

## 전기부상공정에서 촉매성 산화물 전극에 따른 기포 발생량과 크기에 관한 연구

김 동 석 · 박 영 식\*  
대구가톨릭대학교 환경과학과, \*대구대학교 보건환경전공  
(2007년 6월 8일 접수; 2007년 8월 29일 채택)

## Study on Bubble Generation and Size by Dimensionally Stable Anode in Electroflotation Process

Dong-Seog Kim and Young-Seek Park\*

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

\*Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea

(Manuscript received 8 June, 2007; accepted 29 August, 2007)

Small gas bubbles are used in many environmental and industrial processes for solid-liquid separations or to facilitate heat and mass transfer between phases. This study examines some of the factors that affect the bubble volume and size processed in the EF (electroflotation) process. The effect of electrode material, NaCl dosage, current and electrode distance were studied. The results showed that the generated bubble volume with electrode material lay in: Pt/Ti  $\approx$  Ru/Ti  $\approx$  Ir/Ti > Ti electrode. The more NaCl dosage was high, the smaller bubble was generated due to the low electric power. Bubble generation was increased with increase of current. With the increase of NaCl dosage, bubble generation was increased at same electric power (16.2 W). Generated bubble volume was not affected by electrode distance. However, no clear trends in bubble size as a function of these parameters were evident.

Key Words : Electroflotation, Micro bubble, Bubble volume, Bubble size, Current, Electrode

### 1. 서 론

부상공정은 미세기포를 이용하여 수중의 입자를 부상시켜 제거하는 공정으로 기존의 침전공정에 대한 대체 수단으로 각광받고 있다. 특히 부상공정은 조류나 alum 플러와 같이 침전이 잘되지 않는 비중이 물과 비슷하거나 가벼운 입자를 효과적으로 제거할 수 있고, 부지면적이 적게 소요되는 장점이 있다. 이러한 부상공정은 기포 발생방법에 따라 크게 용존공기부상법(DAF, dissolved air flotation)과 전기부상법(EF, electroflotation)으로 구분할 수 있다<sup>1)</sup>.

용존공기부상법은 교반이나 전기에 의하지 않고 수체에 압력변화를 줌으로서 기포를 발생시켜 이용

하는 방법으로 기포의 크기는 10~100  $\mu\text{m}$  정도로 매우 작다. 이때 수체에 압력 변화를 주는 방법에 따라 진공부상법(vacuum flotation)과 가압부상법(pressure flotation)으로 나눌 수 있다. 전자는 대기압 하에서 물에 녹아있는 기체를 감압하여 미세기포를 발생시키는 방법으로 제지산업 등에서 섬유질의 농축용으로 널리 사용된다. 이러한 방법은 압력 차이를 1기압 이상 만들 수 없기 때문에 다량의 기포를 얻을 수 없는 단점이 있다. 가압부상법은 물을 보통 4~5기압으로 가압하여 과량으로 공기를 용해시킨 뒤 다시 대기압으로 방출함으로써 과포화된 공기기포가 발생하는 방법으로 상하수처리에 널리 사용된다. 이러한 방법으로 진공부상법보다 더 큰 압력 차이를 얻을 수 있어 미세한 기포를 대량으로 발생시킬 수 있게 되며, 경우에 따라 처리대상이 되는 물을 전부 가압한 뒤 감압하기도 하지만, 일부의 가압된 물을 처리수에 주입하여 기포를 얻어내는

Corresponding Author : Young-Seek Park, Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea  
Phone: +82-53-650-8043  
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

방법이 일반적이다<sup>2)</sup>. 가압부상법은 슬러지 팽화에 대한 문제가 없고, 농축슬러지의 총고형물 농도가 2~3%로 중력 침강식에 비해 고효율 농축공정이다. 그러나 가압부상법은 기포발생을 위해 추가적인 설비가 필요하고, 높은 압력을 유지하기 위한 동력비가 소요되는 단점이 있다<sup>3)</sup>.

