

# DAF 공정에서 무기 고형입자의 유체역학적 충돌효율과 부상특성

## Hydrodynamic Collision Efficiency and Flotation Characteristics of Inorganic Particles in DAF Process

곽동희<sup>1,\*</sup> · 김성진<sup>2</sup> · 이화경<sup>1</sup> · 정홍조<sup>1</sup> · 이재욱<sup>1</sup> · 정팔진<sup>3</sup>

Kwak, Dong-Heui<sup>1,\*</sup> · Kim, Sung-Jin<sup>2</sup> · Lee, Hwa-Kyung<sup>1</sup> · Jung, Heung-Joe<sup>1</sup>  
Lee, Jae-Wook<sup>1</sup> · Chung, Paul-Gen<sup>3</sup>

1 서남대학교 환경화학공학부

2 한양대학 보건환경과

3 전북대학교 환경화학공학부

(2002년 5월 15일 접수, 2002년 10월 2일 최종수정논문 채택)

### Abstract

Separation characteristics of inorganic particles occurred during heavy rainwater were investigated in DAF (dissolved air flotation) process. In order to remove the inorganic particles effectively, the collision and flotation efficiencies were examined from a hydrodynamic point of view. Generally, the collision efficiency increased with floc size under the variation of fluid dynamic conditions including inertial force. However, more precise model should be required to analysis the collision efficiency expressed both the physical properties for inorganic particles and hydrodynamic conditions for a reactor.

**Key words:** collision efficiency, flotation characteristics, inorganic particles, dissolved air flotation

**주제어:** 충돌효율, 부상특성, 무기성 입자, 용존공기부상

### 1. 서론

우리 나라의 여건은 북유럽과 북미 등 DAF 공정을 많이 채택하고 있는 외국의 상수원의 수질특성과는 달리 국내의 하절기 집중강우와 높은 유출계수 등에 기인하여 상수 원수에 무기성 입자의 혼입 정도가 상당히 높다. 이와 같은 상황을 반영하여 강우로 인한 무기성 입자의 부상분리 효율에 대한

일부의 회의적 시각이 DAF 공정의 확대에 걸림돌로 작용하고 있으며 이를 극복하기 위한 심도 있는 연구 및 기술정보의 제공, 효과적인 운전방법 도출이나 현실적 대안의 설정 등이 요구되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 집중 강우기간에 무기성 고형입자의 DAF 효율을 살펴보고 집중 강우에 따라 상수원에 유입되는 점토(clay) 입자와 같은 무기성 고형입

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

자에 대한 충돌효율을 유체역학적 관점에서 규명함으로써 우리 나라의 독특한 상황을 반영한 DAF의 상수처리에 유용한 정보를 제공하고자 하였다.

일반적으로 입경의 증가에 따라 충돌효율의 상승한다고 인정되는 사실에 근거하여 무기성 고형입자에 있어서도 이와 같은 비례관계가 성립할 것인지를 무기성 고형입자의 고유 성질을 고려하여 주변 유체의 흐름과 관성력 등의 몇가지 유체역학적 관점에서 이를 해석하였다.

## 2. 기포와 입자간의 유체역학적 작용

기포와 입자의 충돌에 대한 유체역학적 관점에서, 대부분의 연구는 기포표면이 움직이지 않거나 기포의 유선에 도착한 근접입자의 속도를 늦추는 기포의 지연 계면(retarded surface)에 초점이 맞추어 연구되어 왔다.

관성이 매우 작은 조건 아래에서의 LRHI(the long-range hydrodynamic interaction)의 영향은 Collins와 Jameson(1976) 및 Reay와 Ratcliff(1975)에 의해 입자의 직경이 감소되고 기포의 입경이 커짐에 따라 충돌효율( $E_c$ )이 급속히 감소한다는 것이 실험적으로 증명되었으며, 그 후 Anfruns와 Kitchener(1977)에 의해 이론이 정립되었다.

