

## 전해부상법에서 미세기포와 입자의 기초특성 연구를 통한 제거효율

# A Removal Efficiency from Fundamental Characteristics of Microbubbles and Particles in Electroflotation

독고석<sup>1</sup> · 김원태<sup>2</sup> · 한무영<sup>2\*</sup> · 김미경<sup>2</sup>

Dockko, Seok<sup>1</sup> · Kim, Wontae<sup>2</sup> · Han, Mooyoung<sup>2\*</sup> · Kim, Mikyung<sup>2</sup>

1 단국대학교 토목환경공학과

2 서울대학교 지구환경시스템공학부

(2004년 11월 19일 논문 접수; 2005년 3월 15일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

Recently, water treatment methods utilizing microbubbles such as DAF and EF are gaining interest and being studied. Current study is focused on the fundamental research of electroflotation by examining the characteristics of microbubbles and particles. The objects of this research consist of two things; (1) theoretical modeling of microbubble-particle collision, (2) the experimental investigation of removal efficiency of turbidity in electroflotation. From investigation, the mechanism of electroflotation can be explained not only by the characteristics of microbubbles and particles but also the chemistry of aluminum dissolved from aluminum electrode during the electroflotation experiment.

**Key words:** electroflotation, microbubble, zeta potential, collision efficiency factor, trajectory analysis

**주제어:** 전해부상, 미세기포, 제타전위, 충돌효율계수

## 1. 서 론

물 속의 입자를 분리하는 응집, 침전 (또는 부상) 공정은 대부분의 수처리 공정에서 사용되고 있다. 가장 처리 수량이 많은 곳은 정수장으로서 이곳에서 사용되는 응집 침전 공정은 다량의 응집제를 주입하므로 약품비나 전기비등 유지관리비가 가장 많이 들고 운전이 까다롭다. 최근 들어 중수도의 필요성이 대두

됨에 따라 하수처리장의 2차처리 유출수를 처리하기 위한 경제적 방법의 개발이 필요하다. 또한, 처리수량은 적지만 적용 사례가 많은 분야인 공장폐수처리나 광물의 선광 분야에도 보다 경제적이면서 운전이 용이한 기술의 개발이나 대체가 절실히 요구된다. 다른 예로서 유수 분리장치(Oil Separator)에도 미세기포를 이용한 공정의 적용이 가능한데 보다 저비용, 고효율의 공정개발이 필요하다.

또한 호수나 해역과 같은 자연수계에서 발생하는

\*Corresponding author Tel: +82-2-880-7375, FAX: +82-2-880-7376, E-mail: myhan@snu.ac.kr (Han, M.Y.)

적조의 제거대책이 절실히 요구되고 있다. 최근 들어 주기적으로 발생하는 적조에 대하여 현재까지는 수표면에 황토입자를 뿌리는 방법이 주로 사용되어 왔지만 그 효과는 회의적이다. 그리고 넓은 지역에 화학 약품을 투여하고 교반하는 인위적 방법도 있는데, 이는 비용뿐만 아니라 수생 생태계에 미치는 영향 때문에 채택에 제한이 있다. 따라서 보다 효과적으로 적조 피해를 줄일 수 있는 기술개발이 요구된다.

본 연구는 운전이 용이하고 고효율 처리가 가능하다는 장점을 가진 전해부상법이 이런 상황을 해결할 수 있는 기술로의 발전을 위한 초석으로 진행되었으며, 목적은 다음과 같다. 미세기포를 발생시키는 전해부상법에서, 1) 모델링 연구를 통해 전해부상법의 메카니즘을 이론적으로 살펴보고, 2) 미세기포와 입자, 그리고 전극의 기초 특성 연구를 통하여 제거 효율을 분석한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 모델링

일반적으로 입자와 미세기포의 충돌 특성에 관한 연구는 DAF에서 많이 진행되어왔다. Tambo et al. (1985)은 난류상태하에서 미세기포와 플록의 입자개수모델에 기초로 한 kinetic model(PBT model)을 연구하였고, Malley and Edzwald(1990, 1991)는 층류상태하에서 적용 가능한 개념적 모델(SCC model)을 제시하였다. 또한 국내에서는 Dockko and Han(1997)에 의해 입자와 미세기포 간의 충돌/부착의 정도를 알기 위하여 Han and Lawler(1991)가 속도차 침전에서 사용한 충돌개념인 충돌효율계수( $\alpha_{DS}$ )를 기초로 하여 충돌 특성을 규명한 바가 있다. 본 연구는 Dockko and Han(1997)에 의해 제시된 모델을 수정/보완하여 전해부상에서의 미세기포와 입자의 충돌특성을 규명하고자 한다.

#### 2.1.1. 충돌효율계수( $\alpha_{bp}$ )

본 연구에서는 입자와 미세기포간의 충돌/부착의 정도를 알기 위하여 Han and Lawler(1991)가 속도차 침전에서 사용한 충돌개념인 충돌효율계수( $\alpha_{DS}$ )를 기초로 하여 적용시켰다. 입자간 충돌이론 적용이 가능한 것은 전해부상법에서 사용되는 미세기포는 수십 마이크로에 불과하므로 입자와 같이 거동한다는 연구

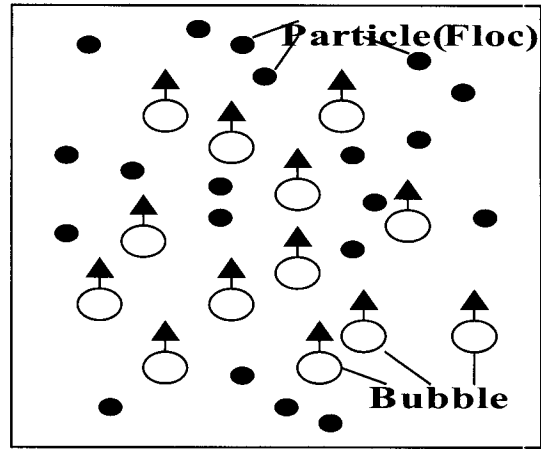


Fig. 1. Particle and Bubble in the reactor.

결과에 따른 것이다(Schulze, 1984).

따라서 본 연구에서 사용된 충돌효율계수( $\alpha_{bp}$ )는 근본적으로 Han and Lawler(1991)의 충돌이론에서 비롯된 개념으로서 다음과 같다.