전기부상법은 폐수 중에 설치된 양극과 음극의 전극판에 전류를 통과시켜 물의 전기분해로부터 발생하는 수소와 산소기포를 이용하여 고액분리를 행하는 기술로 발생하는 기포의 크기 분포가 비교적 작고, 복잡한 기계 장치가 필요하지 않기 때문에 최근 들어 각광을 받고 있는 기술이다<sup>4)</sup>. 전기부상법에서 발생한 미세기포 크기는 약 20~40  $\mu\text{m}$  정도로 매우 작고, 작은 기포 크기로 인하여 수리학적 표면 부하율(hydraulic loading rate)은 4 m/h이하로 제한되어 있다. 부상공정에서 작은 크기의 기포들은 기포-입자간의 충돌 효율에 있어 좋은 영향을 미칠 수 있으나, 그 작은 기포와 기포-입자 집합체들이 유출수와 함께 쓸려 갈 수 있기 때문에 매우 큰 처리용량을 갖는 수처리에서는 적합하지 않다. 그러므로 전기부상 공정의 이용은 슬러지 농축이나 처리용량이 10~20  $\text{m}^3/\text{h}$  정도의 범위를 갖는 작은 산업 폐수 처리장에 사용될 수 있도록 제한하고 있다<sup>5,6)</sup>.

전기부상법의 일반적인 주요 장점으로는, 전기분해를 통해 발생하는 기포의 크기가 비교적 일정하고, 전류 밀도의 변화를 통하여 기포 발생량을 변화시킬 수 있으며, 적절한 전극과 용액조건을 선택하여 원하는 분리공정의 최적 조건을 얻을 수 있다는 점을 들 수 있다<sup>7,8)</sup>.

그러나 전기부상법에 대한 연구는 미세기포의 크기 측정과 측정법이나 알루미늄이나 철 등의 용해성 전극을 이용한 전기응집-전기부상(electrocoagulation-electroflotation)을 이용한 중금속 처리, 오일/물 에멀전 처리, 축산폐수 처리 등에 관한 연구에 집중되고 있고, 불용성 전극인 촉매성 산화물 전극(DSA, dimensionally stable anode)에서의 기포 발생량과 기포 크기에 미치는 인자에 대한 연구는 많지 않다<sup>2,9~12)</sup>.

본 연구에서는 불용성 전극인 촉매성 산화물 전극을 이용하여 순수 미세기포 발생을 위한 전기부상법에서 기포 발생량과 기포 크기에 미치는 인자를 고찰하여 전기부상을 이용하여 보다 안정적인 고액분리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 전극 재료

모든 전극은 두께가 0.5 mm이고 크기가 35 × 35

mm(면적: 7.69  $\text{cm}^2$ )이며 메쉬형 전극이다. Ti 전극(Kobe Steel TP340, 98.9%), Pt/Ti, Ir/Ti 및 Ru/Ti 전극을 사용하였다. Pt/Ti 전극과 Ir/Ti 전극은 현재 상업적으로 이용 가능하므로 코팅 두께가 5  $\mu\text{m}$ 인 메쉬형 도금 전극(Hyunsung E&E)을 구매하여 사용하였다. Ru/Ti 전극은 제조하여 사용하였으며, 상세한 제조법은 기 발표 논문에 상세히 기술되어 있다<sup>13)</sup>.

### 2.2. 기포 발생량과 기포 크기 측정

Fig. 1과 같이 전극을 반응기 하부에 평행하게 설치하였다. 전기부상조의 상부를 막고 수도물이 들어 있는 눈금을 새긴 실리콘 관(내경 8 mm)에 연결하였다. 직류 전원공급기(Hyunsung E&E, 50V 20A)에서 전류를 공급하여 발생하는 기포가 실리콘 관 속의 물을 밀어내는 길이를 측정할 뒤 실리콘 관의 면적을 곱하여 발생하는 기포의 양을 측정하였다.

기포 크기는 기포 크기 측정용 반응기 전면에 전극을 수직으로 배열하고 전극 뒤를 방해판(baffle)으로 막은 뒤 직류 전원공급기(Hyunsung E&E, 50V 20A)에서 전류를 3초 동안 공급하여 기포를 발생시켰다(Fig. 2). 발생하는 기포를 반응기와 일정한 간격과 높이(20 cm)로 설치되어 있는 컴퓨터와 연결된 CCD (charge-coupled device) 카메라(DMI, 10X)로 관찰한 뒤 70초 후 이미지를 촬영하였다. 촬영한 이미지를 Image analyser(Focus Technology, Image inside)로 700~1000개의 입자에 대해 장축( $b_i$ )과 단축( $a_i$ )을 구하여 아래와 같이 계산되는 직경  $D_i$ 를 가지는 volume-equivalent 구형으로 전환하고, 평균 기포 크기는 Sauter mean diameter에 의해 구하였다<sup>14)</sup>. 전기전도도는 전도도미터(Eutech, Cybercan PC 300)을 이용하여 측정하였다.