그러나, Schulze(1992)는 기포표면의 지연정도에 따라 부상공정에서 충돌이론의 적용에 있어서 불확실성의 존재를 지적하였으며 그는 기포표면의 지연작용은 충돌효율을 10배 정도까지 감소시킨다고 하였다. 아울러 최근에는 부상하면서 움직이는 기포 표면의 상태에서 기포-입자 충돌에 대한 실험적 연구가 진행되고 있다(Hewitt, et al., 1995). 이 같은 조건은 실제 DAF 공정에서 처리속도의 향상을 위하여 수리학적 부하량을 증가시켜 운전하고 있는 반응조에서는 유체흐름의 변화로 인하여 처리효율에 큰 영향을 미칠 수 있는 요인으로 작용할 가능성이 있다.

입자와 기포의 충돌에서 관성력(Inertial forces)은 무시되어 왔다. 기포표면에서의 지연작용은 계면활성제가 존재하는 곳에서 중간 크기의 기포 표면에서는 무시할 정도로 작기 때문이라고 인정되었기 때문이다. 한편, Dobby(1986)와 Luttrell(1992)은

보다 성장한 입자의 속도증가에 따라 관성력에 대한 영향이 있을 가능성을 지적하였으며, Dobby and Finch(1987)는 지연 기포 표면(retarded bubble surface) 위에 입자의 침착에서 관성력에 대해 관심을 가지고 그에 따라 Stokes number를 고려하였다. 무차원 Stokes number  $K$ 는 점성저항에 대한 관성력의 크기의 비를 나타내며,  $K = 2\rho_p U_b a_p^2 / 9a_b \mu$ 로 표현된다. Levin(1961)은 임계스토크수( $K_c = 1/12$ ) 이하의 입자들의 관성 침착(the Inertial deposition)은 불가능하다고 주장하였으며, 그의 결과는 Langmuir와 Blodgett(1945)의 수치분석과 결과치와 일치하였다. Langmuir와 Blodgett은 낙하하는 작은 물방울의 관성-유체역학적 상호작용(inertial-hydrodynamic interaction)에 대해 최초로 언급하였다.

Langmuir는 아래 식 (1)에서와 같이 그의 수치계산 결과를 충돌효율에 대한 공식으로 근사화시켰으며 이와 같은 연구는 한정된 입자의 크기에 한하여 적용할 수 있음이 Fonda et al.(1966)과 Michael et al.(1969)에 의해 증명되었다. 입자의 크기가 감소함에 따라 관성력과 스토크수는 감소하여 기포위에 작용하는 흐름으로부터 입자의 관성침착은 약해진다(negative effect)는 것이며, 이것은 Langmuir모델에서의  $K$ 값이 감소함에 따라 충돌효율이 급속히 감소함과 일치하고  $K < 0.7$  이하에 대하여 Samygin와 Chertilin(1977)에 실험에서 정량 및 정성적으로 Langmuir 방정식의 일치성을 증명하였다.

$$E_c = \frac{K^2}{(K + 0.2)^2} \quad \text{식 (1)}$$

한정된 크기의 입자침착에 대해 질량적 관점(mass point)에서 Sutherland(1948)는 입자의 크기에 대해 침착을  $E_0 = 3a_p/a_b$ 로 표현하였다. 그러나, Sutherland 방정식은  $K$ 값이 클 경우에는 타당하지만 작은 경우의 입자침착은 부적합 부적합하였다. 이 때문에 Dukhin et al.(1998)은 관성침착에서 충돌효율을 Langmuir공식과 질량적 관점의 접근을 모두 고려한 두변수의 함수, 즉  $E_c = E(a_p/a_b, K)$ 로 표현하였고, 아래 식 (2)에서와 같이 Ralston과 Dukhin(1999)은 관성력이 충돌효율에 미치는 영향에 대해 the generalized Sutherland 방정식을 제안하

