

## 용존공기부상(DAF) 공정을 이용한 생물학적 플록의 부상분리

### Flotation Separation of Biological Floc Using the Dissolved Air Flotation Process

곽동희<sup>1,\*</sup> · 김성진<sup>2</sup> · 임영환<sup>1</sup>

Kwak, Dong-Heui<sup>1,\*</sup> · Kim, Seong-Jin<sup>2</sup> · Lim, Young-Hwan<sup>1</sup>

1 서남대학교 환경화학공학부

2 한양대학 보건환경과

(2004년 7월 25일 논문 접수, 2004년 8월 30일 최종 수정논문 채택)

#### Abstract

The behavior of biological particles in DAF (dissolved air flotation) process was analyzed by employing PBT (population balance theory). After decline growth phase of activated sludge, the value of the initial collision-attachment efficiency was increased over than 0.35 corresponding relatively high value in the whole life cycle of microorganism. For practical application of DAF as a solid separation process, It is desirable that microbial particles should be operated to perform high solid removal efficiency in biological wastewater treatment.

**Key words:** population balance, biological particles, bubble, flotation, solid separation

**주제어:** 개체군수지, 생물학적 입자, 기포, 부상, 입자분리

#### 1. 서론

부상분리(flotation)는 분산매(dispersion medium) 중에 함유된 부유상(suspended phase)에 미소한 기포(bubble)를 부착시켜 분산매와 공기가 접하고 있는 한계면까지 부상시켜 고액분리를 유도하는 것을 말하며 부유물질, 유분, 그리스 등을 물로부터 분리하여 폐수를 정화하고 sludge를 분리, 농축하는데 사용된다(Kalinske et al., 1953).

복유립을 중심으로 널리 적용되고 있는 부상분리의 일종인 용존공기 부상(dissolved-air flotation, DAF) 공정은 정수처리 system에서 최종 공정인 여과의 전처리공정으로 기존의 침전공정을 대체할 수 있는 효과적인 대안으로 부상하고 있으며 특히 저탁도, 부식질(humic substances) 또는 자연적인 색도나 조류 등을 함유한 원수의 처리에 유용한 공정으로 알려져 있다(Zabel, 1985).

아울러, 제지 및 식품폐수 등의 생물학적 폐수처리 시설에서 뿐만아니라 하수처리공정에 있어서도 플록의

\*Corresponding author Tel: +82-63-620-0223, Fax: +82-63-620-0211, E-mail: kwak124@seonam.ac.kr (Kwak, D.-H.)

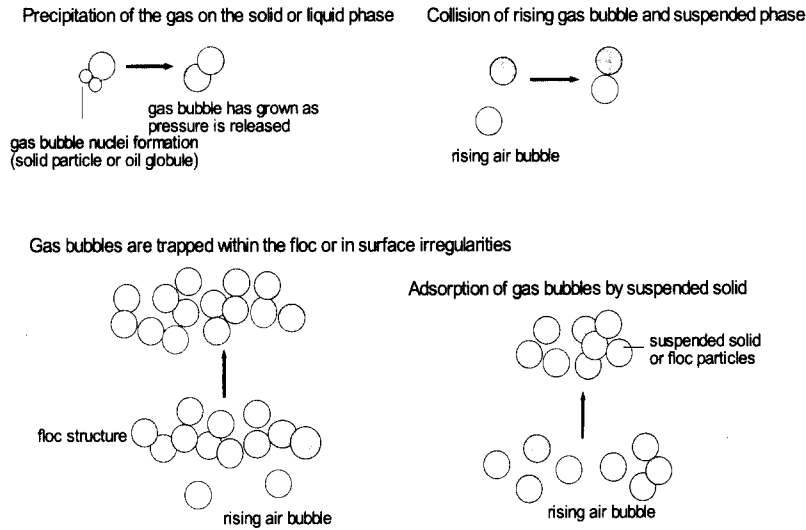


Fig. 1. Schematic diagram of float (floc-bubble agglomerates) formation.