Fig. 1과 같이 충분한 미세기포가 발생되는 원형 부상조의 단면을 절단하여, 부상하는 미세기포와 침강하는 구형입자들과의 충돌을 가정해 본다. 이때 무수히 많은 미세기포들은 연속하방에서 직선으로 상승하면서 입자와  $N$ 회 충돌한다고 가정하면, 이때 충돌한 입자는 미세기포의 일부가 됨으로서 미세기포 개념이 되지만, 만약 충돌하지 않고 빗겨나가면 새로운 입자의 개념으로 미세기포와 새로운 충돌이 예상된다. 그렇다면 Fig. 1와 같이 미세기포의 반지름을  $A_B$ , 입자의 반지름을  $A_P$ 라고 할 때 충돌효율계수( $\alpha_{bp}$ )의 정의는 Eq. 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{bp} = \frac{N\pi X_c^2}{N\pi(A_B + A_P)^2} = \frac{X_c^2}{(A_B + A_P)^2} \quad \text{Eq. 1}$$

여기서  $N$ 은 입자와 미세기포의 예상충돌회수이고,  $X_c$ 는 미세기포가 입자와 충돌하지 않고 빗겨가는 최대한의 수평거리로서 임계수평 이탈이격거리이다.

Fig. 2와 같이 미세기포와 입자의 충돌효율계수( $\alpha_{bp}$ )는 미세기포와 입자의 반지름의 합이 만드는 원면적에 대한  $X_c$ 가 만드는 원면적에 대한 비율로 정의된다. 이 정의에 의하면  $\alpha_{bp}$ 는 0~1 사이의 값을 지니며 변화한다. 본 연구에서는 미세기포와 입자간의 충

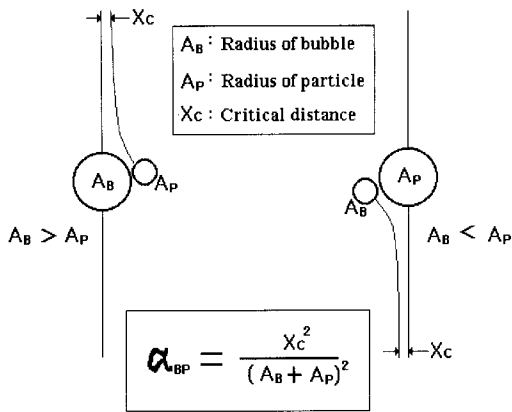


Fig. 2. Definition of Collision Efficiency Factor( $\alpha_{bp}$ ).

돌에 영향을 미치는 변수들에 대한 충돌 가능성을 충돌효율계수( $\alpha_{bp}$ )를 사용하여 나타내었다.

상기 Eq. 1과 유사하게 충돌효율을 계산하려고 했던 연구가 Fonda and Herne(1960)에 의하여 있었으나 그는 입자의 크기에 의한 영향을 고려하지 않았다. 또한 LaFrance et al.(1995)와 Okada et al.(1990) 등도 충돌효율을 나타내기 위하여 유사한 충돌개념을 도입하였으나, 임계수평 이격거리( $X_c$ )의 설정에  $A_P$ 에 대한 고려가 없었고 수리학적 방정식의 적용에도 고전의 식을 이용하였다. 그러나 본 연구에서는 Jeffrey and Onishi의 최신 수리동역학 식을 사용하였다.

2.1.2. 입력변수의 요약

본 모델링에서 사용된 변수들을 정리한 것이 Table 1과 Table 2이다.

Table 1. Summary of used input factor

변수	입력값	변수내용	단위	인용근거문헌
A1	5~100	입자의 반경	$\mu\text{m}$	Tambo (1985) 등
A2	5~100	미세기포의 반경	$\mu\text{m}$	Edzwald (1993) 등
DL	0.05~1.9	미세기포반경/입자반경	무차원	-
DELRO1	1.01~2.65	입자의 비중	$\text{g}/\text{cm}^3$	佐藤敦久 (1996) 등
DELRO2	0.000083	미세기포의 비중	$\text{g}/\text{cm}^3$	Edzwald (1993) 등
PSINV	-100~+50	입자의 제타전위	mV	Tambo (1985) 및 본 실험
BSINV	-100~+50	미세기포의 제타전위	mV	Tambo (1985) 및 본 실험
STION	0.00001~0.1	이온화 세기	mole/L	Pankow (1991)
HAMAKER	3.98E-14	HAMAKER 상수	erg	Schulze (1984)
PI	3.141592	원주율	무차원	-
GRAV	980	중력가속도	$\text{cm}/\text{s}^2$	Schulze (1984)
VISC	0.01	점성계수	$\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$	Schulze (1984)
T	288	절대온도	K	-
bgnY	20	초기 수직 이격 거리	무차원	Han (1989)
E	78.38	permittivity	무차원	Hunter (1981)
E0	8.85E-12	진공상태의 permittivity	$\text{C}/\text{V} \cdot \text{M}$	Hunter (1981)
AVO	6.02E23	AVOGADRO 수	1/mole	Hunter (1981)
BOLZ	1.3805E-23	BOLTZMANN 상수	$\text{J}/\text{K} \cdot \text{M}$	Hunter (1981)

Table 2. Schedule of Modeling for Electroflotation

	미세기포		입자		용액	
	크기( $\mu\text{m}$ )	제타전위(mV)	크기( $\mu\text{m}$ )	제타전위(mV)	비중	이온화세기(M)
1. 미세기포크기	5-100	15	5, 50, 100	-45, 40	2	0.002
2. 미세기포제타전위	35	-100-50	5, 50, 100	-45, 0, 40	2	0.002
3. 입자크기	35	15	5-100	-45, 40	2	0.002
4. 입자제타전위	35	15	5, 50, 100	-100-50	2	0.002
5. 입자밀도	35	15	5, 50, 100	-45, 40	1-3	0.002
6. 이온화세기	35	15	5, 50, 100	-45, 40	2	0.00001-0.1

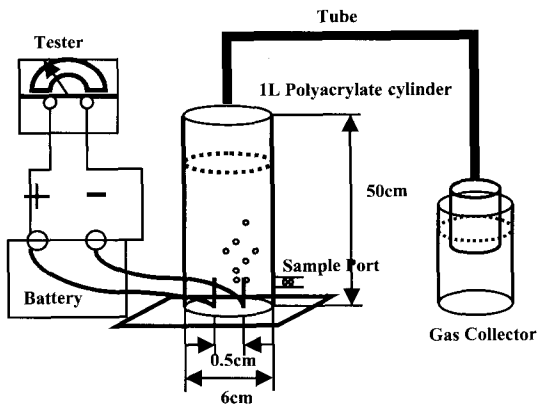


Fig. 3. Reactor for generating micro bubbles by electrolysis.