었다. 한편 아래 식 (3)은 Sutherland가 제안한 충돌효율을 나타내고 있다.

$$\frac{E_c}{E_0} = \sin^2 \theta_t \left[ 3K^{III} \cos \theta_t \left( \ln \frac{3}{E_0} - 1.8 \right) - \frac{9K^{III}(2/3 + \cos^3 \theta_t / 3 - \cos \theta_t)}{2E_0 \sin^2 \theta_t} \right] \quad \text{식 (2)}$$

여기서,  $\theta_t = \arcsin[2\beta\sqrt{(1 + \beta^2 - \beta)}]^{1/2}$

$$\beta = \frac{2E_0 f}{9K}$$

$$K^{III} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{2U_b \Delta\rho r_p^2}{9\mu a_b} \text{ 이다.}$$

$$E_0 = 3(a_p/a_b); \text{ Sutherland \& equation} \quad \text{식 (3)}$$

여기서  $\theta_t$  = 접촉각,

$\beta$  = 무차원 수,

$\Delta\rho$  = 입자와 유체의 밀도차,

$f$  = 지연받지 않는 입자의 계면을 각각 나타낸다.

또한, 질량관점에서 입자의 기포위의 침착에 관한 방정식으로 Derjaguin과 Dukhin et al.(1986) 및 Jameson과 Luttrell(1989)은 기포의 레이놀드수가  $0.2 < Re < 100$  작은 범위에서 아래 식 (4)을 제안하였으며, 기포의 레이놀드수가  $Re \ll 1$  작은 Stokes flow(retarded bubble)에 대하여 Liers et al. 등은 식 (5)을 제안하였다.

$$E_0 = \left( \frac{3}{2} + \frac{4Re_B^{0.72}}{15} \right) \left( \frac{a_p}{a_b} \right)^2 \quad \text{식 (4)}$$

$$E_0 = \frac{3}{2} \left( \frac{a_p}{a_b} \right)^2 \quad \text{식 (5)}$$

본 연구에서는 the generalized Sutherland 방정식의 입자침착효율( $E_0$ )에 위의 식 (3)-식 (5)을 도입하여 기존의 여러 모델에 의한 충돌효율을 유체역학적 관점에서 비교하였다. 본 연구에서는 DAF의 설계와 운전에 있어서 수리학적 부하의 증가추세를 고려하여 기포의 유동성(레이놀드 수)과 강우로 인한 무기성 입자의 플록 입경의 성장에 따라 나타나는 조건에 있어서 여러 상황을 유체흐름과 관성력(inertia force) 등에 초점을 두고 살펴보았다.

### 3. 재료 및 방법

본 연구는 호소수를 주 상수원으로 하며 일부의 하천수가 상수 원수에 혼입되는 상수도시설에서 실제 정수처리시설로 유입되는 원수를 DAF pilot plant(처리능력 1.0m<sup>3</sup>/day)로 처리하여 강우 등에 의하여 유입되는 무기성 입자가 DAF에서의 효율변화를 살펴보았다. 아울러, 이와 같은 무기성 입자의 유입을 고려하여 실내에서 flotation column (height 200cm)과 pilot plant를 이용하여 무기성 입자의 부상분리 특성을 조사하였다.

다음의 Table 1은 실험이 진행된 시기의 섬진강 광역상수도 원수의 평균수질과 실내에서 제조하여 실험에 사용한 합성 원수의 수질범위를 나타내고 있으며 Fig. 1은 본 연구에서 사용한 DAF pilot plant의 제원과 모식도를 나타내고 있다.