부상분리와 슬러지 농축에 DAF 공정이 적용되고 있다.

DAF 공정을 생물학적 폐수처리시설에 도입하면 기존의 생물학적 하수처리공정에서 많은 동력비와 유지관리상 어려움을 유발하고 있는 다음과 같은 문제를 해소하고 여러 가지 효과를 얻을 수 있다. 1) 원수 중에 함유된 가벼운 물질의 용이한 고액분리와 더불어 미생물 플록의 비중을 CGS(conventional gravity sedimentation)에 비하여 보다 크게 증가시킬 필요가 없으며, 2) 기존 부유성장 폐수처리시스템의 가장 대표적인 문제점인 슬러지벌킹(sludge bulking) 문제를 해소시키거나 용이하게 제어(control)할 수 있게 되고, 3) 활성슬러지 등의 생물학적 부유성장형태의 처리시설에서 유지관리에 부담스러운 슬러지 순환펌프를 본 장치로 전면 또는 부분적으로 대체함으로써 동력비와 유지관리상 문제를 해결할 수 있으며, 4) DAF 노즐에서 분사되는 미세한 기포로부터 용해되는 산소는 그 용해효율이 뛰어나 폭기조 미생물의 생장에 훨씬 유리하게 작용하게 된다.

본 연구에서는 DAF(dissolved air flotation) 공정을 미생물 플록의 분리제거에 적용함에 있어서 미생물 입자의 성장단계별 부착효율을 조사하고 해석하여 미생물 플록의 분리 제거를 효과적으로 달성할 연구정보를 제공하고자 일련의 실험을 실시하였다.

## 2. DAF의 부상분리 기작과 모델

### 2.1 미세기포와 생물학적 플록의 결합 기작

기포의 입자는 약  $10\sim 120\mu\text{m}$ 의 범위에 존재하며 이 기포는 자체의 부력에 의하여 상승력을 가진다. 기포가 플록입자에 결합하는 물리적 작용은 다음의 3가지 현상으로 정의할 수 있다(Vrablick, 1959; Packham, et al., 1972).

- 플록입자에 기포의 부착(adhesion)
  - 기포와 입자와의 충돌(collision)
  - 기포에 입자의 침전(precipitation): 여기에는 기포의 핵형성과정(process of nucleation)이 포함된다.
- 형성된 플록에 의한 상승기포의 포집(trapping)
- 플록형성시 플록구조내부에 기포의 흡수(absorption) 및 흡착(adsorption)

다음의 Fig. 1은 이상의 물리적 작용에 의한 기포와 플록입자간의 결합에 의한 플로트(float) 입자의 형성을 나타낸다.

### 2.2 DAF 공정에서의 개체군수지 모델

개체군수지(population balance in turbulence, PBT)

모델(Tambo and Fukushi, 1985)은 1) 기포-플록의 충돌과 부착, 2) 기포-플록 결합체(float)의 상승속도 등을 다른 방정식으로 이루어져 있다. 이 수식은 기본적으로 주어진 혼합시간 t(s)에서 i개만큼의 기포와 결합한 플록의 개체수를 계산함으로써 수행된다. 아울러 여기서는 다음의 몇가지 가정이 요구된다.

1) 점성영역 분산(Levich, 1962)에서 국부적 등방성 난류(isotropic turbulence)의 이론에 기초하여 혼합지역(mixing zone)에서 교반강도는 평균 에너지 소실율(the mean effective energy dissipation rate),  $\epsilon_0$ (W/cm<sup>3</sup>)로 표현된다.

2) 기포경은 공정전체에서 일정하며 평균 입경( $d_a$ )는 60 $\mu$ m 정도이다.

3) 일단 플록의 표면에 부착한 기포는 탈착되지 않는다.