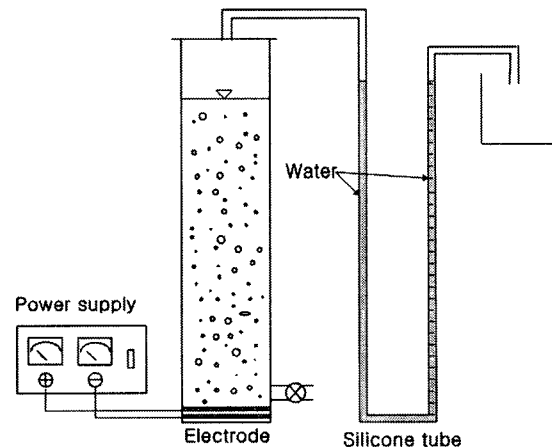


Fig. 1. Schematic diagram of measuring device of bubble volume.

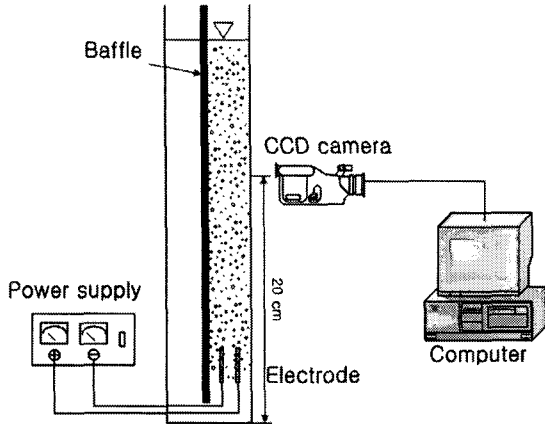


Fig. 2. Schematic diagram of measuring device of bubble size.

$$D_i = \sqrt[3]{a_i \cdot b_i} \quad (1)$$

여기서,  $a_i$  : 장축 ( $\mu\text{m}$ )  
 $b_i$  : 단축 ( $\mu\text{m}$ )

평균 입자 크기는 식 (2)로 표현되는 Sauter mean diameter에 의해 구하였다.

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{D}$  : Sauter mean diameter  
 $n$  : 측정 횟수

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 기포 발생량

##### 3.1.1. 전극 종류의 영향

Fig. 3에는 NaCl을 0.5 g/L 첨가하고 0.5 A의 전류를 적용한 조건에서 4 종류의 전극에서 전극 종류에 따른 기포 발생량을 나타내었다. Pt/Ti, Ru/Ti, Ir/Ti 전극의 기포 발생량은 거의 비슷하였으나 Ti 전극의 경우 기포 발생량이 가장 적은 것으로 나타났다. 각 전극에 걸리는 전압은 Ti 전극은 20.3 V, Pt/Ti 전극은 8.5 V, Ru/Ti 전극은 10.7 V, Ir/Ti 전극은 8.4 V로 나타났다. 실험에 사용한 전극 중 Pt/Ti 전극이 타 전극에 비해 상업적으로 쉽게 이용 가능하고 다른 전극(Ir/Ti, Ru/Ti)에 비해 가격이 저렴하기 때문에 Pt/Ti 전극을 이용하는 것이 바람직하다고 사료되었으나 전극의 최종 선정은 기포 크기와 실제 슬러지 부상 실험을 통해서 최종적으로 판단하여야 할 것으로 사료된다.

##### 3.1.2. NaCl 첨가량의 영향

Fig. 4에는 NaCl 첨가량을 0.25 g/L에서 1 g/L로 변화시키면서 각 NaCl 첨가량에서 전류를 0.2~1 A로 변화시켰을 경우의 기포 발생량을 나타내었다. 그림에서 보듯이 모든 NaCl 농도에서 전류가 증가함에 따라 기포 발생량이 증가하는 경향을 나타내었다.

한 등<sup>15)</sup>은 알루미늄 전극을 사용한 기포 발생량 측정 실험에서 기포 발생량은 전류에 비례한다고 하였으며, 윤<sup>4)</sup>은 높은 전압에서 기포 발생량이 많아 카울린의 제거율이 높다고 보고하였다. 또한 박 등<sup>16)</sup>은 전류밀도가 증가하면 기포 발생량이 증가한다고 하였다. 타 연구자들의 결과와 같이 본 연구도 기포 발생량은 적용 전류가 증가되면 전극 단위면적당 걸리는 전류밀도가 증가하고 이에 따라 기포 발생량이 증가하는 것으로 사료되었다.

