfate, Hanbit Chemical Co., Korea)이며, 플럭형성을 위한 실험장치는 Fig. 1과 같이 Lab-Scale의 DAF Batch Tester(Model; DBT 6, EC Engineering, Canada)를 사용하였다. Jar tester 이용한 약품 혼화의 조건은 G값 1,100 sec^{-1} 로 5초 이내로 급속교반을 실시하였으며, 응집강도에 따른 플럭의 크기 및 밀도의 분석을 위해 응집강도는 110, 90, 70, 50, 30 sec^{-1} 의 다양한 조건별 각각 동일한 G값으로 10 분간 응집하였다. 이는 단계적으로 응집강도를 약하게 하는 일반정수처리공정에서의 혼란변수를 최소화하기 위해 동일한 G값을 사용하여 평가하였다. DAF Batch Tester의 부상 조건은 Saturator의 압력 5기압, 가압수비 15%를 적용하였으며, 부상 3분 후 중층의 샘플링 포트에서 처리수 탁도를 측정하였다.

기포 및 플럭의 크기와 침전 및 부상속도 측정은 입자화상장치(Particle Image Analyzer; PIA)를 사용하였다(Fig. 3). PIA는 플럭의 성장거동을 실시간으로 판단하여 입자의 성장거동을 판단할 수 있는 장비로서, 현미경을 사용하여 물속에 존재하는 미세입자를 연속적으로 촬영하여 이미지 분석이 가능하다. 기기는 Fig. 3과 같이 Microscope(SZ61TRC, Olympus, Japan), High Speed CCD Camera, Image Analyzer(Image-Pro Plus ver. 4.0)등으로 구성하였다. PIA는 플럭 및 기포의 파괴를 최소화하기 위해 Jar tester의 상부에 Flow cell을 수직으로 배치하여, Flow cell 내에 수중입자를 정지시킨 후 현미경 및 고속카메라를 통해 정지영상 및 동영상 촬영이 가능하다. 촬영된 영상은 Image Analyzer로 Tracking 기법을 이용한 속도 벡터와 입자의 크기를 분석할 수 있다.

또한 플럭의 크기의 간접평가 및 성장속도의 분석

Table 2. Characteristics of raw water of S water treatment plant

Turbidity(NTU)	Alkalinity(mg/ as CaCO_3)	Temp.(°C)	pH
1.4 0.3	27.5	20.2	7.17

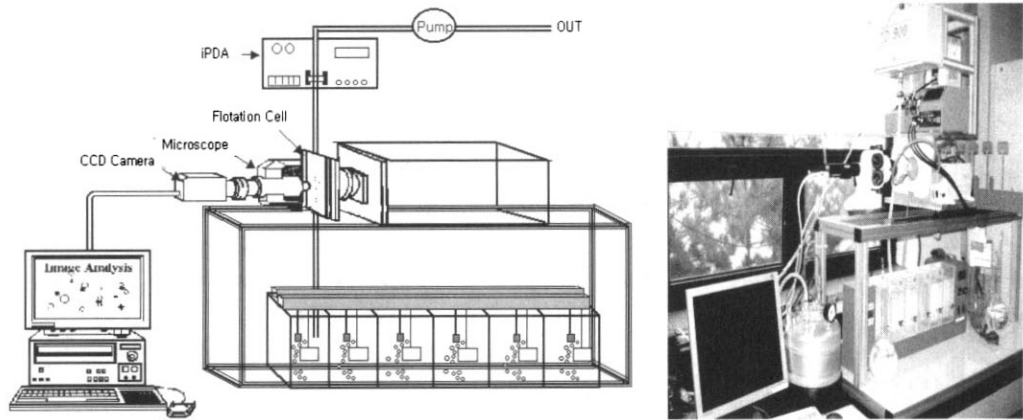


Fig. 3. Particle Image Analyzer (PIA).

은 PDA(Photometric Dispersion Analyzer, PDA 2000, Rank Brothers Ltd, UK)를 사용하였다. 본 장비에 의해 측정되는 값으로는 DC(Steady Component), RMS (Root Mean Square), Ratio 등이며, Ratio는 RMS/DC 값으로 Flocculation Index(FI)라고도 한다. FI값은 입자의 성장을 나타내는 간접적인 지표로 입자가 작을수록 작아지며, 응결하여 입자의 크기가 커지면 증가하게 된다(Gregory, 2003). 측정값들은 PDA 장치에서 디지털 신호형태로 전환되고, 연속적인 분석을 위하여 컴퓨터에 저장되도록 되어있다. 본 연구에서는 PDA와 더불어 플럭의 크기분포를 확인할 수 있는 Floc Size Analyzer(PAMAS-3116 Counter, Duke Scientific Corp., Germany)를 동시에 측정하여 플럭의 형성특성을 평가하였다.