Table 1. Raw water quality of Seomjinkang WTP and artificial water

	Raw water quality of WTP	Artificial water
pH	6.8-7.2	6.8-7.1
Turbidity(NTU)	2.0-20.0	10-120: clay(spiked)
Alkalinity( $\mu\text{g/l}$ as $\text{CaCO}_3$ )	10.0-30.0 $\text{CaOH}_2$ (injected)	10.0-30.0: $\text{CaOH}_2$ (spiked)
BOD( $\mu\text{g/l}$ )	1.5-2.0	—
COD( $\mu\text{g/l}$ )	2.5-3.0	—
SS( $\mu\text{g/l}$ )	1.8-2.5	10-120: clay(spiked)
Chemical composition of clay	$\text{SiO}_2$ 0.46, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 0.02, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 0.35, $\text{CaO}$ 0.03, etc 0.14 (by XRF)	

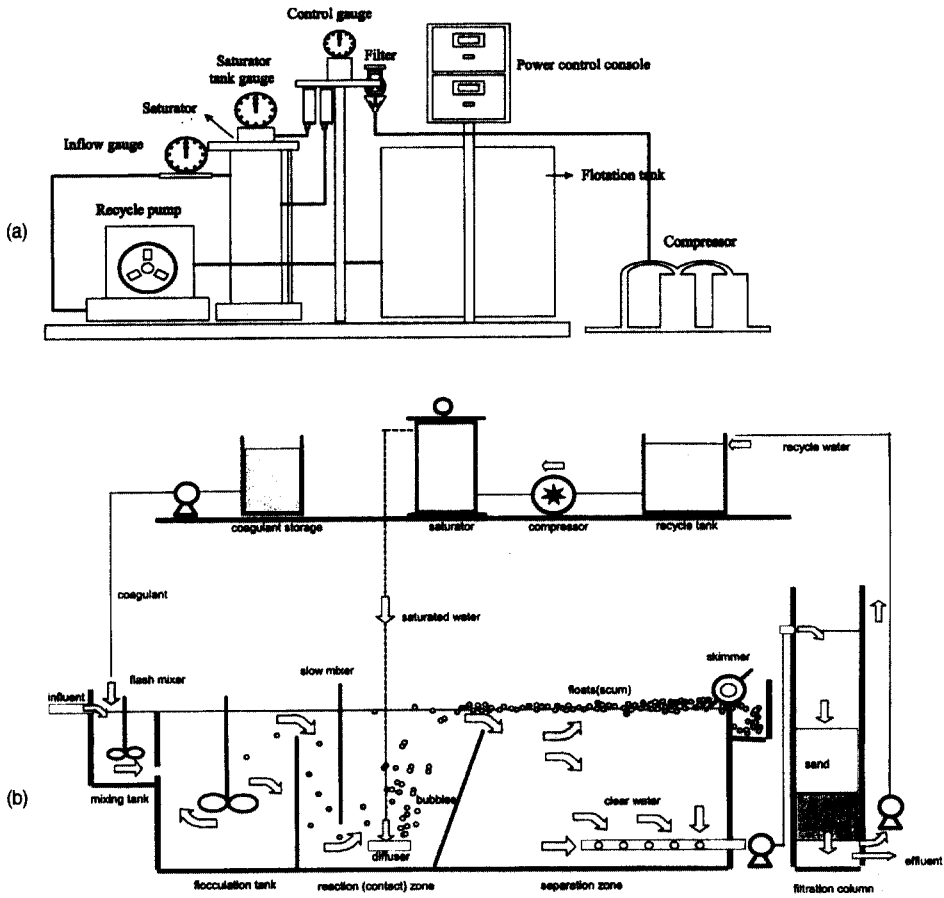


Fig. 1. Schematic diagram of dissolved-air flotation and filtration pilot plant. (a) Air dosing zone, (b) Water treatment processes of DAF pilot plant.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 강우 및 무기성 입자에 의한 DAF 효율의 변화

강우가 미치는 가장 대표적인 원수의 수질특성 변화는 원수중의 무기성 입자의 함유량 증가를 들 수 있다. 다음의 Fig. 2는 실제 상수원수를 사용하여 실험한 결과를 나타내고 있으며 Fig. 2를 살펴보면, 강우 날짜에는 DAF 처리효율이 CGS(conventional gravity sedimentation)의 처리효율에 비하여 상당히 낮아지며 그 이후 강우가 없는 날이 며칠 지속되면 DAF 처리효율은 다시 상승하기 시작한다. 이 강우의 영향으로 인하여 DAF 효율의 감소는 7월 한달 중에도 주기적으로 여러번 관찰된다.