같은 전류에서 NaCl의 영향을 고찰하기 위하여 NaCl 첨가량을 변화시켰을 경우의 기포 발생량을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 NaCl이 첨가되지 않은 경우의 기포 발생량이 가장 많았으며, NaCl 첨가량이 증가함에 따라 기포 발생량이 감소하였으나 그 차이는 크지 않았다.

그러나 NaCl 첨가에 따른 전압은 NaCl 첨가량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. Table 1에는 수돗물에 NaCl을 첨가하였을 때 첨가량에 따른 전기전도도의 변화와 0.5 A의 전류를 흘려주었을 때 전력량 변화를 나타내었다. NaCl이 첨가되지 않은 경우는 16.2 W의 전력이 소비되지만 NaCl이 0.25 g/L만 첨가되어도 6.15 W로 나타나 소비되는 전력이 1/2 이상 감소되는 효과를 나타내었으며, 그 이상의 첨가량에서는 전력 감소 효과는 줄어드는 것

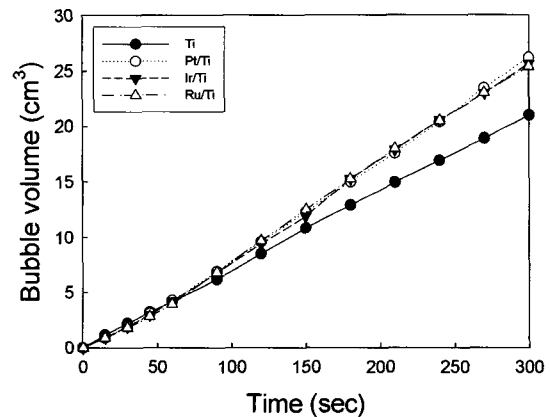


Fig. 3. Effect of electrode material on the bubble volume. (tap water + NaCl 0.5 g/L; current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

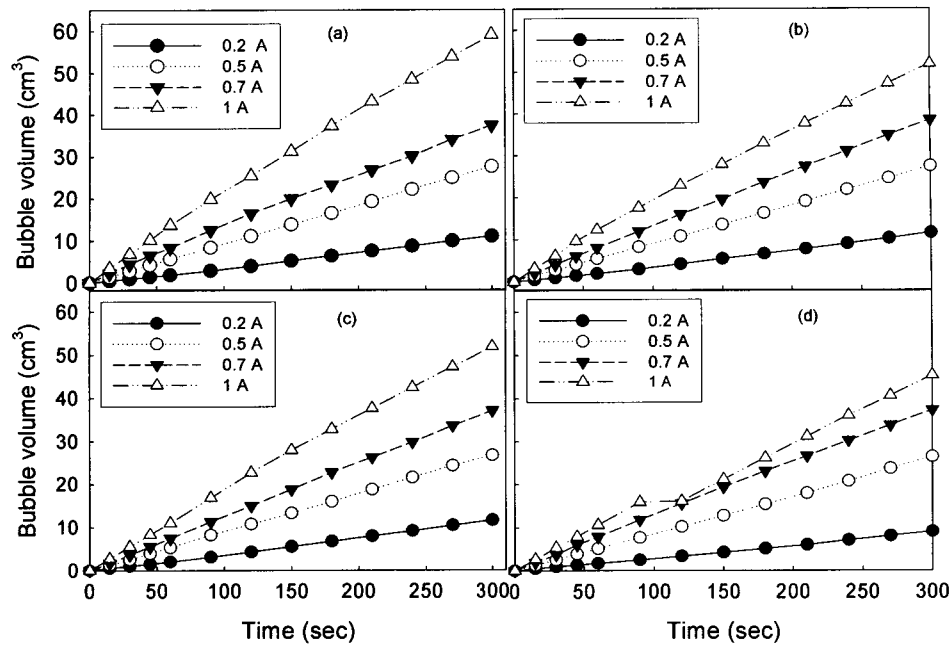


Fig. 4. Effect of current and NaCl dosage on the bubble volume. (a) NaCl 0.25 g/L (b) NaCl 0.5 g/L (c) NaCl 0.75 g/L (d) NaCl 1 g/L (tap water + NaCl; electrode distance, 2 mm)

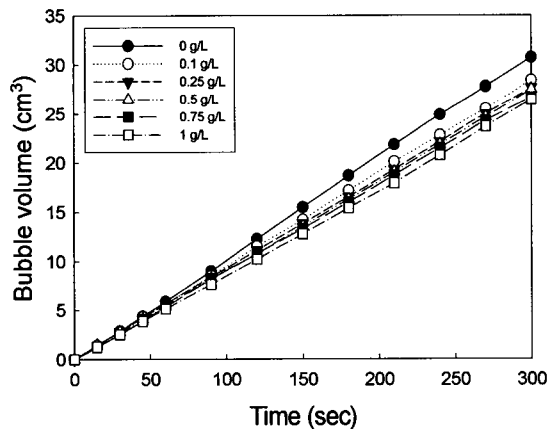


Fig. 5. Effect of NaCl dosage on the bubble volume. (tap water + NaCl ; current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