3. 실험결과

3.1. 기포의 크기와 부상속도 분석

DAF에서 기포의 크기는 노즐 전-후의 압력 차와

노즐의 형상 등에 가장 큰 영향을 받으며(AWWA, 1999), 일반적으로 기포의 크기는 4~6 기압 하에서 약 10~100 μm (평균 40 μm)의 크기를 가지는 것으로 알려져 있다(Edzwald, 1995). 기포의 크기는 가해지는 압력에 가장 큰 영향을 받으며, 가해지는 압력이 클수록 기포의 크기는 작아진다. 그러나 De Rijk (1994) 등은 특정압력 이상에서는 더 이상 기포의 크기가 작아지지 않는 한계압력이 있으며, 5기압의 값을 제시하고 있다.

DAF 공정에서 기포의 크기는 부상속도에 중요한 영향인자이다(AWWA, 1999). 따라서, 기포의 크기가 부상속도에 미치는 영향을 알아보기 위해 PIA 방법을 이용하여 실측을 하였으며, 기포를 생성시킨 압력 조건은 4기압에서부터 5기압까지 0.5기압씩 증가시켜 3가지 압력조건 하에서 크기를 측정하고, 생성된 각각의 기포를 Tracking하여 기포의 부상속도를 측정하였다(Fig. 4). 분석결과 Fig. 5와 같이 기포의 크기에 따른 기포의 부상속도가 DAF에서 발생하는 기포크기의 한계를 고려해 볼 때 문헌(AWWA,

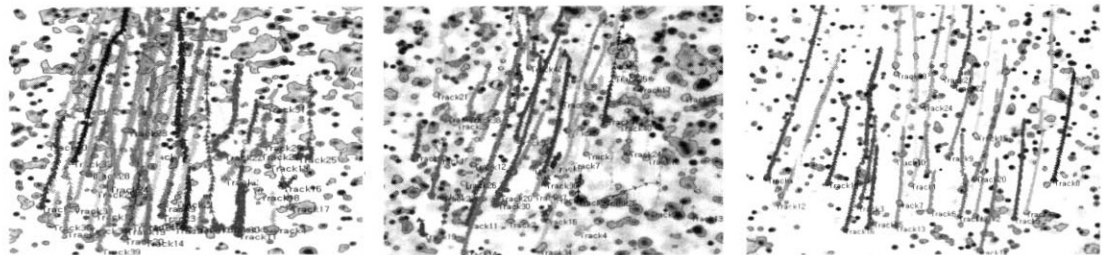


Fig. 4. Analysis of bubble rising velocity using PIA (tracking method).

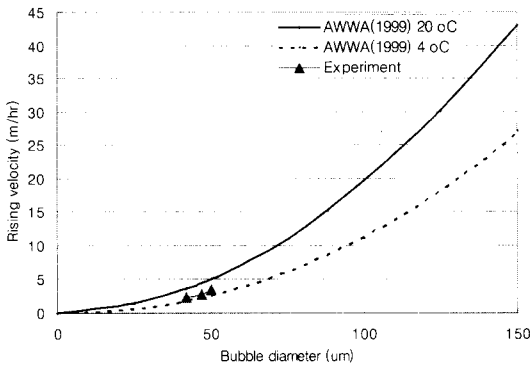


Fig. 5. Comparison of rising velocity as a function of bubble diameter.

1999)에서 제시한 일부 기포크기 범위에서 유사하게 도출되었으며, 이를 근거로 플럭-기포의 부상속도 향상을 위한 실험을 실시하였다.

3.2. DAF 공정에서의 처리효율 향상을 위한 적절한 Zeta Potential

DAF system의 효율적 운영에 영향을 주는 인자 중 DAF 처리를 위한 응집에서는 물리적인 응집과 더불어 화학적 응집에 작용하는 영향인자인 pH와 알칼리도, 응집제 종류가 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Edzwald, 1995; 독고석, 2002). 독고석 등(2002)에 의하면 DAF 처리효율을 결정짓는 가장 중요한 요인은 입자와 미세기포의 제타전위를 나타내는 정전기적 특성(미세기포의 Zeta Potential은 음의 값)

이며, 입자의 크기도 중요한 작용을 한다고 제시하였다. 또한 DAF에서 전처리의 목표는 최대의 처리효율을 위한 플럭 크기를 만들어 내는 교반시간과 최대의 충돌효율을 나타내는 제타전위를 가진 입자 및 미세기포의 조합을 만드는 것이다. 따라서 본 연구에서는 응집제 종류 및 량에 따른 혼화 후 Zeta Potential을 측정하고 처리효율과의 관련성을 분석하였다. 실험에 사용된 원수와 사용된 응집제 및 측정기기는 다음 Table 3과 같다.