## 2.2. 미세기포와 입자, 그리고 전극의 기초 특성 연구를 통하여 제거 효율 분석

실험에서 사용된 반응조는 부피 1L, 직경 6cm, 그리고 높이 50cm의 아크릴 소재의 원기둥 반응조이다. 발생장치와 반응조의 구성은 Fig. 3과 같다. 반응조 안에 수용액을 담고 그 속에 두 장의 직사각형 전극을 수직으로 설치한다. 전극은 금속을 사용하며, 대부분의 실험에서 알루미늄을 사용하였다. 외부에서 직류전원을 걸어주면 음전극 판에서는 수소기체로 이루어진 미세 기포가 발생하여 상부로 이동한다. 그리고, 양전극 판에서는 금속이온이 용출된다. 이 때 공급하는 전압은 50V를 기본으로 한다. 반응조에 대한 내용을 Table 3에 요약하였다.

전류의 세기와 전압은 회로에 직렬과 병렬로 연결하여 측정되었으며, 발생하는 수소기포의 양은 gas collector를 통해 포집하여 부피를 측정하였다.

이번 실험은 미세기포와 입자의 제타전위에 영향을 줄 수 있는 인자를 선택하여 이것이 입자의 충돌/제거에 어떤 영향을 주는지를 탁도 제거율로서 알아보았다. 미세기포와 입자의 제타전위에 영향을 줄 것으로 예상되는 인자로는 pH, 이온화세기, 온도, 전압, 시간, 알루미늄 이온 주입량, 용액의 종류가 있

다. 여기서는 입자의 크기와 제타전위를 바꾸기 위한 전처리과정이 없다는 것이 특징이다. 이번 실험은 단순히 Kaoline 입자와 표준 시료가 섞인 탁도 50NTU 정도의 시료를 사용하였다.

실험 결과는 탁도 제거율로 평가될 것이며, 미세기포와 입자의 제타전위와 반응 전후의 pH 변화, 그리고 수소기포 발생량과 알루미늄 이온의 용출량을 대표하는 값인 전류의 세기로서 탁도 제거율의 이유를 규명하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1. 모델링

#### 3.1.1. 기포 크기의 영향

Fig. 4는 다양한 크기의 미세기포가 입자와의 충돌/부착할 때에 미치는 영향을 나타낸 모델링 결과이다. 미세기포의 크기는 5~100 $\mu$ m로 변화시켰고 미세기포의 제타전위, 입자의 크기, 제타전위, 비중, 이온화 세기는 일정한 값으로 고정하여 수행하였다. Fig. 4의 가로축은 미세기포의 크기변화를, 세로축은  $\alpha_{fp}$ 를 로그좌표로 나타내었다.

그림에서 모델링 결과를 살펴보면, 크게 두 가지의 경향으로 나누어 볼 수 있다. 입자의 제타가 양일 경우 미세기포의 전위가 같은 전하를 띄므로 충돌이 일어나지 않는 경우와, 입자의 제타가 음일 경우 미세기포의 전위와 반대의 전하를 띄므로 좋은 충돌 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 이것은 전기적으로 반대의 전하를 띤 입자들은 서로를 당기는 성질을 가지고 있고 같은 전하의 입자들끼리는 반발한다는 전기적 특성 때문이다. 입자의 크기를 변화시켰을 경우에는, 5 $\mu$ m와 같이 아주 작은 입자의 경우에는 기포의 크기가 상승함에 따라 충돌효율이 급격히 떨어진다. 이것은 실제로 미세기포로 작은 입자를 제거할 경우에는 아주 작은 크기의 기포를 사용해야 한다는 것이다. 하지만 이런 작은 미세기포를 제조하는 것은 아

Table 3. Summary for Reactor

	Material	Shape	Diam.(mm)	Height(mm)	Electrode			
					Material Distance(mm)	Seperated	Area	DC Voltage(V)
Reactor	polyacrylate	cylinder	6	50	Metal(Al)	5	1mm×5mm	50

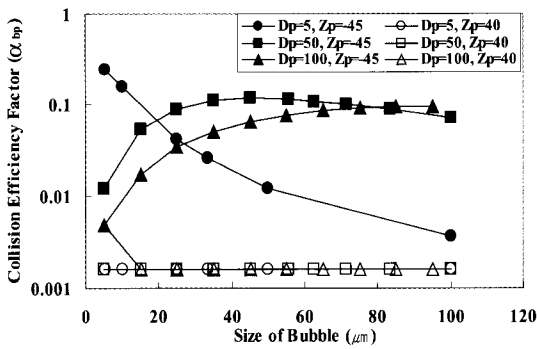


Fig. 4. Effect of Size of Bubble.

주 어려운 일이다. 그래서 DAF에서는 이 방법으로 제조된 미세기포가 50~80μm 정도이므로 입자물질들에게 어느 정도 전처리를 가해 크기를 크게 하여 처리한다. 50μm 정도의 중간크기의 입자물질은 30~50μm 정도의 기포에 의해 제거가 잘되는 것으로 나타나 일반적으로 전해부상법에서 발생하는 기포의 크기인 약 35μm의 경우 50μm의 입자와 같이 미세기포의 비슷한 크기의 입자에서 보다 좋은 충돌효율을 기대할 수 있다. 100μm 정도의 큰 기포들은 80μm 이상의 큰 입자들에 대해 좋은 충돌 효율을 보여 주고 있다. 이들 결과를 종합해 보면, 미세기포와 비슷한 크기의 입자들이 좋은 충돌효율계수 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 3.1.2. 입자 크기의 영향

Fig. 5는 다양한 크기의 입자가 미세기포와 충돌/부착할 때 미치는 영향을 나타낸 모델링 결과이다. 입자의 크기는 5~100μm로 변화시켰고 미세기포의 크기, 미세기포의 제타전위, 입자의 제타전위, 비중, 이온화 세기는 일정한 값으로 고정하여 수행하였다. Fig. 5의 가로축은 입자의 크기를, 세로축은  $\alpha_{bp}$ 를 로그좌표로 나타내었다.

이번 모델링에서도 크게 두 가지 경향이 나타나는데, 입자의 제타전위가 양의 값을 가진 경우는 거의 충돌을 하지 않는 것으로 나타났으며, 음의 제타전위를 갖는 입자의 경우는 입자의 크기에 따라 여러 가지 충돌효율계수를 나타내었다. 밀도가 2인 카올린의 경우라면, 미세기포의 크기가 비슷한 크기에서 최상의 충돌효율계수를 가지며 입자의 크기가 커질수록 충돌효율계수가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

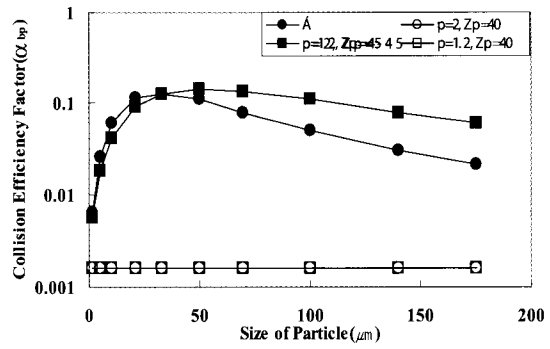


Fig. 5. Effect of Size of Particle.