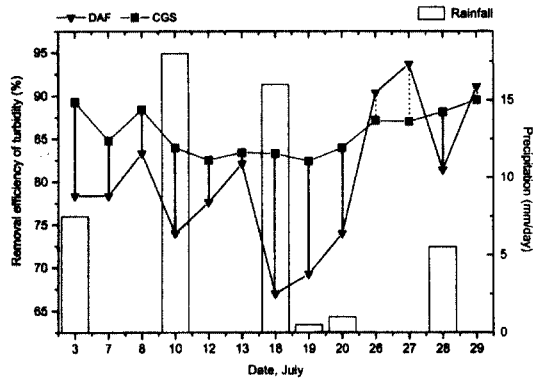


Fig. 2. Variation of turbidity removal efficiency.

또한, 실험기간중에는 하천수의 유입량의 증가와 강우 등의 영향으로 DAF의 탁도제거율이 CGS에

다소 못미치는 효율을 나타냈으나 본 실험은 강우 영향 등을 살펴보기 위한 것으로써 이 효율이 DAF 효율을 대변하지는 않는다.

#### 4.2. 입경분포와 부상효율

강우 등에 따라 상수원에 유입되는 무기성 입자 분포를 가상하기 위하여 본 연구에서 별도로 제조된 시료의 입자분포를 측정하였다. 초기 제조된 시료는 정수처리과정에서 응집제와 혼합, 응집되기 때문에 실제 기포와의 접촉 및 부상분리과정에서 중요한 응집 후 floc의 입자분포를 측정하였으며 여기서 제조된 clay particles의 비중이 균일하다고 가정하고 column 상부에 시료를 주입한 후 일정 시간에 따라 하부에 침강된 particle 농도를 측정한 침강속도별 입자분포를 이용하여 간접적으로 입자의 크기분포를 결정하

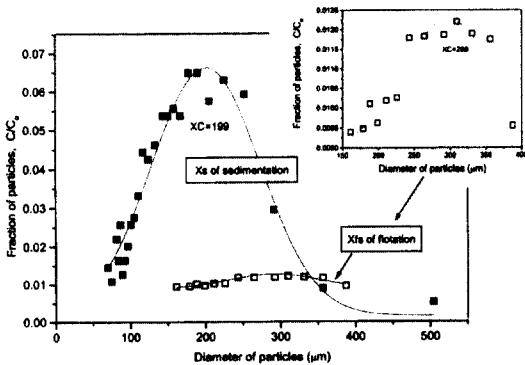


Fig. 3. Distribution of inorganic flocs.

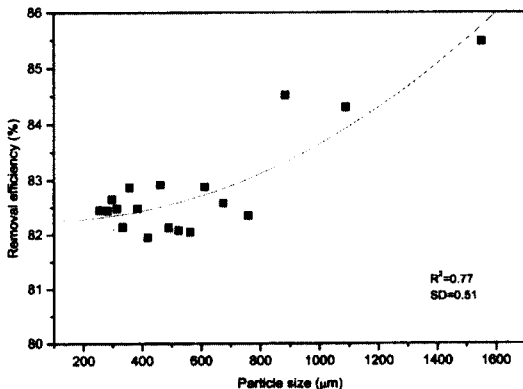


Fig. 4. Flotation efficiency of inorganic flocs and settling flocs after flotation, in batchwise flotation column.

였다. Clay particles가 함유된 물을 flotation column을 이용하여 침전 및 부상분리한 결과, 다음의 Fig. 3과 같이 일반적으로 DAF에 적용되는 floc의 입자분포 (Xs)(Fukushi, 1995)와 DAF로 분리되지 않고 침강하는 입자(Xfs) 등을 확인하였다.