실험은 실제 S 정수장에서 사용되는 원수에 3종 응집제(PAC, PAHCs, LAS)를 주입하여 부상공정에서 응집제 주입량에 따른 제타전위 변화와 처리수의 탁도를 비교하였으며 결과를 Fig. 6-8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 실험에 사용된 응집제의 종류에 관계없이 DAF 처리를 위한 혼화 직후의 Zeta Potential 값은 +2~+4mV에서 가장 높은 처리효율을 나타내었다. 따라서 실제 DAF 처리를 위한 정전기적인 특성인 Zeta Potential 값은 +2~+4mV이 되도록 응집제량을 적용하는 것이 처리효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 DAF 공정에서 부상속도 향상을 위한 응집조건 분석

부상속도 효율 실험을 위한 응집제 종류의 선정 및 응집제 주입량 평가를 위한 Jar test 결과는 Fig. 9와 같다. 응집제는 LAS, PAC 및 PAHCs를 사용하였다. 실험결과 PAHCs가 처리수 탁도 0.170NTU로 가장

Table 3. Raw water characteristics, Coagulants and Instruments

Items		Parameters	
Raw water characteristics		- Turbidity: 1~5 NTU - pH: 6~7	- Alkalinity: 25~30mg/L - Zeta. P: -13~-19mV
Coagulants	PAC	- Specific gravity: 1.21 - pH: 4.3 - SO ₄ ²⁻ : 0.2	- Basicity: 49.8 % - Al ₂ O ₃ : 10.8
	LAS	- PH: 3.8	- Al ₂ O ₃ : 8.1%
	PAHCs	- Specific gravity: 12.1 - Basicity: 71.6wt% - pH: 3.9 - SO ₄ ²⁻ : 1.7wt %	- Al ₂ O ₃ : 12.1 wt %
Instruments	Turbidity	- 2100P Turbidimeter, Hach	
	Zeta Potential	- Zeta Phoremeter(24000, CAD Instrument Co, France)	
	Particle Count	- Water Grab Sampler(Model WGS-267, Metone co., USA)	

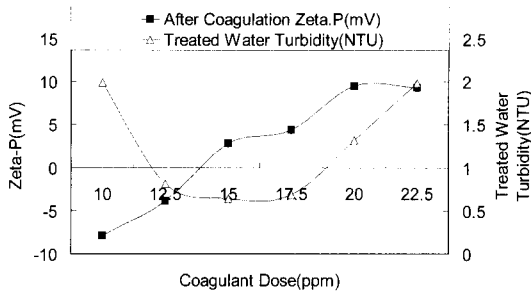


Fig. 6. Zeta potential and turbidity as a function of coagulant dosage (PAC).

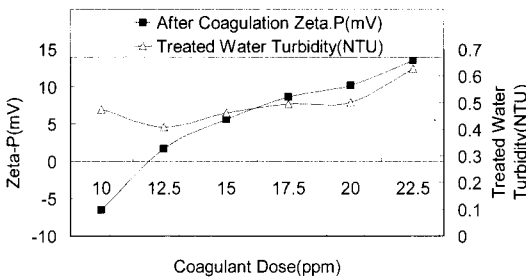


Fig. 7. Zeta potential and turbidity as a function of coagulant dosage (PAHCs).

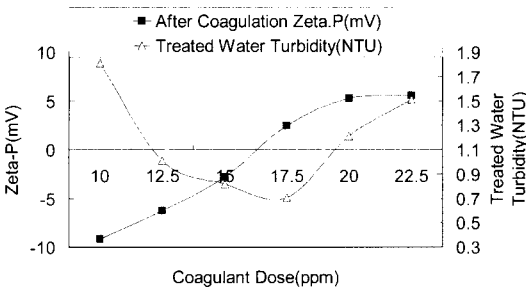


Fig. 8. Zeta potential and turbidity as a function of coagulant dosage (LAS).

높은 처리효율을 보였으며, 이때의 응집제 주입량은 경제성을 고려하여 15ppm 이었다. 따라서 PAHCs 15ppm을 부상속도 분석을 위한 실험조건으로 선정하였으며, 시험에 사용될 응집시간 결정을 위해 PDA를 이용하여 시간에 따른 플럭의 성장정도를 나타내는 Floc. Index를 분석하였다(Fig. 10). 실험에 사용된 응집 G값은 70sec^{-1} 을 사용하였으며, 실험결과 10분(600sec)에서 안정적인 플럭의 성장이 이루어졌다. 이러한 PDA의 실험결과를 검증하기 위해 응집제 중

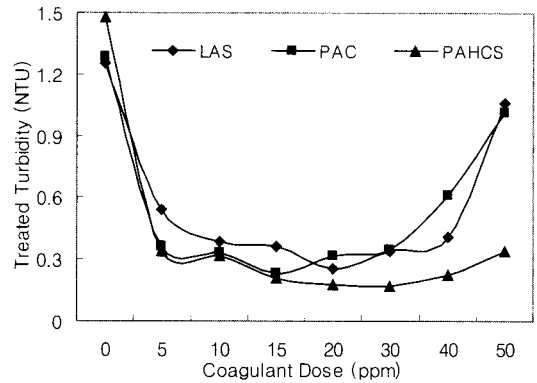


Fig. 9. Treatment turbidity according to injection dosage of coagulants.