4) 어떤 플록 입경  $d_f$ (cm)에 결합할 수 있는 최대 기포수  $m_f$ (-)가 존재한다.

5) 충돌-부착계수  $\alpha$ (-)는 어떤 플록 표면에 응집·결합된 양이온의 두께와 부착된 기포의 수로 계산이 가능하며, 이때 기포의 결합이 전혀 없는 초기상태 0는 근본적으로 약 0.3-0.4이다.

$$\frac{dn_{f,i}}{dt} = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} n_a (d_a + d_f)^3 (\alpha_{f,i-1} \cdot n_{f,i-1} - \alpha_{f,i} \cdot n_{f,i}) \quad (i = 1 - m_f) \tag{식 1}$$

$$\frac{dn_{f,i}}{dt} = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} n_a (d_a + d_f)^3 (-\alpha_{f,0} \cdot n_{f,0}) \quad (i = 0) \tag{식 2}$$

$$\frac{dn_a}{dt} = -\int_0^\infty \left\{ \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} n_a (d_a + d_f)^3 \sum_{i=0}^{m_f-1} (\alpha_{f,i} \cdot n_{f,i}) \right\} d d_f \tag{식 3}$$

$$m_f = \pi \alpha_0 (d_f/d_a)^2 \tag{식 4}$$

$$\alpha_{f,i} = \alpha_{f,0} (1 - i/m_f) = \alpha_0 (1 - i/m_f) \tag{식 5}$$

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{3}{2} \pi \beta \left( \frac{\epsilon_0}{\mu} \right)^{1/2} n_a (d_a + d_f)^3 \alpha_0 \left( 1 - \frac{I_f}{m_f} \right) \tag{식 (6)}$$

여기서,  $I$ : 평균 부착기포수  $i$

$N_f$ : F-size 플록의 농도

$n_a$ : 자유 기포농도

$\mu$ : 물의 점성도

$\beta$ : 상수, (= 1/15)<sup>1/2</sup>

$i_j$ : f-size 플록에 결합되는 평균적 기포개체수

o(아래첨자): 초기 값.

이 방정식들은 다음의 무차원 변수들을 도입하여 표준화된 무차원 방정식들로 나타낼 수 있다.

- 플록 입경 :  $F = d_f/d_a$
- $i$  기포와 결합한  $F$  크기의 플록농도 :  $N_{F,i} = n_{f,i}/n_f$
- 자유 기포농도(미결합 기포농도) :  $N_a = n_a/n_{a0}$
- 총 플록농도 :  $N_o = n_f/n_{a0}$
- F-size 플록에 결합할 수 있는 최대 기포개체수 :  $m_f = \alpha_0 F^2$
- 표준화된 혼합시간 :  $T = (3/2) \pi \beta (\epsilon_0/\mu)^{1/2} n_a d_a^3 \alpha_0 t$
- 부착단계에서 자유 기포수의 감소를 고려한 보편적 혼합시간 ( $\theta$ ):  $d\theta/dT = N_a$

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에서는 회분식 DAF 부상분리 컬럼을 제작하여 실험을 실시하였으며 다음의 Fig. 2는 생물학적 플록의 부상분리 장치를 나타내고 있다.

#### 3.2 시료 및 수질분석방법

본 실험에 사용되는 대상시료는 Table 1과 같이 인공폐수를 제조하여 일반적인 생활하수 농도범위에 해당하도록 실험장치에 주입하였으며, 수질분석은 수질오염공정시험법에 의거 실시하였다.