만약 밀도가 2이면서 입자의 크기가 크다면 미세기포를 이용한 부상보다는 오히려 침전쪽으로 제거하는 것이 더 현명하다는 것을 알 수 있다. 그러나 밀도가 1.2인 조류와 같은 경우라면, 미세기포의 크기보다 조금 큰 입자에서 가장 좋은 충돌효율계수를 가진다. 하지만 밀도가 2인 경우와는 달리 충돌효율계수가 입자의 크기가 상승한다고 하여도 그 감소율이 매우 더딘 것을 알 수 있다. 따라서 밀도가 낮은 경우는 어느 정도 큰 플러크를 형성시키더라도 만족할만한 충돌제거 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 사용되는 기체가 공기로 다르지만 DAF에서도 밀도가 낮은 조류와 같은 물질이 보다 쉽게 제거된다고 알려져 있다.

### 3.1.3. 기포 제타의 영향

미세기포의 제타전위가 입자와의 충돌에 미치는 영향을 나타낸 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다. 모델링에 사용된 조건은 Table 2에 나타내었으며, 미세기포의 제타전위는 -100~50mV로 변화시켰다. Fig. 6과 Fig. 7의 가로축은 미세기포의 제타전위를, 세로축은  $\alpha_{bp}$ 를 로그좌표로 나타내었다. 두 그림을 살펴보면 입자의 제타전위에 따라 세 가지 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 입자의 제타전위가 음일 경우, 미세기포의 제타전위가 음에서 양으로 변화할 때 아주 급격하게 충돌효율계수가 상승한다. 하지만, 양일 경우는 미세기포의 제타전위가 양에서 음으로 변화할 때 아주 급격하게 충돌효율계수가 상승한다. 그리고 마지막으로 0일 경우는 미세기포의 제타전위와는 무관하게 동일한 충돌효율계수를 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 입자의 제타가 0일 경우는 미세기포의 제타전위와는 상

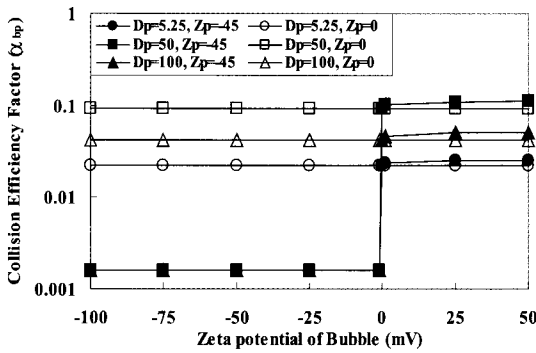


Fig. 6. Effect of Zeta potential of Bubble ( $Z_p=-45, 0$ ).

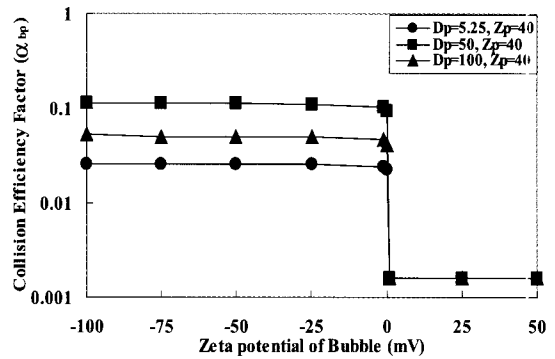


Fig. 7. Effect of Zeta potential of Bubble ( $Z_p=40$ ).

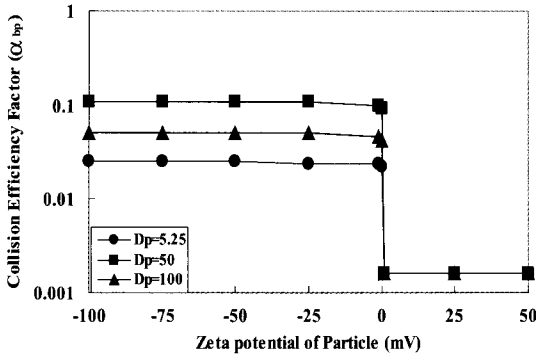


Fig. 8. Effect of Zeta potential of Particle.

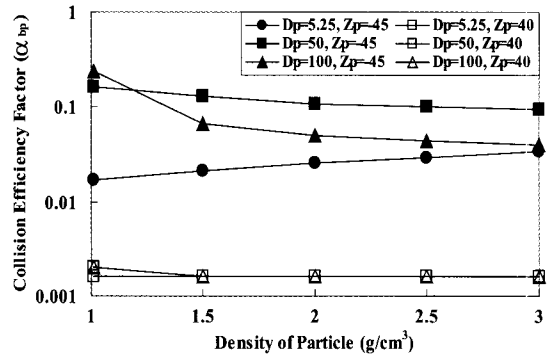


Fig. 9. Effect of Density of Particle.

관없이 정전기적 인력 반발력이 나타나지 않기 때문이다. 하지만 그 값은 서로 반대의 전하를 가진 입자와 미세기포가 충돌할 때의 충돌효율계수와 얼마 차이를 보이지 않는다. 따라서 미세기포의 제타전위는 입자의 제타전위와 반대가 되거나 0일 경우 좋은 충돌효율을 기대할 수 있을 것이다. 또한 입자의 크기에 대해서는 앞서 살펴본 바대로 미세기포의 크기가  $35\mu m$ 로 고정되어 있다면, 50, 100,  $5\mu m$  순의 충돌효율계수를 가진다.

#### 3.1.4. 입자 제타의 영향

입자의 제타전위가 미세기포와의 충돌에 미치는 영향을 나타낸 것이 Fig. 8이다. 모델링에 사용된 조건은 Table 2에 나타내었으며, 입자의 제타전위는  $-100 \sim 50mV$ 로 변화시켰다. Fig. 8의 가로축은 미세기포의 제타전위를, 세로축은 bp를 로그좌표로 나타내었다. 그림을 살펴보면, 미세기포의 제타전위가 양으로 설정되어 있으므로 입자의 제타전위가 양에서 음으로 바뀔 때 급격하게 증가한다. 이것도 미세기포

의 제타전위의 영향에서도 나타났듯이 입자들의 정전기적 성질 때문이다. 따라서 양의 전하를 띤 미세기포와의 충돌에는 음의 전하를 띤 입자가 좋으며, 이것은 이 공정이 입자의 전처리가 필요치 않다는 것을 의미하기도 한다. 또한 입자의 변화에 있어서도 미세기포와 비슷한 크기가 가장 좋은 충돌효율계수를 가지며, 미세기포에 비해 큰 것, 작은 것 순으로 높은 충돌효율계수를 가진다.