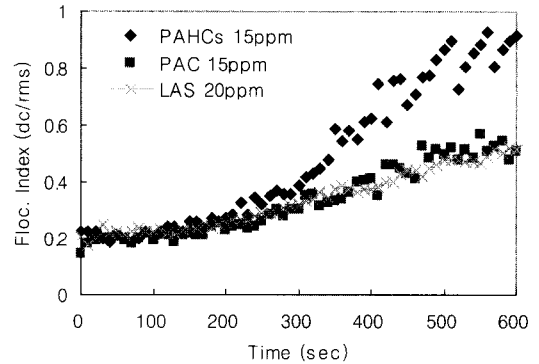


Fig. 10. FI behavior according to coagulants.

류별로 PIA를 이용하여 응집시간대별(2분, 4분, 6분, 8분, 10분) 영상을 capture하여 플럭의 성장거동을 이미지로 분석한 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 이미지 분석결과 응집시간이 증가함에 따라 플럭의 성장거동이, PDA를 분석한 결과와 유사하게 PAHCs가 상대적으로 플럭 성장속도가 빠르게 나타났으며, 10분(600sec) 이상에서는 플럭의 성장크기가 일정함을 알 수 있었다. 따라서 부상속도에 영향을 미치는 플럭의 물리적인 특성(밀도 및 크기)을 분석하기 위해, 응집시간을 일정하게 고정하고 응집 G값 변화($110, 90, 70, 50, 30\text{sec}^{-1}$)에 따라 평가를 실시하였다.

상기의 결과를 바탕으로, 부상공정에서 응집강도에 따른 처리수 탁도를 비교한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서와 같이 플럭의 물리적인 특성에 영향을 미치는 응집 G값이 부상공정의 처리수의 수질에 영향을 미치고 있음을 파악할 수 있다. 처리효율