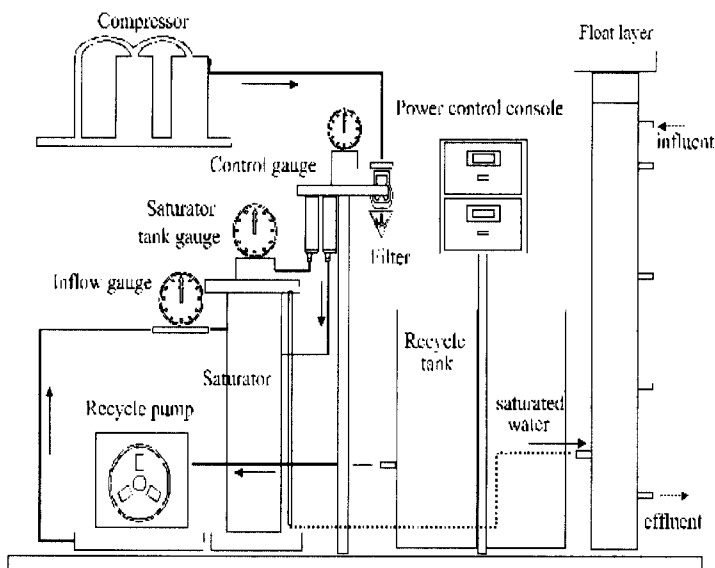


Fig. 2. Schematic diagram of pilot plant for DAF aeration and sludge recycle.

### 3.3 실험장치의 운전

초기 실험장치(pilot plant)의 운전은 N시 하수종말 처리장의 반송 슬러지를 채취하여 본 실험장치에 seeding하였다. 슬러지는 인공 합성원수에 3주일 정도의 적응기를 거쳐 순양된 미생물 슬러지를 미생물 반응기에 배양시켰으며, 일정 시간간격으로 시료채취를 하여 DAF 실험장치에 적용하였다.

한편, DAF 실험장치는 flotation 컬럼을 이용하여 batch type으로 운전하여 미생물학적 플록의 부상분리 특성을 조사하고 PBT(population balance) 모델을 통

하여 해석을 실시하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 운전시간에 따른 생물학적 플록의 변화

본 실험을 위하여 batch type의 반응기에 미생물 세포를 배양시킨 결과를 다음의 Table 2에 나타내었다. Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 활성슬러지의 배양시간에 따라 미생물 세포량은 전형적인 'S' 곡선을 나타내었다. 한편, 미생물의 성장에 필요한 기질은 용존

Table 1. Composition of artificial wastewater

Discription	Chemicalas					
Nutrients	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	0.45 g/L	NH <sub>4</sub> Cl	0.12 g/L	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.07 g/L
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.42 g/L	KCl	0.04 g/L	CaCl <sub>2</sub>	0.04 g/L
	NaCl	0.08 g/L	MgSO <sub>4</sub>	0.04 g/L	etc	

Table 2. The results of biomass growth in microbial reactor

Time(hour)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
MLSS(mg/L)	194	194	235	306	311	425	502	514	517	520	527
SCOD(mg/L)	144	140	138	135	130	119	106	98	90	79	66
Time(hour)	22	24	26	28	30	32	34	46	52	58	72
MLSS(mg/L)	530	545	494	475	461	455	447	385	366	353	352
SCOD*(mg/L)	55	48	45	34	35	29	34	30	25	28	23

Note) SCOD: soluble CODMn in microbial reactor

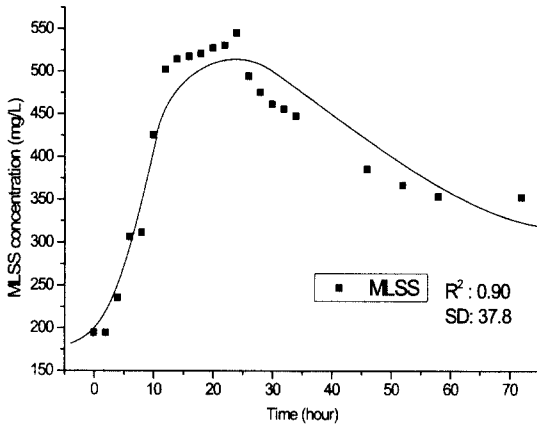


Fig. 3. The growth curve of microbial biomass.