으로 나타났다. 따라서 Fig. 5의 NaCl 첨가시 기포 발생량이 감소하는 것은 전기전도도 증가로 인해 전압이 낮아지고 결과적으로 적용된 전력량이 감소하였기 때문인 것으로 사료되었다.

NaCl을 첨가할 경우 같은 전류에서 실험하여도 전압이 낮아져 전력량이 낮아지기 때문에 기포 발생량이 다소 낮아지는 결과를 나타내었다. 같은 전력량에서 기포 발생량을 비교하기 위하여 전력을 NaCl 무첨가시의 16.2 W를 기준으로 설정하고

Table 1. Change of electric conductivity and power with NaCl dosage

NaCl dosage (g/L)	0	0.25	0.50	0.75	1.0
Electric conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	359	908	1,447	1,965	2,550
Electric power (W)	16.2	6.15	4.25	3.65	3.35

NaCl 첨가량에 따라 전류를 0.5~1.3 A로 조절하여 전력량을 16.2 W로 조절한 뒤 기포 발생량을 Fig. 6에 나타내었다. NaCl 첨가량 증가에 따라 기포 발생량이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으나 0.5 g/L 이상의 NaCl 첨가량에서는 기포 발생량 증가폭이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 적용된 전류와 전압이 NaCl 첨가량에 따라 다르지만 적용 전력량이 같은 조건에서 NaCl 첨가량에 따라 증가된 전기 전도도로 인해 전류가 흐르기 쉬운 조건이 형성되어 기포 발생량이 증가하는 것으로 사료되었다.

기포발생량에 미치는 NaCl의 영향을 종합해볼 때 NaCl 무첨가시 기포발생량이 가장 많으나 전력량이 가장 높은 결과를 얻었고, NaCl 첨가량이 증가함에 따라 소요 전력량이 감소하는 결과를 나타내었다. 같은 전력량에서는 NaCl 첨가량이 증가함에 따라 기포발생량이 증가하지만 0.5 g/L 이상의 첨가량에서는 기포발생량 증가가 크지 않았다. NaCl을 첨가

하는 것이 기포발생량 증가에 기여하지만 시약인 NaCl 첨가량과 기포발생량을 같이 고려해볼 때 최적 NaCl 첨가량은 0.5 g/L인 것으로 사료되었다.

### 3.1.3. 전극 간격의 영향

전극 간격을 2~11.8 mm로 변화시켜 양극과 음극 사이의 전극 간격이 기포 발생량이 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 전극 간격은 기포 발생량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 전극 간격에 따라 0.5 A의 고정 전류에서 전압은 각각 8.25 V, 19.5 V, 25.7 V 및 33.6 V로 나타나 전극 간격이 넓을수록 소비되는 전력량이 많아지기 때문에 되도록 전극 간격이 좁아야 한다고 사료되었다.

## 3.2. 기포 크기

### 3.2.1. 전극 종류의 영향

4종류의 전극에 대한 기포 크기를 Fig. 8에 나타

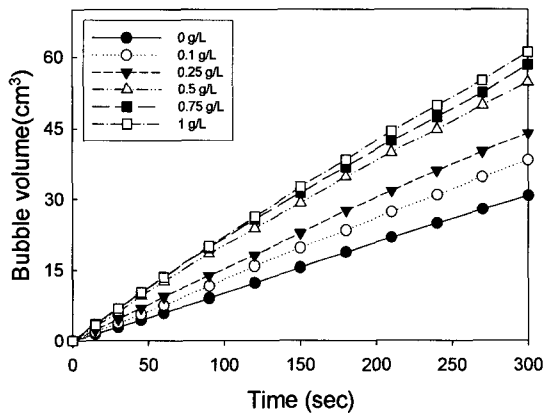


Fig. 6. Effect of NaCl dosage on the bubble volume at same electric power (16.2 W). (tab water + NaCl; electrode distance, 2 mm)