한편, 이 입자분포를 토대로 회분식 부상컬럼에서 얻어진 부상효율은 다음의 Fig. 4와 같으며, Fig. 3에서 부상분리 후 침전하는 입자는 입경분포 대표치보다 약간 큰 플록 입경이 많았으나 이는 입자의 분율이며 Fig. 4에서처럼 입경의 증가에 따라 궁극적 부상효율도 증가하는 결과를 보였다.

#### 4.3. 충돌효율

##### 4.3.1. 입계스토쿠스내에서의 충돌효율

본 연구에서는 다음과 같은 몇가지의 가정을 전제로 유체역학적 해석을 실시하였다. 첫째, clay 입자의 floc 성장에 따라 입자의 관성력이 커진다. 둘째, 반응조내에서 수리학적 부하량의 상승 운전애 따라 기포의 레이놀즈 수가 증가한다.

본 연구에 적용한 방정식은 Langmuir's model(식 1), Sutherland's model(식 2), the generalized Sutherland's model(식 3), the generalized Sutherland 방정식을 Yoon과 Luttrell et al.(1989)이 수정한 the Modified Yoon and Luttrell's model(식 4) 및 Modified Liers's model(식 5)을 이용하였으며, 본 실험에서

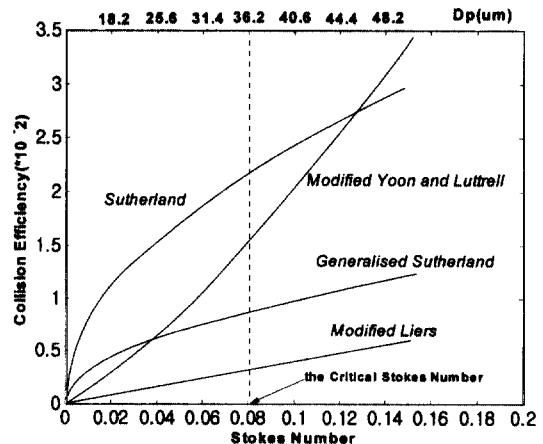


Fig. 5. The comparison of the Ec equations under the conditions of the critical Stokes number.

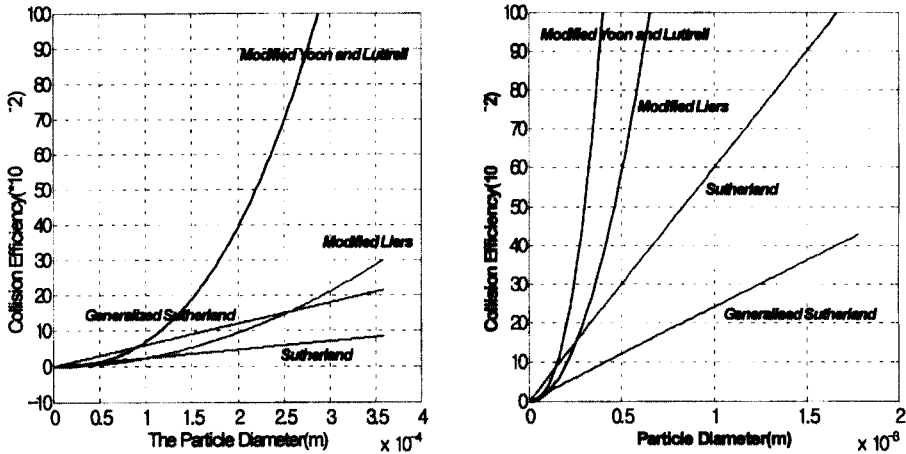


Fig. 6. The comparison of the  $E_c$  data calculated by various types of models.

은 기포의 직경에 대한 임계스토크 입자의 직경은  $36.2\mu\text{m}$ 를 나타내고 있다.