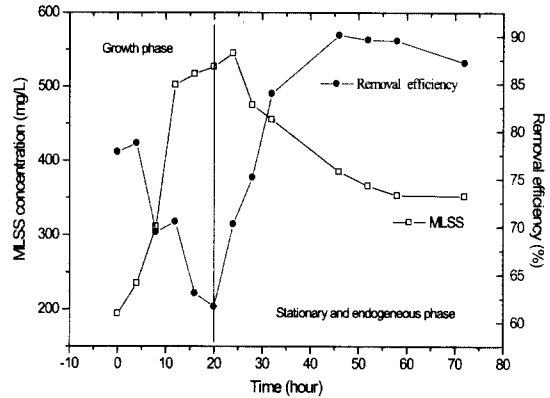


Fig. 4. The variation of solid removal efficiency depending upon growth phase of biomass.

COD로써 초기 주입농도 144mg/L에서 대략 배양이 종료되는 시점인 3일 후에는 23mg/L만 반응기에 잔존하여 배양 미생물 세포에 의한 용존COD 섭취 (uptake)는 약 84%이었다.

#### 4.2 성장단계별 부상분리 효율

미생물 반응기의 배양시간에 따라 미생물 세포량의 변화에 기초하여 세포의 성장단계를 살펴본 바, 이에 따른 미생물 세포의 부상분리 효율을 살펴보았다. 다음의 Fig. 4에 나타난 바와 같이 미생물 플록의 부상분리 효율은 성장단계에 있어 뚜렷한 변화를 보

이며 감소성장기 (decline growth phase) 또는 정지기 (stationary phase)를 기점으로 부상분리 효율은 급격히 상승하였다.

#### 4.3 침전과 부상의 비교평가

다음은 미생물 세포의 성장단계별로 나타난 부상분리의 효율 변화를 침전분리의 경우와 비교하여 살펴보았다. 다음의 Table 4는 미생물 세포량의 변화에 기초하여 각 성장단계에 따라 나타나는 침전효율을 나타내고 있다. 침전실험을 위한 시료는 부상분리를 위하여 채취한 시료와 동일한 것으로 침전시간은 약

Table 3. The experimental results of flotation separation for microbial particles by DAF

Time (hour)	0	4	8	12	16	20	24
SS <sub>out</sub> (mg/L)	43	50	95	148	191	202	162
Rem. (%)	77.8	78.7	69.5	70.5	63.1	61.7	70.3
Time (hour)	28	32	46	52	58	72	-
SS <sub>out</sub> (mg/L)	118	73	38	38	37	45	-
Rem. (%)	75.2	84.0	90.1	89.6	89.5	87.2	-

Note) Operation condition of DAF: Recycle ratio 10%, Pressure of saturator: 4.0 atm.

Table 4. The experimental results of sedimentation for microbial particles by CGS

Time (hour)	0	4	8	12	16	20	24
SS <sub>out</sub> (mg/L)	60	60	83	118	120	140	141
Rem. (%)	69.1	74.5	73.3	76.5	76.8	73.4	74.1
Time (hour)	28	32	46	52	58	72	-
SS <sub>out</sub> (mg/L)	107	82	52	61	60	65	-
Rem. (%)	75.2	82.0	86.5	83.3	83.0	81.5	-

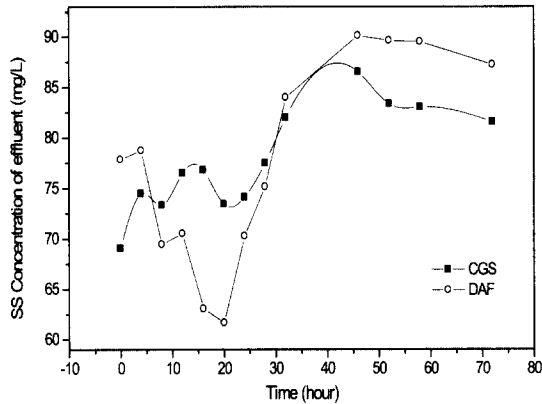


Fig. 5. The variation of solid removal efficiency depending upon growth phase of biomass.