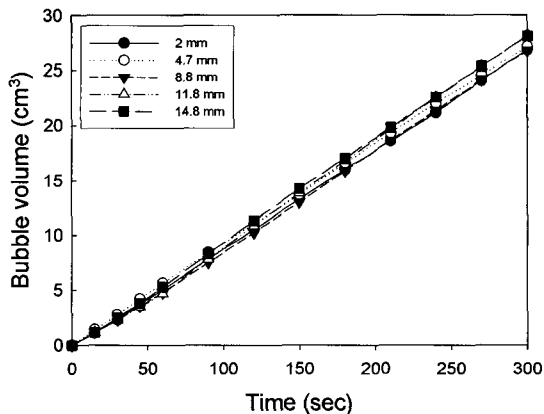


Fig. 7. Effect of electrode distance on the bubble volume. (tab water + NaCl 0.5 g/L; Current, 0.5 A)

내었다. 발생하는 기포 크기 분포는 2.5~30  $\mu\text{m}$ 의 범위에 있었으며, 평균 기포 크기는  $\text{Ru/Ti} > \text{Ti} > \text{Ir/Ti} > \text{Pt/Ti}$ 의 순으로 나타났으며, Fig. 3의 기포 발생량과는 다른 경향을 나타내었다.

김<sup>2)</sup>은 알루미늄 전극을 사용하였을 경우 평균 기포 크기는 35  $\mu\text{m}$ , 조<sup>17)</sup>는 양극으로 DSA 코팅 Ti 판을, 음극으로는 Ti 판을 2장 사용하였을 경우 기포 크기가 34.04  $\mu\text{m}$ , Chen<sup>18)</sup>은 Pt/Ti 전극을 사용하였을 경우 pH 7에서 수소 기포 크기는 5~30  $\mu\text{m}$ , 산소 기포 크기는 17~50  $\mu\text{m}$ 라고 보고한 결과와 비교할 때 본 실험에서 측정된 기포의 크기가 작은 것으로 나타났다. 이는 본 실험에서 사용한 CCD 카메라와 이미지 아날라이저를 이용한 화상분석 시스템에서는 속도가 빠르고 크기가 큰 초기에 부상하는 기포의 형상이 이미지 상에서 타원으로 나타나기 때문에 크기를 측정하지 못하고 70초에 부상하는 기포를 촬영하여 기포 크기를 계산하였으므로 기포 크기가 작은 것으로 사료되었으며, 실험기기상의 한계로 실질적인 기포 크기 측정은 어렵지만 같은 시간대에 부상하는 기포 크기를 측정하여 기포 크기에 미치는 요소들에 대한 영향의 경향을 고찰할 수 있다고 판단하여 실험을 진행하였다.

### 3.2.2. NaCl 첨가량의 영향

기포 크기에 대한 NaCl의 영향을 고찰하기 위하여 NaCl을 0~1 g/L 첨가하고 전류를 0.5 A로 인가하면서 발생한 기포 크기를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 평균 기포 크기는 NaCl 첨가량이 증가하면서 증가하는 경향으로 보였으며, NaCl이 첨가되지 않은 경우는 10.36  $\mu\text{m}$ , NaCl이 1.0 g/L 첨가된 경우는 12.34  $\mu\text{m}$ 로 나타나 그 차이는 크지 않은 것으로 사료되었다.

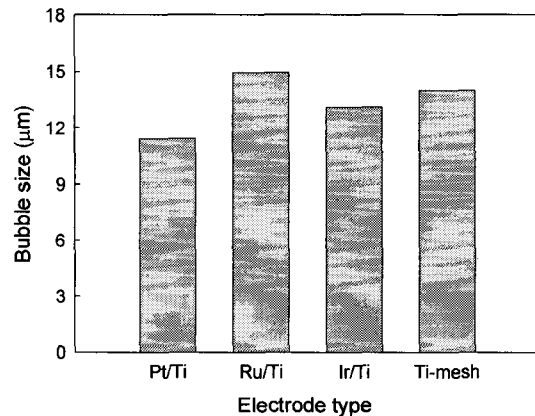


Fig. 8. Effect of electrode materials on the bubble size. (tab water + NaCl 0.5 g/L; current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

같은 전력량에서 기포 크기를 비교하기 위하여 전력을 NaCl 무첨가시의 16.2 W로 고정하고 전류를 0.5~1.3 A로 조절하여 전력량을 16.2 W로 조절 한 뒤 기포 크기를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보듯이 같은 전력량에서 NaCl 첨가에 따라 기포 크기가 증가하지만 변화는 크지 않았다.