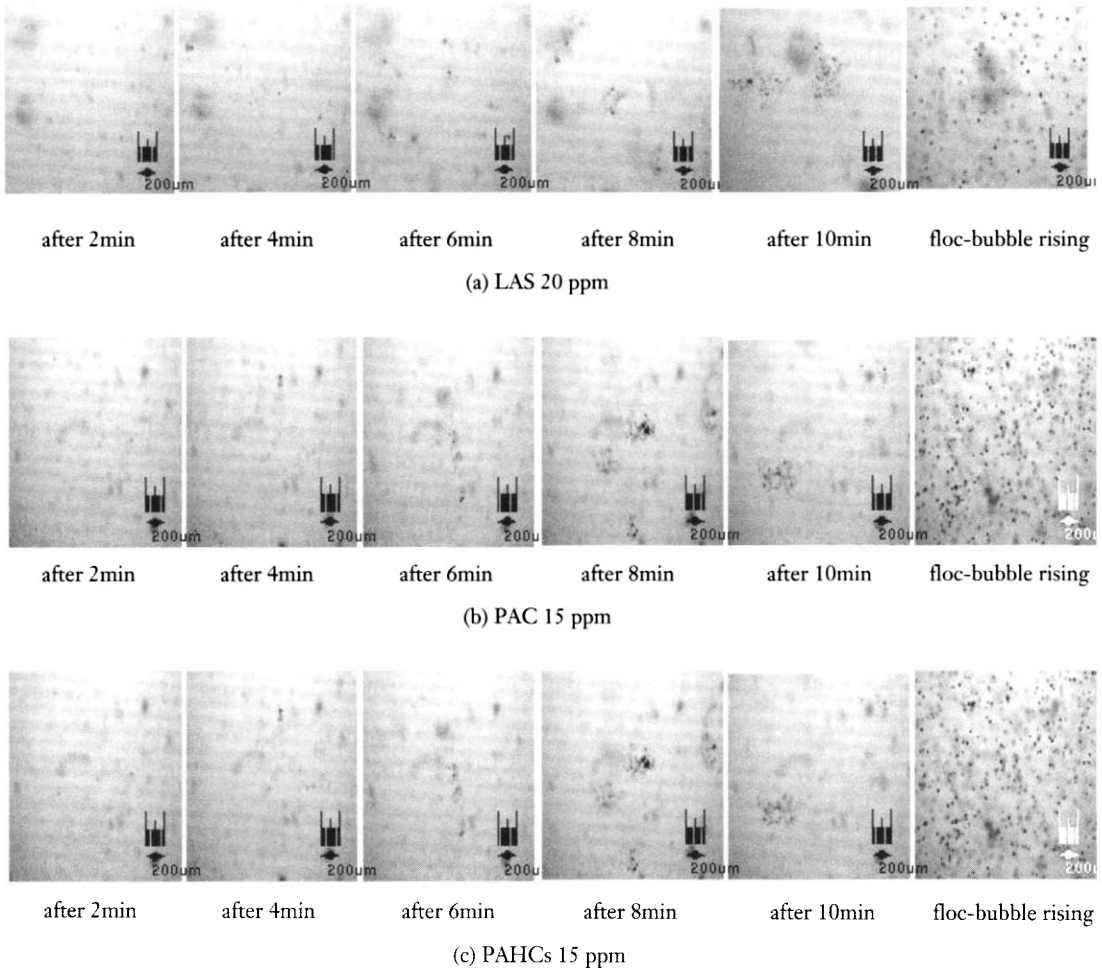


Fig. 11. Growth of actual flocs per flocculation time of various coagulant.

이 가장 좋은 G값 50sec^{-1} 의 경우 처리수 탁도가 0.21 NTU로 나타난 반면, 처리효율이 낮은 G값 110sec^{-1} 의 경우는 0.4NTU로 원수탁도를 감안하여도 처리효율은 14% 차이를 나타내었다. 따라서, 응집 플럭을 생성시키기 위한 응집강도가 부상효율에 직접적인 영향을 나타냄을 알 수 있으며, 이에 대한 최적화가 정수장 수질향상에 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다.

G값 변화에 의한 플럭의 성장의 특성을 평가하기 위해, PDA를 이용하여 G값에 따른 Floc. Index를 비교하였다(Fig. 13). 실험결과 G값에 따른 성장 특성을 살펴보면 G값이 큰 110sec^{-1} 에서 가장 느리게 성장한 반면, G값이 낮은 30sec^{-1} 에서는 초기에 성장 시

작시점은 늦으나 일정시간 이후 빠른 성장을 나타냄을 알 수 있었다. 처리효율이 가장 높게 나타난 G값 50sec^{-1} 의 경우는 플럭의 크기 및 성장속도가 일정한 범위내에 있음을 알 수 있었다. 이러한 플럭의 크기 및 밀도 값을 파악하기 위한 침강속도는 PIA를 이용하여 분석을 하였다.

PIA를 이용한 플럭의 크기는 응집 후 Fig. 14와 같이 이미지를 통해 직접 측정하였고, 침강속도는 플럭의 영상을 Tracking기법을 이용하여 분석하였다. 플럭의 밀도는 침강속도를 나타내는 Stokes equation을 이용하여 측정된 침강속도 및 플럭의 크기를 식에 대입하여 계산하였다. 플럭의 밀도 계산결과는 Table 4에 나타내었으며, 분석결과 응집강도 30sec^{-1} 에서 플

력의 크기는 가장 크게 형성되었으나 가장 낮은 침강 속도 0.72m/hr를 나타내었으며, 이를 근거로 계산한 플럭의 밀도는 1000.2kg/m³으로 다른 응집강도에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 반면, G값 50 sec⁻¹ 이상에서는 플럭의 밀도가 1000.8~1001.1kg/m³으로 유사한 밀도를 나타내고 있었음에 반해 침강속도는 응집강도 50sec⁻¹에서 가장 빠른 1.09m/hr를 나타냈다. 따라서 응집강도 50sec⁻¹ 이상에서 플럭의 크기가

침강속도에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험결과를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에서와 같이 낮은 응집 G값에서는 밀도가 플럭의 침강에 상대적으로 크게 영향을 미친 반면, 응집 G값 50sec⁻¹ 이상에서는 플럭의 밀도의 한계로 인해, 플럭의 크기가 침강속도에 영향을 주는 중요한 인자로 판단된다. 이러한 플럭의 물리적 특성이 부상공정에 미치는 영향을 파악하고자 응집 G값을 임의로 조절하여 생성된 플럭의 크기와 침강속도를 통해 도출된 플럭의 밀도에 따른 부상속도를 평가하였다.

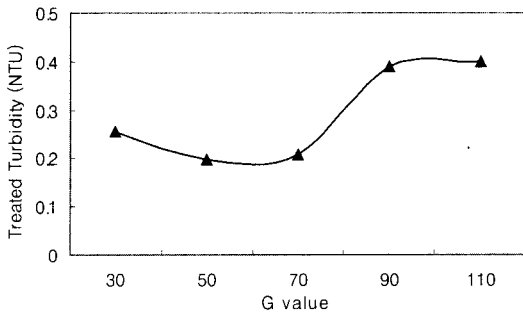


Fig. 12. Turbidity of flotation treated water according to flocculation mixing intensity.