한편, Ralston과 Dukihin(1999)는 임계스토크수(0.08) 이하에서 충돌효율은 the Generalized Sutherland에 의한 모델링 결과치가 실험결과치와 매우 잘 일치한다고 보고한 바 있으며 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 여러 모델에 의하여 예측된 충돌효율은 다소 상이한 결과를 나타내고 있다.

#### 4.3.2. 입경변화에 따른 충돌효율( $E_c$ )의 변화

충돌효율을 모델링하기 위한 변수값들은 본 실험을 통해서 입자의 밀도  $1,003\text{kg}/\text{m}^3$ , 유체의 점성도  $0.00107\text{kg}/\text{m}\cdot\text{sec}$ , 기포상승속도( $U_b$ )는 반응조 중심에서 측정된 속도  $0.0293\text{m}/\text{sec}$ , 입자 직경범위는  $180\text{--}4,000\mu\text{m}$ 의 측정치를 적용하였으며, 입자의 직경에 따라 충돌효율은 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 각각의 방정식에 따라 다양한 차이를 나타내고 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 플록 입자의 성자에 따라 기포와의 충돌효율은 더 큰 쪽으로 차이를 나타내게 되며, 여러 모델간에도 충돌효율의 예측결과가 크게 차이를 보이고 있다.

#### 4.3.3. 입자의 제거효율

회분식 부상분리공정에서 입자의 부상효율(Ralston, 1999)은 다음의 식 6과 같이 나타낼 수 있으며 앞에서 살펴본 모델들의 결과를 토대로 시

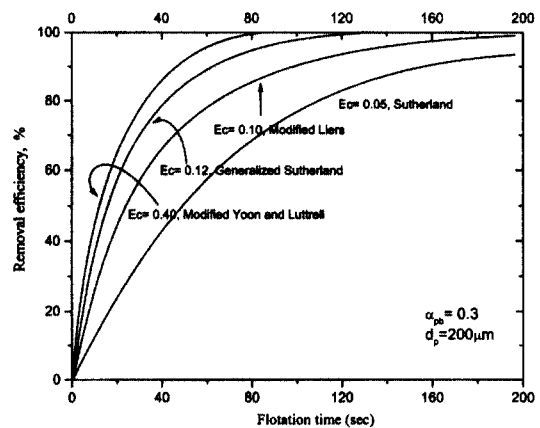


Fig. 7. Removal efficiency depending upon flotation time predicted by various types of models.

간에 따라 부상되는 입자의 제거효율은 다음의 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있었다.

$$R = 1 - \exp\left(-\frac{t^3 GE_p E_A E_b}{2d_p V}\right) \quad (\text{식 } 6)$$

#### 4.4. 입자 침착에 의한 접촉각

입자의 직경의 변화에 각 방정식의 접촉각을 계산한 결과 Fig. 8에서와 같이, Sutherland's model을 적용한 경우  $89.93^\circ$ , Liers's model  $89.98^\circ$ , Yoon and Luttrell's model  $89.99^\circ$ 를 나타내고 있으며, 본 실험

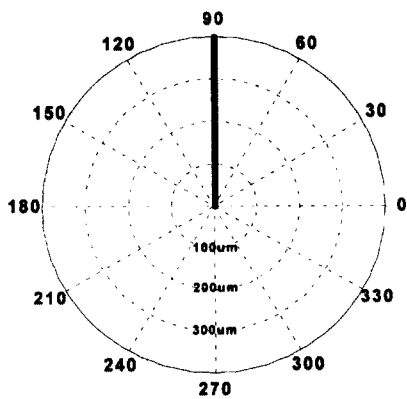
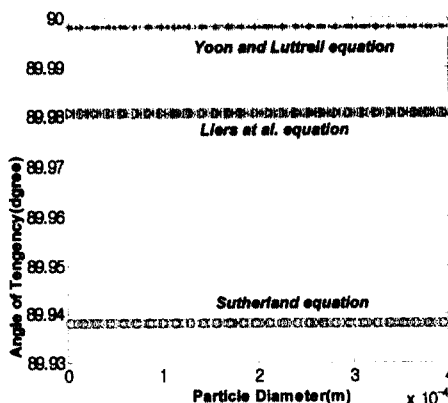


Fig. 8. The angle of tangency.