#### 3.1.5. 입자 밀도의 영향

일반적으로 미세기포를 이용하는 부상법은 비중이 낮아 자연적인 침강으로 제거가 곤란한 물질인 조류, 색도, humic 물질 등의 성분을 제거하는데 이용되고 있다. 입자의 비중은 알루미늄 수산화물의 결정체 1.01, 조류 플록 1.2, Kaoline 플록 2.0,  $SiO_2$  입자 2.65의 비중을 지니고 있다. Fig. 9는 입자의 비중이 변화하는 동안 미세기포의 크기가  $35\mu m$ 이고 입자의 크기가 5, 50,  $100\mu m$ 의 충돌효율을 나타내었다. 가로축은 입자의 비중을 1.01~3.0까지 변화시켰으며, 세

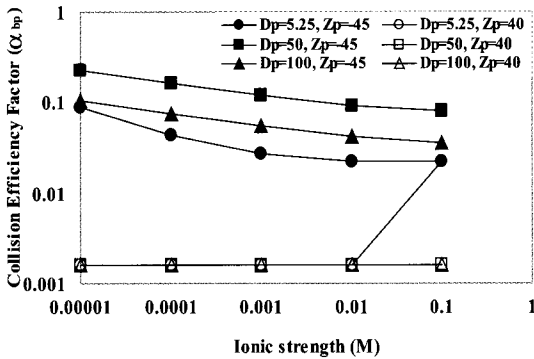


Fig. 10. Effect of Ionic strength.

로축은  $\alpha_{cp}$  로 로그좌표로 나타내었다.

그림의 계산결과를 살펴보면, 위의 경우에서와 마찬가지로 크게 두 종류의 경향을 알 수 있다. 즉 입자와 미세기포의 제타전위가 반대일 경우는 높은 충돌 효율계수를 기대할 수 있으며, 같은 경우는 충돌을 기대할 수 없다. 입자의 크기가  $5\mu\text{m}$ 로 작을 경우는 입자의 밀도가 점점 증가하면서 충돌효율계수가 천천히 증가한다. 입자의 크기가  $50\mu\text{m}$ 일 경우는 아주 낮은 밀도의 입자를 제외하고는 가장 높은 충돌효율계수를 가지며 입자의 밀도가 상승함에 따라 점점 충돌 효율계수가 감소한다. 입자의 크기가  $100\mu\text{m}$ 인 경우는 아주 낮은 밀도에서 가장 좋은 충돌효율계수를 갖지만 입자의 밀도가 증가함에 따라 충돌효율계수가 급격히 감소한다. 따라서 밀도가 매우 낮은 경우는 입자의 크기를 키울수록 좋은 충돌효율을 가질 수 있으며, 그 외의 밀도에서는 미세기포와 비슷한 크기의 입자가 높은 충돌효율을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

### 3.1.6. 이온화 세기의 영향

Fig. 10은 수중의 이온화 세기가  $0.00001\sim 0.1\text{M}$ 로 변화하는 동안 입자의 크기를  $5, 50, 100\mu\text{m}$ 로 변화시키고 이들 각각에 대해 제타전위를  $-45\text{mV}$ 와  $40\text{mV}$ 로 바꾸어 충돌효율계수를 구한 결과이다. 이 결과를 살펴보면, 입자의 제타전위가 양일 경우는 입자의 크기가  $5.25\mu\text{m}$ 일 경우를 제외하고는 입자의 크기와는 상관없이 거의 충돌이 일어나지 않는 것으로 나타났다.  $5.25\mu\text{m}$ 일 경우는 이온화 세기가  $0.1\text{M}$ 과 같이 아주 강하면 충돌효율계수가 급격히 증가한다. 이것은 입자의 크기가 작을 경우는 브라운 운동의 영향을 받

아 이온화 세기가 강하면 충돌효율이 상승한다. 그리고 입자의 제타전위가 음일 경우는 이온화 세기가 낮을수록 충돌효율계수가 증가한다. 이것은 앞서 살펴본 입자와 미세기포의 제타전위 둘 다 양일 경우에 작은 입자의 경우 이온화 세기가 증가하면 충돌효율이 증가하는 것과 반대의 결과이다. 그 이유로는 일반적으로 같은 제타전위를 갖는 입자들은 전기적으로 반발력을 가지고 있어 충돌/응집이 일어나지 않지만 이온화 세기가 강해 전기 이중층의 두께가 얇아져 충돌의 가능성이 높아지는 것이고, 반대의 제타전위일 경우는 이온화 세기가 작아질수록 전기 이중층의 두께가 두꺼워져서 오히려 충돌에 좋은 방향으로 작용하여 높은 충돌효율계수를 갖는다.

## 3.2. 미세기포와 입자, 그리고 전극의 기초 특성 연구를 통하여 제거 효율 분석

### 3.2.1. pH의 영향

pH 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, pH 8과 9에서 탁도 제거율이 급격히 상승하는 것을 알 수 있다. 그리고 pH가 증가하면 다시 제거율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과의 이유는 pH 변화와 미세기포와 입자의 제타전위를 통해 쉽게 알 수 있다. 미세기포와 입자의 제타전위의 변화를 살펴볼 때, 반응 후의 제타전위의 값이 pH 변화에 따른 일반적인 성향(하향성)을 따르지 않고 pH 6~8 부근의 값이 불규칙한 값을 갖는다. 이것은 양전극에서 발생한 알루미늄이 관여를 하였기 때문이며, 약 pH 5~9에서 불용성의 알루미늄 수산화물을 생성하는 것을 알 수 있다. 이 물질이 미세기포와 입자에 흡착되어 제타전위에 상당히 많은 영향을 미친 것으로 판단된다. pH 변화를 살펴보면, 초기 pH에 상관없이 최종 pH는 8의 값에 가까이 간다는 것이다. Fig. 11에서 보면 pH 8 근처에서 알루미늄의 제타가 0에 가까이 간다는 것을 알 수 있다.