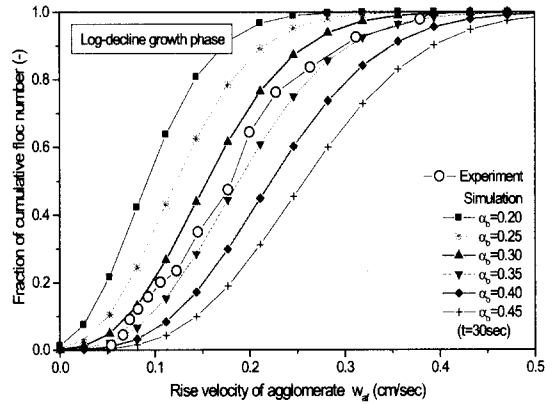


Fig. 7. Estimation of the initial collision-attachment factor ( $\alpha_0$ ) for growth phase of microbial floc.

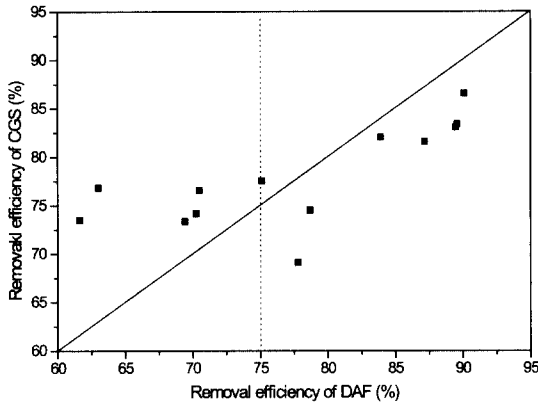


Fig. 6. The comparison of solid removal efficiency between DAF and CGS.

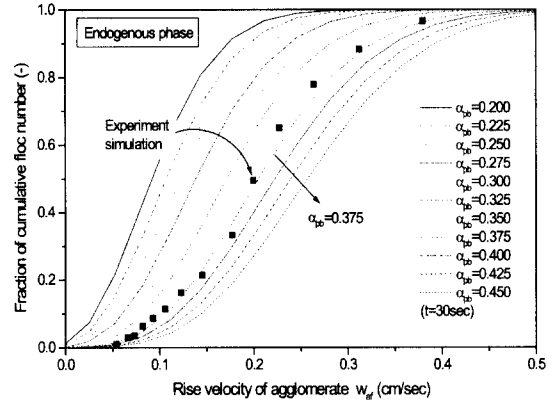


Fig. 8. Estimation of the initial collision-attachment factor ( $\alpha_0$ ) for endogenous phase of microbial floc.

30분이었으며 부상분리의 실험에 사용한 고액분리용 컬럼을 미세기포의 주입만을 생략하여 그대로 침전시켰다.

다음의 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 각 성장단계에 따라 나타나는 생물학적 입자의 분리효율은 침전과 부상의 경우 모두 유사한 양상을 보여주고는 있으나 DAF를 적용한 경우가 침전의 경우보다 크게 변동하였으며 이를 통하여 DAF의 운전조건이 동일함에도 불구하고 분리효율의 변화를 나타내는 것은 미생물 세포의 성장시간에 따른 입자의 기포-플록간의 부착효율의 변화에 기인된 것으로 판단된다.

한편, Fig. 6에는 침전(CGS)과 부상(DAF)간의 생

물학적 입자 제거효율을 상대적으로 나타내고 있으며 여기에서 보는 바와 같이 DAF의 경우가 더 높은 제거효율을 달성할 수 있었다. 그러나 통상 대수 성장 단계를 중심으로 미생물 세포의 침전효율이 좋지 않은 시기임에도 불구하고 오히려 침전효율보다 부상효율은 더 감소하였으며 이는 기포-플록간 부착효율이 크게 감소한 원인으로 여겨진다.