### 3.2.3. 전극 간격의 영향

Fig. 11에는 전극 간격을 2~11.8 mm로 변화시켰을 때 전극 간격에 따른 기포 크기를 나타내었다. 전극 간격이 멀어질수록 기포 크기가 증가하는 경향을 보였으나 2 mm와 11.8 mm의 기포 크기 차이는 2 μm로 나타나 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

한 등<sup>15)</sup>은 용액의 이온농도, 저항, 전극의 전기전도도 등 전류와 관계없는 모든 인자들이 기포의 크기에 영향을 미치지 않는다고 하였으며, 알루미늄,

금과 스테인리스 전극의 평균 기포 크기는 각각 19, 20 및 27 μm라고 보고하였다. 박 등<sup>16)</sup>은 알루미늄 전극을 사용한 기포 크기 측정에서 기포 크기는 전압에 관계없이 19~23 μm로 비슷한 분포를 보인다고 보고하였다. 조<sup>17)</sup> 등은 DSA 코팅 Ti 전극(양극)과 Ti 전극(음극)을 이용한 기포 크기 측정에서 수돗물과 인공하수 모두 전도도, 전류밀도와 상관없이 기포 크기가 일정하다고 보고하였다.

본 연구에서 측정한 기포 크기의 경우 전극은 모두 Ti 표면에 금속을 코팅한 전극을 사용하였기 때문에 전극 재질에 따른 기포 크기 차이는 한 등<sup>15)</sup>과 같은 기포 크기 차이를 보여주지 않았다고 사료되었으며, NaCl 첨가나 전극 모양 및 전극 간격 등에 의한 기포 크기도 타 연구자들과 같이 비슷한 결과를 보여주었다.

따라서 전기부상 공정에서 부상효율은 기포 크기 변화에 의한 효과보다는 기포 발생량에 영향을 받으며, 기포 발생량에 주 영향을 주는 전류의 손쉬운 조절을 통해 부상공정을 제어할 수 있으며 부상 공정에서의 고액 분리 효율이 A/S비에 크게 의존한다고 사료되었다<sup>17)</sup>.

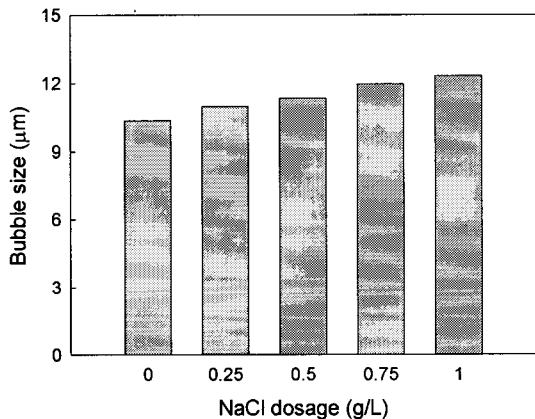


Fig. 9. Effect of NaCl dosage on the bubble size. (tab water + NaCl; Current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

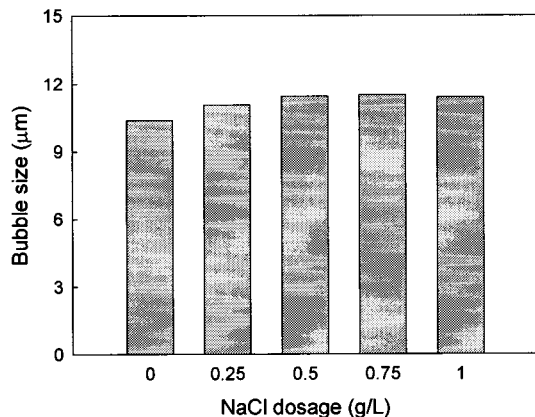


Fig. 10. Effect of NaCl dosage on the bubble size at same electric power (16.2 W). (tab water + NaCl; electrode distance, 2 mm)

## 4. 결 론

전기부상에서 기포 발생량과 기포 크기에 미치는 요소에 미치는 요소에 대해 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

1. NaCl 첨가시 기포 발생량은 Ti 전극을 제외하고 전극 종류에 따른 기포 발생량 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 기포 크기는 Ru/Ti > Ti > Ir/Ti > Pt/Ti 전극의 순으로 나타났으나 차이는 크지 않았다.