이로서 미세기포와 입자의 제타전위와 pH 변화 양상을 살펴볼 때, 제타전위가 0에 가까운 알루미늄 수산화물( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )이 탁도물질 제거에 아주 중요한 역할을 담당한다는 것을 알 수 있다. pH 6~8에서는 미세기포의 제타전위가 약 0의 값을 가지지만 제거율에 있어서는 만족할 만한 값을 가지지 못한다. 이것은 모델링의 결과에서 나타났듯이 단순히 미세기포와 입

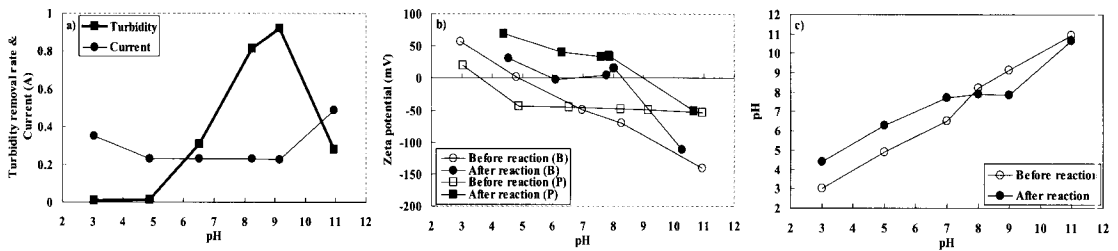


Fig. 11. Effect of pH.

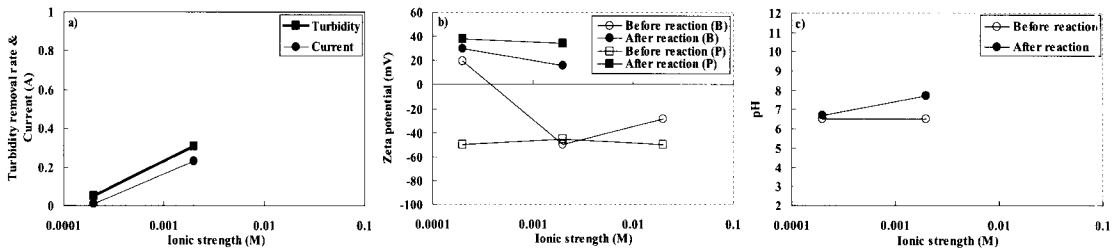


Fig. 12. Effect of ionic strength.

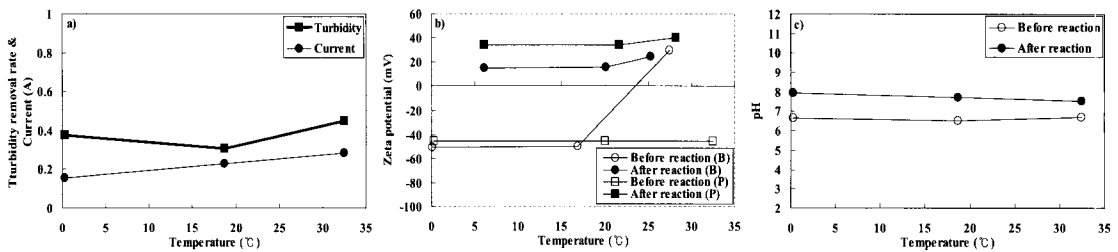


Fig. 13. Effect of temperature.

자의 제타전위가 충돌조건, 즉 서로의 전하가 다르다거나 한쪽이 0일 때를 만족한다하더라도 크기 조건이 만족되지 않으면 충돌/제거가 일어나지 않는다는 것을 나타내어 준 결과라 할 수 있다. pH 8~9에서는 미세기포와 입자 둘 다 양의 전하를 가지면서도 좋은 제거 효율을 가지는 것은 미세기포와 입자를 붙여주는 접착제 역할을 하는 알루미늄 수산화물이 있기 때문이다.

### 3.2.2. 이온화 세기의 영향

이온화 세기의 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, 충돌/제거 가능한 영역의 pH에서 동일한 제타전위 조건을 가지고 있다면 이온화 세기의 변화로 전류의 세기의 변화가 일어나고 이것이 탁도 제거율에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 제거 가능한 영역에서는 제타전위보다는 알루미늄의 용출량

과 수소기포의 발생량이 제거에 많은 영향을 미친다.

### 3.2.3. 온도의 영향

온도의 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, 충돌/제거 가능한 영역의 pH에서 동일한 제타전위 조건을 가지고 있다면 이온화 세기의 변화로 전류의 세기의 변화가 일어나고 이것이 탁도 제거율에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 제거 가능한 영역에서는 제타전위보다는 알루미늄의 용출량과 수소기포의 발생량이 제거에 많은 영향을 미친다.

### 3.2.4. 응집제 주입의 영향

응집제 주입의 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, pH 9에서 응집제를 주입하지 않고 92%의 탁도 제거율을 보여 응집제의 목적에 부합하게 주입한 후에 더욱 좋은 제거 효과를 기대하였지만 주입하지 않은 경우와 같은 92%의 제거율을 보였다. 이로



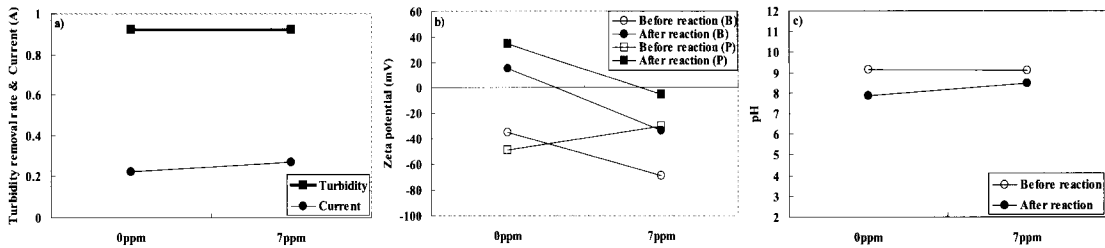


Fig. 14. Effect of injection of Alum.

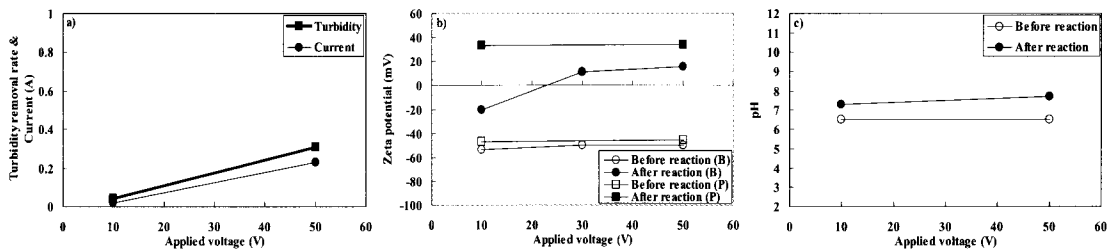


Fig. 15. Effect of applied voltage.