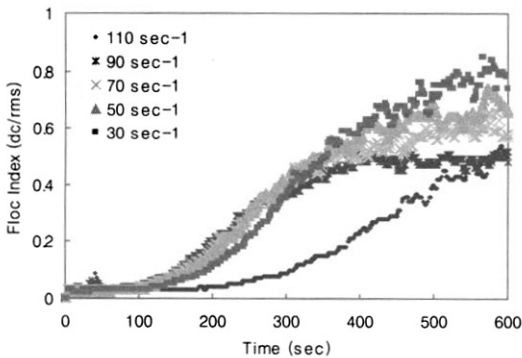


Fig. 13. FI behavior according to flocculation time and mixing intensity.

상기의 결과를 바탕으로 응집강도에 따른 플럭-기포 결합체의 계산 및 실측 부상속도의 비교는 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 사용된 계산은 Schers와 Dijk(1992)이 제안한 식을 사용하였으며, PIA에 의해 측정된 플럭, 미세기포의 직경(평균 40 μ m)을 계산식에 적용하여 이론적 부상속도를 도출하였으며, PIA를 이용하여 플럭을 추적하여 실측된 부상속도와 비교하였다.

비교 결과, PIA에 의해 측정된 부상속도와 계산된 부상속도는 Fig. 16과 같이 매우 유사한 결과를 보이고 있었다. 그림에서 응집강도 50sec⁻¹일 때 6.7m/hr로서 부상속도가 가장 빠르게 나타났으며, 이 때의 처리효율은 Fig. 12와 같이 응집강도 50sec⁻¹일 경우 가장 높게 나타났다. 따라서 부상속도의 증가와 처리효율은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 상기에서 언급한 바와 같이 침강속도의 경우 낮은 응집 G값에서는 밀도가 플럭의 침강에 상대적으로 크게 영향을 미쳤다. 반면, 부상속도의 경우 이론적으로는 응집강도가 낮은 범위에서 플럭의 크기가 크고 밀도가 낮아 부상속도가 상대적 클 것으로 예상되나, 실험결과 낮은 부상속도 및 처리효율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 플럭의 밀도가 낮아 상대적으로 생성된 플럭의

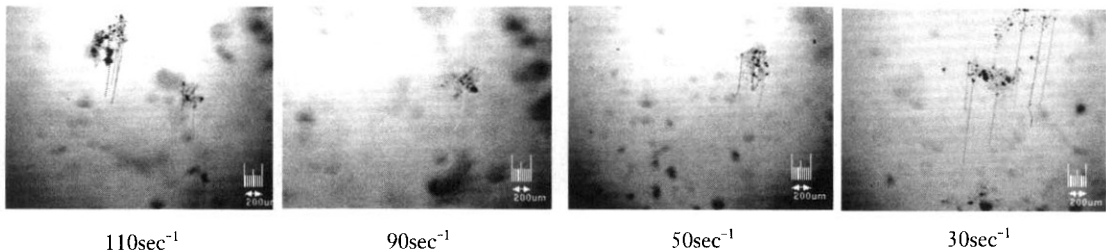


Fig. 14. Sedimentation velocity tracking of flocs by flocculation mixing intensity.

Table 4. Physical features of flocs by actual measurement and calculation according to flocculation mixing intensity

G	Particle diameter $d_p(\mu m)$	particle settling velocity, (measurement) $v_s(m/hr)$	particle density (calculation) $\rho_s(kg/m^3)$
30 sec ⁻¹	950	0.72	1000.2
50 sec ⁻¹	647	1.09	1001.1
90 sec ⁻¹	593	0.68	1000.8
110 sec ⁻¹	478	0.55	1001.0

$g = 9.81m/sec^2$, $w = 999.8kg/m^3$, $\mu = 1.01 \cdot 10^{-3}kg/m^3$, at 20°C

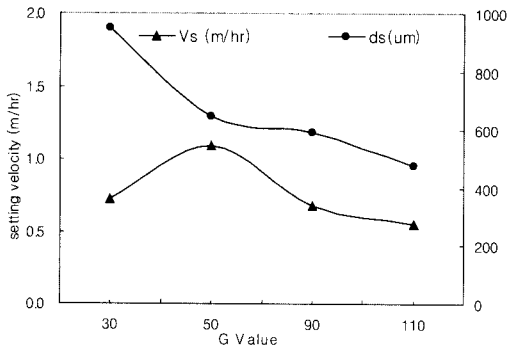


Fig. 15. Correlation between floc size and sedimentation velocity according to flocculation mixing intensity.