#### 4.4 미생물 플록의 초기 충돌-부착효율( $\alpha_0$ )의 평가

본 절에서는 개체군수와 실제 무기성입자의 부상분리 제거에 가장 중요한 변수로 작용되는 초기 충돌-부착효율( $\alpha_0$ )을 살펴보았다.

기포-플록 결합체의 상승속도 분포는 앞에 제시한 일련의 계산을 통하여 다음의 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 개체군수지 (population balance) 모델의 계산식을 통하여 모의한 곡선과 실제 실험을 통하여 얻어진 값을 비교 평가한 결과, 미생물 세포배양이 시작된 후 12시간(대수성장 단계)이 경과된 미생물 플록의 초기 충돌-부착효율 ( $\alpha_0$ )은 무기성 입자와 유사한 값(곽동희, 2003)인 0.35를 나타내었으며, 48시간(내호흡기)에는 0.35를 초과하는 것으로 나타났다. 이 초기 충돌-부착효율은 개체군수지 모델의 DAF공정에서의 적용에서 전체한 유효범위값 0.3-0.4의 범위중 정체기-내호흡기단계의 미생물 세포입자는 0.35를 초과하는 대체로 양호한 값을 나타내었다.

## 5. 결 론

미생물 플록의 부상분리를 보다 효과적으로 달성함에 있어서 가장 중요한 기포-플록 부착효율을 비롯한 여러 가지 부상분리 특성을 DAF 실험을 통하여 살펴보았다.

미생물 플록의 부상분리 효율은 성장단계에 있어 뚜렷한 변화를 보이며 정체기를 기점으로 부상분리 효율은 급격히 상승하였다. 미생물 세포의 성장단계 별로 나타난 입자분리 효율은 부상과 침전 모두 유사한 양상을 보여주고는 있으나 DAF가 CGS보다 상대적으로 크게 변동하였다.

정체기 및 내호흡기에서는 DAF의 경우가 더 높은 제거효율을 달성할 수 있었으나 미생물 세포의 침전효율이 좋지 않은 대수성장단계에서는 오히려 침전

효율보다 부상효율은 더 감소하였다. 또한 미생물 플록의 부상분리 효율을 개체군수지 (population balance) 모델의 계산식을 통하여 모의한 곡선과 실제 실험을 통하여 얻어진 값을 비교 평가한 결과, 미생물 세포배양이 시작된 후 12시간(대수성장단계)이 경과된 미생물 플록의 초기 충돌-부착효율( $\alpha_0$ )은 0.35에 미치지 못하였으며, 48시간(내호흡기)에는 0.35를 초과하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 산학협동재단의 2003년도 연구비지원사업에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 곽동희, 이재욱, 한무영 (2003) DAF공정에서의 개체군수지에 의한 무기성 입자거동의 해석, *상하수도학회지*, 17(2), pp. 517-527.
- Kalinske, A. A., and Evans, R. R. (1953) Comparison of Flotation and Sedimentation in Treatment of Industrial Wastes, *Proceeding of Industrial Waste Conference 8th*, pp. 64-71.
- Packham, R. F., and Richards, W. N. (1972) *Water Clarification by Flotation-1*, Water Research Association, November.
- Tambo, N. and Fukushi, K. (1985) A Kinetic Study of Dissolved Air Flotation, *Journal of JWWA*, 606, pp. 22-30.
- Vrablick, E. R. (1959) *Fundamental Principles of Dissolved-air Flotation of Industrial Wastes*, West Lafayette, Ind. Proc. 14th Annu. Purdue Industrial Waste Conference.
- Zabel, T. (1985) The Advantages of Dissolved-Air Flotation for Water Treatment, *Journal of AWWA*, 77(5), pp. 42-45.