써 응집제는 큰 의미를 가지지 못하는 것으로 나타났다. 하지만 시간에 따른 영향을 알아보지 않았기 때문에 보다 빠르게 높은 제거율을 보일 수는 있다. 그리고 특정 pH에 대한 특성일 수 있다. 따라서 pH 7에 응집제를 같은 양 주입한 경우의 제거 특성을 살펴보았다. 이 결과를 Table 4에 나타내었다.

이 결과를 살펴보면, pH 9에서 나타난 결과와는 많은 차이를 보이고 있다. pH 9에서는 응집제 주입의 영향이 나타나지 않은 반면에 pH 7에서는 아주 많은 탁도 제거율 차이가 나타났기 때문이다. 이런 결과는 pH에 따라 알루미늄의 존재 형태나 특성이 달라 탁도 제거에 다르게 나타나는 것이다.

### 3.2.5. 전압(전류) 세기의 영향

전압의 세기에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, 충돌/제거 가능한 영역의 pH에서 동일한 제타전위 조건을 가지고 있다면 이온화 세기의 변화로 전류의 세기의 변화가 일어나고 이것이 탁도 제거율에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 제거 가능한 영

역에서는 제타전위보다는 알루미늄의 용출량과 수소기포의 발생량이 제거에 많은 영향을 미친다. 따라서 기포 발생량이 많은, 높은 전압이 제거에 좋다.

### 3.2.6. 전극 간격의 영향

전극의 간격의 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, 충돌/제거 가능한 영역의 pH에서 동일한 제타전위 조건을 가지고 있다면 이온화 세기의 변화로 전류의 세기의 변화가 일어나고 이것이 탁도 제거율에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 제거 가능한 영역에서는 제타전위보다는 알루미늄의 용출량과 수소기포의 발생량이 제거에 많은 영향을 미친다. 따라서 전극간격이 좁을수록 제거에는 좋다.

### 3.2.7. 전기분해 시간의 영향

시간의 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, 시간이 지남에 따라 제거가 계속해서 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 이처럼 제타전위도 2분 이후로는 거의 같은 값을 유지하며 pH도 조금씩 변화를 하며, 전류의 세기는 일정하게 유지됨에도 제거는 계

Table 4. Turbidity removal test due to the input of coagulant at pH=7

	pH before reaction	pH after reaction	Current (A)	Turbidity removal rate (%)
0 ppm	6.5	7.7	0.23	21
7 ppm	6.6	7.8	0.29	67

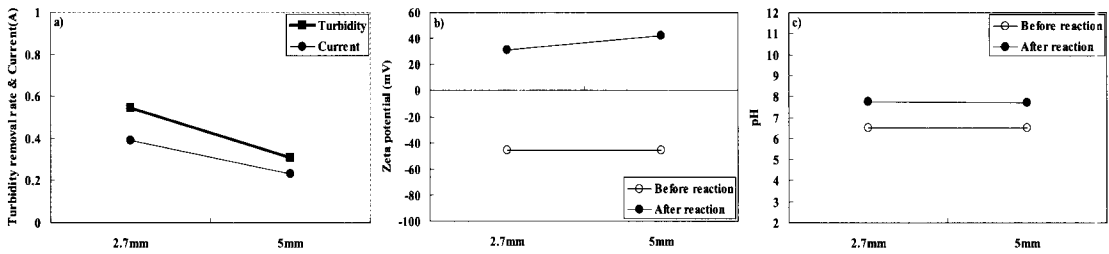


Fig. 16. Effect of distance between two electrodes.

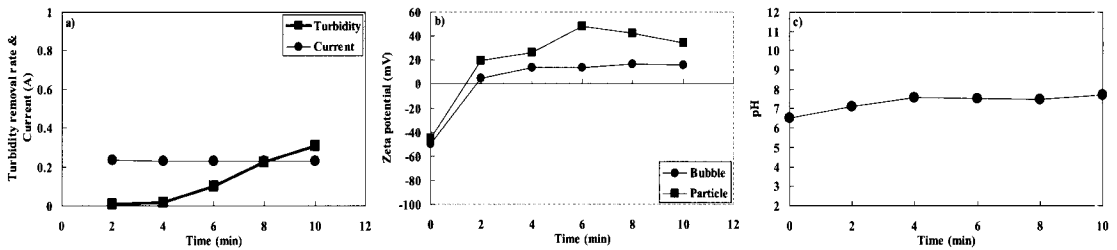


Fig. 17. Effect of reaction time.

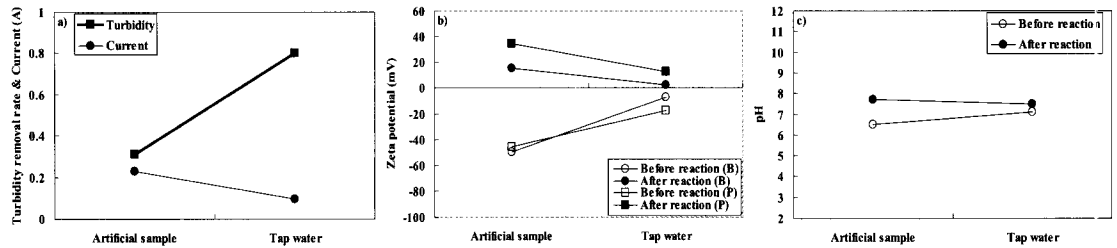


Fig. 18. Effect of species of solution.

속해서 이루어지고 있다는 것은 중요한 의미를 지닌다. 그것은 충돌과 제거에는 시간이 필요하다는 것이다. 따라서 시간을 줄여서 제거를 한다는 것은 아주 어려운 일이다. 그리고 이 공정의 장점은 전처리를 하지 않아 에너지와 부지 같은 것을 절약하는 것도 있지만, 전처리에 들어가는 시간을 절약한다는 것도 중요한 이익인 것이다.