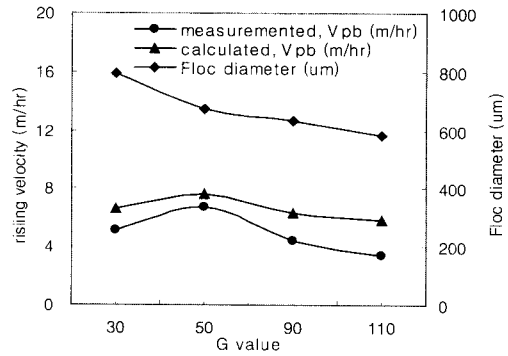


Fig. 16. Comparison between flotation velocity of model type and that of actual measurement floc-bubble agglomerate.

Table 5. Comparison of flotation velocity between calculated and actual measurement according to flocculation mixing intensity

G Value	Particle diameter $d_p(\mu m)$	Number bubbles ($d_b = 40\mu m$) with attachment	Bubble-particle				
			volume ratio $\beta(m^3/m^3)$	density, $\rho_{pb}(kg/m^3)$	diameter $d_{pb}(\mu m)$	rising velocity, calculation $v_{pb}(m/hr)$	rising velocity, measurement $v_{pb}(m/h)$
30 sec ⁻¹	795	1	0.0001	996	795.03	5.19	-
		5	0.0006	995	795.17	5.82	-
		10	0.0013	994	795.34	6.60	5.09
		50	0.0064	989	796.68	12.83	-
50 sec ⁻¹	675	1	0.0002	992	675.05	6.92	-
		5	0.0010	991	675.23	7.65	-
		10	0.0021	990	675.47	8.57	6.71
		50	0.0104	982	677.33	15.88	-
90 sec ⁻¹	635	1	0.0008	994	635.05	6.15	-
		5	0.0039	993	635.26	5.37	4.37
		10	0.0078	992	635.53	6.34	-
		50	0.0389	982	637.63	14.12	-
110 sec ⁻¹	584	1	0.0003	994	584.06	3.93	-
		5	0.0016	993	584.31	4.78	3.39
		10	0.0032	991	584.62	5.84	-
		50	0.0161	978	587.11	14.28	-

$g = 9.81 m/sec^2$, $\rho_w = 999.8kg/m^3$, $\mu = 1.01 \cdot 10^{-3}kg/m^2$, at 20°C

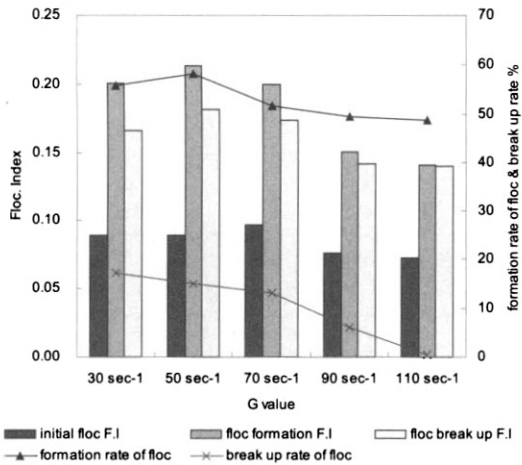


Fig. 17. Formation rate and break up rate of floc

파괴의 가능성이 있는 것으로 판단된다. 이러한 영향을 검증하기 위해 응집 후 수중의 잔류 입자를 입자계수기로 측정하여 플럭형성의 기여정도를 파악하였다. 이러한 현상은 Fig. 17과 같이 응집강도에 따른 플럭형성 후 응집강도를 20sec⁻¹ 증가시킬 경우 PDA를 이용한 플럭의 파괴율 분석 결과, 응집 G값이 높을수록 플럭의 파괴정도는 낮은 것으로 나타났다. 따라서 부상공정에서 낮은 응집강도로 밀도가 낮은 큰 플럭을 생성시키는 것은 처리 효율의 저하를 가져올 수 있으며, 높은 응집강도로 작은 플럭을 생성시키는 것은 플럭-기포의 결합체의 크기가 낮아져 부상속도의 저감이 발생된다. 또한 높은 응집강도는 응집 후 잔류 미세입자가 존재하여 처리수질에도 나쁜 결과를 초래하는 것으로 나타났다. 그러므로 부상공정의 처리효율의 향상을 위해서는 응집강도 50sec⁻¹로의 운영이 최적 조건으로 판단된다.

4. 결론

부상공정에서 부상속도 및 플럭의 제거효율 향상을 위해 PIA, PDA, FSA 등을 이용하였다. 응집공정에서 응집체의 종류, 응집 G값 조건에 따른 실제의 플럭의 형성의 특성 및 부상속도 등을 비교 평가하여 최적의 DAF 공정 운영을 위한 전처리 조건을 도출하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

기포의 크기가 부상속도에 미치는 영향을 알아보

기 위해 PIA 방법을 이용하여 실측한 결과 문헌상의 이론적인 부상속도와 유사한 결과가 도출하였다. 이는 플럭-기포의 부상속도 평가를 위한 신뢰성을 향상시키는 역할을 하였다.