2. 전류가 일정한 경우 NaCl 첨가시 첨가량이 증

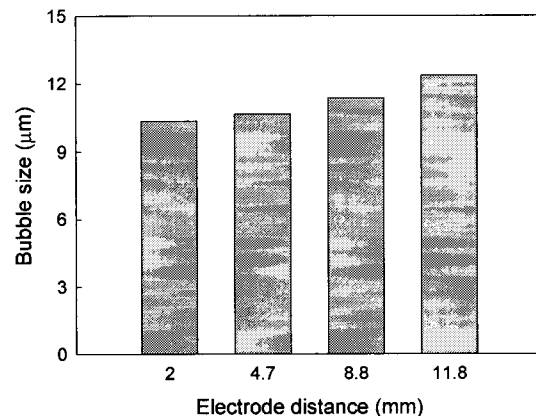


Fig. 11. Effect of electrode distance on the bubble size. (tab water + NaCl 0.5 g/L; current, 0.5 A)

가함에 따라 기포 발생량이 감소하였는데 이는 전기전도도의 증가로 인하여 적용 전력량이 감소하였기 때문이라고 사료되었다. 모든 농도 범위의 NaCl 첨가량에서 전류 증가에 따른 전력량이 증가할 경우 비례하여 기포 발생량이 증가하였다. 기포 크기는 NaCl 첨가량이 증가하면서 증가하는 경향으로 보였으나 그 차이는 크지 않은 것으로 사료되었다.

3. 같은 전력량(16.2 W)에서 NaCl 첨가량이 증가함에 따라 기포 발생량이 증가하는 경향을 보였으며, 전력량에서 NaCl 첨가에 따라 기포 크기가 증가하지만 변화는 크지 않았다.

4. 전극 간격은 기포 발생량과 기포 크기에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 전극 간격이 넓을수록 소비되는 전력량이 많아지기 때문에 되도록 전극 간격이 좁아야 한다고 사료되었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 한무영, 신민석, 2002, 회분식 전해부상법(EF)에서 극판 재질이 탁도의 제거효율에 미치는 영향, 상하수도학회지, 16(1), 87-92.
- 2) 김원태, 2001, 전해부상법에서 미세기포와 입자의 기초특성 연구를 통한 제거 메커니즘 연구, 석사학위논문, 지구환경시스템공학부, 서울대학교, 서울.
- 3) 박용호, 한무영, 안현주, 허창원, 2003, 전해부상법에 의한 슬러지 농축특성, 대한환경공학회 춘계학술발표회 논문집, 271-274.
- 4) 윤창곤, 2005, 전해부상을 이용한 하수슬러지 고액분리의 최적화, 석사학위논문, 토목환경공학과, 성균관대학교, 서울.
- 5) American Water Works Association, 1999, Water quality and treatment 5th ed., McGraw Hill Inc., 278-290pp.
- 6) 이준, 2004, 부상공정에 의한 상수슬러지 농축, 석사학위논문, 지구환경시스템공학부, 서울대학교, 서울.
- 7) Hosny, A. Y., 1996, Separating oil from oil-water emulsions by electro-flotation technique, Sepa. Tech., 6, 9-17.
- 8) 박영식, 2007, 전기부상을 이용한 하수슬러지 농축기술개발, 산학협동재단(재) 최종보고서, 40-43pp.
- 9) 신민석, 2002, 전해부상법에서 금속이온이 기포의 제타전위에 미치는 영향, 석사학위논문, 지구환경시스템공학부, 서울대학교, 서울.
- 10) Gao, P., Chen, X., Chen, F., and Chen, G., 2005, Removal of chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter, Sepa. and Puri. Tech., 43, 117-123.
- 11) Moulai, N., and Tir, M., 2004, Coupling flotation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. optimization of the operating conditions, Desalination, 161, 115-121.
- 12) 신민석, 이광형, 김달중, 한무영, 2001, 전해부상법에 의한 축산폐수의 처리 특성, 상하수도학회지, 15(5), 379-384.
- 13) 김동석, 박영식, 2007, 불용성 전극을 이용한 Rhodamine B의 전기화학적 탈색, 한국물환경학회지, 23(3), 377-384.
- 14) Bailey, J. E., Ollis, D. F., 1986, Biochemical engineering fundamentals, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., 480-485pp.
- 15) 한무영, 박용호, 이준, 2001, 전해부상에서 미세기포의 크기특성, 대한상하수도학회한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집, 297-280.
- 16) 박용호, 한무영, 2002, 전해부상에서 전압과 극판 재질에 따른 미세기포의 크기 특성, 상하수도학회지, 16(6), 663-669.
- 17) 조강우, 김윤중, 정태학, 2006, 전해부상을 이용한 활성슬러지의 부상 특성에 관한 연구, 한국물환경학회대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집, 173-180.
- 18) Chen, G., 2004, Electrochemical technologies in wastewater treatment, Sepa. and Puri. Tech., 38, 11-41.