에서 기포의 직경이 50 $\mu\text{m}$ 로 입자의 직경에 비해 아주 작기 때문에 각 방정식들의 접촉각에 큰 영향을 미치지 않았으며, 상대적으로 입자의 직경이 크기 때문에 입자 충돌에 Positive effect를 가져오며, 접촉각이 수직적으로 분포하게 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

DAF에서 강우에 의한 무기성 입자의 분리특성을 살펴보았으며 실제로 강우가 있는 시기에는 DAF의 수처리효율이 다소 떨어지는 현상을 확인하였다. 이 시기에 유입되는 무기성 입자의 효과적인 제거를 위해서 본 연구에서는 무기성 고형입자에 대한 충돌효율과 부상분리 특성을 유체역학적 관점에서 살펴보았다.

무기성 입자의 충돌효율은 주변 유체의 흐름과 관성력 등의 몇가지 유체역학적 조건이 변화되는 상황에서 여러 가지 모델들에 의하여 얻은 예측결과는 플록 입경의 증가에 따라 충돌효율도 증가하는 유사한 경향을 보였으나, 그 증가정도에 있어 상당한 차이를 나타내었으며 처리대상인 무기성 입자의 물리적 성질과 반응조내의 유체역학적 조건에 따라 보다 정확한 모델의 선정이 요구되어진다.

#### 사사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-

000-01276-0)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Collins, G.L. and Jameson, J.G. (1976) *Chem. Eng. Sci.*, **31**, pp. 985.
- Dai, Z., Dukhin, S., Fornasiero, D., and Ralston, J. (1998) The Inertial Hydrodynamic Interaction of Particles and Rising Bubbles with Mobile Surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, **197**, pp. 275-292.
- Dobby, G.S. and Finch, J.A. (1986) *J. Colloid Interface Sci.* **109**, pp. 493.
- Fukushi, K., Tambo, N. and Matsui, Y. (1995) A Kinetic Model for Dissolved Air Flotation in Water and Wastewater Treatment, *Water Science and Technology*, **31**(3-4), pp. 37-47.
- Han, M.Y. and Kim, W. (2000) Modeling of Sedimentation and Dissolved Air Flotation for Cryptosporidium Removal, Proceedings of the 4th International Confer. on Flotation, Sec. V.
- Leppinen, D.M. (1999) Trajectory Analysis and Collision Efficiency during Microbubble Flotation, *Journal of Colloid and Interface Science*, **212**, pp. 431-442.
- Liers, S., Baeyens, J., and Mochtar I. (1996) Modeling Dissolved Air Flotation, *Water Environment Research*, **68**(6) pp. 1061-1075.
- Luttrell, G.H. and Yoon, R.H. (1992) *J. Colloid Interface Sci.* **154**, pp. 129.
- Malley, J.P. and Edzwald, J.K., (1991) Conceptual Model for Dissolved-Air Flotation in Drinking Water Treatment, *Journal of Water SRT-AQUA*, **40**(1), pp. 7-17
- Ralston, J., and Dukhin, S.S. (1999) The Interaction between

- Particles and Bubbles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 151, pp. 3-14.
- Reay, D., and Ratcliff, G.A. (1973) Removal of Fine Particles with Spherical Air Bubbles, *Journal of Chem. Eng.*, 51(178), pp. 206.
- Schulze, H. (1992) *J., Adv. Colloid Interface Sci.* 40, pp. 283.
- Yoon, R.H., Jameson, J., Luttrell, G.H. (1989), *J. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 5, pp. 101-122.