DAF 처리를 위한 정전기적인 특성 평가 결과, Zeta Potential 값이 +2~4mV이 되도록 응집제량을 적용하는 것이 처리효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

부상공정에서의 응집강도에 따른 처리수 탁도 비교를 실시한 결과, 응집강도가 부상효율에 직접적인 영향을 나타냄을 알 수 있으며, 이에 대한 최적화가 정수장 수질향상에 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다.

플럭의 크기 및 밀도 값을 파악하기 위한 침강속도는 PIA를 이용하여 분석을 하였으며, 분석결과 낮은 응집 G값에서는 밀도가 플럭의 침강에 상대적으로 크게 영향을 미친 반면, 응집 G값 50sec⁻¹ 이상에서는 플럭의 밀도의 한계로 인해, 플럭의 크기가 침강속도에 영향을 주는 중요한 인자로 판단된다.

응집강도 별로 생성된 플럭의 밀도에 따른 부상속도를 평가한 결과, 응집강도 50sec⁻¹일 때 부상속도가 가장 빠르게 나타났으며, 처리효율 또한 가장 높게 나타났다. 응집강도가 낮은 경우(30sec⁻¹)는 플럭의 밀도가 낮아 상대적으로 생성된 플럭이 파괴될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

부상공정에서 낮은 응집강도로 밀도가 낮은 큰 플럭을 생성시키는 것은 플럭파괴 등 처리 효율의 저하를 가져올 수 있으며, 높은 응집강도로 작은 플럭을 생성시키는 것은 플럭-기포의 결합체의 크기가 낮아져 부상속도의 저감이 발생된다. 또한 높은 응집강도는 응집 후 잔류 미세입자가 존재하여 처리수질에도 나쁜 결과를 초래하는 것으로 나타났다. 그러므로 부상공정의 처리효율의 향상을 위해서는 응집강도를 약 50sec⁻¹로 운영하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. AWWA. (1999) Water quality & treatment 5edition, McGraw Hill, pp.7.47-7.61.
2. De Rijk S. E. (1994) Bubble size in flotation thickening, *J. Water Research*, **28**(2), pp.65-473
3. Edzwald J. K. (1995). Principles and applications of dissolved

- air flotation. *Wat. Sci. Tech.*, **31**(3-4), pp.1-23.
4. Fukushi K. I., Matsui Y., and Tambo N. (1998) Dissolved Air Flotation: experiments and kinetic analysis, *J. Water SRT-AQUA*, **47**(2), pp.76-86.
 5. Gregory J. (1997) The density of particle aggregates, *J. Wat Sci Tech.*, **36**(4), pp.1-13.
 6. Gregory J. (2003) Monitoring floc formation and breakage, *IWA Special conference*. pp. 183-190.
 7. Han M. Y. and Dockko S. (1999) Zeta potential measurement of bubbles in DAF process and its effect on the removal efficiency, *Water Supply: the review journal of the international water supply association*, **17**(34), pp.177-182.
 8. Han M. Y., Park Y. H. and Yu T. J. (2002) Development of new method of measuring bubble size. *Wat. Sci. & Tech.: Water Supply*, **2**(2), pp.77-83.
 9. Ljunggren M., Jonsson, L. (2003) Separation characteristics in dissolved air flotation-pilot and full-scale demonstration, *J. Wat Sci Tech.*, **48**(3), pp.89-96.
 10. Ree A. J., Rodman D. J. and Zabel T. F. (1979) *Water Clarification by flotation*. Medmenham, U.K.: Water research center.
 11. Schers G. J. and Dijk J. C. (1992) Chemical Water and Treatment II, *J. Water Supply*, **2**(5-6), pp.465-473
 12. Tambo N. and Watanabe Y. (1979) Physical characteristics of floc-I: The floc density function and aluminium floc. *Water Research*, **13**, pp. 409.
 13. Tambo N. (1995) A kinetic model for DAF in wastewater treatment, *J. Wat. Sci. Tech.*, **31**(3-4), pp.37-47
 14. Valade M. T., Edzwald J. K., Tobiason J. E., Dahlquist, J., Hedberg, T., and Amato, T. (1996) Pretreatment Effects on Particle Removal by Flotation and Filtration and filtration, *J. AWWA*, **88**(12), pp.35-47.
 15. 독고석 등. (2002) 용존공기부상법에서 충돌메커니즘의 영향요인 분석, *상하수도학회지*, **16**(5), pp.562-568.