### 3.2.8. 용액 종류의 영향

시료의 종류의 영향에 대한 탁도 제거 실험 결과를 살펴보면, 전류의 세기와는 무관하게 pH 변화와는 큰 관계없이 수돗물이 인공시료(표준시료)에 비해 높은 제거율을 보였다. 제타전위로 보아 수돗물이 제거에 좋은 조건을 가지고 있는 것은 사실이다. 하지만 위의 여러 조건의 결과를 비취 볼 때 그다지 신뢰성이

없는 근거로 이렇게 높은 제거율 차이를 설명해 주지 못한다. 그렇다면 제거율에 있어 가장 큰 이유로 판단되는 알루미늄 수산화물과의 관계를 가지고 설명할 수 있다. 앞서 수돗물에서 미세기포의 제타측정을 위해 수돗물 원수의 성상을 분석한 표를 제시하였다. 이것을 참고하면 일반적으로 자연수 내에는 경도를 나타내는 Ca, Mg 이온이라든지 Fe와 같은 이온들이 많이 녹아 있으며, 이런 이온들은 수중에서 수산화물로 존재하는 경우가 많다. 이렇게 2가의 양이온들의 수산화물이 알루미늄과 반응하여 알루미늄 수산화물을 만들고 2가의 양이온들은 수산화기를 잃어버린 다른 형태의 이온으로 존재하게 된다. 따라서 수돗물에는 인공시료와 같이 단지 물속에 녹아 있는 OH기 이외에 다량의 OH 공급원이 존재하고 이런 공급원

을 통하여 수산화물을 더 많이 생성시킴으로 인해 높은 제거율을 나타내는 것으로 사료된다. 이것을 뒷받침하는 근거로는 pH의 변화가 매우 더디다는 것이다. 즉 전기분해로 발생한 OH<sup>-</sup> 이온이 수중에서 단지 이온으로 존재하지 못하고 수산화물을 형성하고 있기 때문이다.

#### 4. 결 론

##### 4.1. 모델링 연구

1) 입자와 미세기포는 서로 비슷한 크기일 때 충돌 효율계수가 가장 높게 나왔다. 따라서 단순히 수 $\mu$ m의 입자들이 수십  $\mu$ m의 미세기포와 충돌하기 위해서는 어느 정도의 크기로 전처리를 해야 하는 것이 필요하다.

2) 입자와 미세기포의 제타전위의 값이 서로 상반될 경우에 충돌효율계수가 높게 나왔으며, 둘 중 하나의 입자라도 중화되어 있을 경우는 충돌효율계수가 전자와 비슷하게 높은 값을 나타내었다. 그러나 둘 다 같은 전하로 대전되어 있을 경우는 그 값이 거의 제로에 가깝다.

3) 입자의 밀도에 있어서는 어느 정도 큰 입자들일 경우는 밀도가 낮을수록 높은 충돌효율계수 값을 가졌고, 작은 입자들은 밀도가 높을수록 높은 충돌효율계수를 나타내었다.

4) 입자와 미세기포의 전하가 상반될 경우는 이온화 세기가 작을수록 전기 이중층의 두께가 두꺼워져 충돌효율계수가 높게 나오며, 같은 전하를 가지면 대부분이 충돌효율계수가 0에 가깝게 나오지만 입자가 작을 경우는 0.1M과 같은 강한 이온화 세기에서 높은 충돌효율계수를 가진다.

##### 4.2. 전기분해를 통한 제거 연구

1) 이론적으로는 제타전위가 서로 상반되는 값을 가질 경우는 좋은 제거 효과를 가져야 하나, 제거 실험에서는 좋은 결과가 나타나지 않았다. 그것은 기포 크기가 수십  $\mu$ m이고, 입자 크기가 수  $\mu$ m에 불과하므로 입자의 크기 영향으로 인해 제거 성향이 잘 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이를 살펴볼 때, 제거 효과는 정전기적 인력 반발력으로 인한 영향에 비해 입자 크기에 대한 영향이 조금 더 큰 것으로 사료된

다.

2) 알루미늄이 pH별로 주로 존재하는 형태가 다르며, 또 그에 따른 제타전위도 달라지므로 제거특성에 있어 pH의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 특히 pH 8영역에서는 알루미늄이 Al(OH)<sub>3</sub>로 존재하는 양이 많으며, 이 물질의 제타전위가 이 pH 영역에서는 거의 0에 가까우므로 입자들을 흡착시키는 가교작용을 통해 잘 제거된다.

3) 입자의 크기 연구에서는 원래 미세기포의 크기인 수십  $\mu$ m로는 수  $\mu$ m하는 카올린을 제거하기가 어렵다. 왜냐하면 이것은 충돌의 개념이 아닌 흡착의 개념이기 때문이다. 따라서 전처리를 통해서 입자의 크기를 키운다면 보다 높은 효율의 처리가 가능할 것으로 예상된다. 이것은 모델링에서의 예상을 잘 반영하는 것이라 사료된다.

4) 인공시료와 수돗물 사이에는 많은 제거 성능의 차이를 나타내었다. 그것은 실험 결과에서도 보듯이 제타전위값과 제타전위값이 변하는 기온이 중요한 역할을 한다. 그 시료의 입자가 중화 영역에 얼마나 오래 머무느냐가 관건이라 할 수 있다.

5) 탁도 제거에 영향을 미치는 인자로는 미세기포의 제타전위, 입자의 제타전위, pH, 전류의 세기(알루미늄의 용출량, 수소기포 발생량) 등이 있다. 여기서 다른 조건들이 탁도제거에 알맞은 조건을 만족시킨다면, 전류의 세기에 비례하여 탁도제거율이 증가한다. 이것은 전극 간격의 영향, 전극 면적의 영향, 전압(전류)의 세기의 영향 실험에서 이런 현상이 관측되었다.

6) 전해부상법에서의 충돌/제거 메카니즘은 미세기포, 입자, 알루미늄 세가지의 특성에 관한 조합으로 결정된다. 여기서 아주 중요한 요소는 알루미늄이다.

7) 시간의 제거 영향 분석에서 충돌/응집에는 시간이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 이는 실제로 여러 불리한 충돌조건에서도 시간이 지남에 따라 제거율이 조금씩 상승하는 것은 시간의 중요성을 나타낸다. 하지만 실제 좋은 처리를 위해서는 충분한 시간이 필요하지만 우리는 다른 조건들을 조절하여 가능하게 짧은 시간동안 처리를 해야한다.

## 참고문헌

- Collins, G.L. and Jameson, G.J. (1977) "Double-layer effects in the flotation of fine particles", *Chem. Eng. Sci.*, **32**, pp.239-246.
- Dobiáš, B. (1993) *Coagulation and flocculation: theory and applications*, Marcel Dekker, New York.
- Dockko, S., Han, M.Y. and Park, C.H. (1997) "Collision efficiency factor in differential sedimentation ( $\alpha$ DS) including hydrodynamics and interparticle forces", *Proceedings of LAWQ '97 Asian Regional Conference*, Seoul, 1241-1248.
- Edzwald, J.K. (1993) "Coagulation in drinking water treatment: particles, organics and coagulants", *Water Science and Tech.*, **27**, pp. 21-35.
- Edzwald, J.K. (1995) "Principles and applications of dissolved air flotation", *Wat. Sci. Tech.*, **31**(3-4), pp.1-24.