

## 용존이산화탄소부상(DCF) 공정의 입자분리 특성과 부상효율

### Particle Separation and Flotation Efficiency by Dissolved Carbon Dioxide Flotation Process

곽동희<sup>1</sup> · 김성진<sup>2</sup> · 정흥조<sup>3</sup> · 박양균<sup>1</sup> · 유영훈<sup>1</sup> · 이영동<sup>4\*</sup>

Dong-Heui Kwak<sup>1</sup> · Seong-Jin Kim<sup>2</sup> · Heung-Jo Jung<sup>3</sup> · Yang-Kyun Park<sup>1</sup> · Young-Hoon Yoo<sup>4</sup> · Young-Dong Lee<sup>4\*</sup>

1 서남대학교 환경화학공학과, 2 한영대학 환경과, 3 신경대학교 생명공학과, 4 전북대학교 환경공학과

(2011년 4월 11일 접수 ; 2011년 6월 29일 수정 , 2011년 7월 12일 채택)

#### Abstract

A series of laboratory experiments carried out to investigate the particle separation efficiency and flotation characteristics using CO<sub>2</sub> bubbles. The primary objective of this study was to find out the feasibility of CO<sub>2</sub> bubbles as an applicable unit of flotation process in tap-water and wastewater treatment plant. The fundamental measurements were conducted to characterize the CO<sub>2</sub> bubble from the physical viewpoint in water including bubble size distribution and rising velocity under various operational conditions. In addition, the removal efficiency of solid was experimented using the lab scale plant applied CO<sub>2</sub> bubbles, namely the dissolved carbon dioxide flotation (DCF) process.

The DCF process using carbon dioxide bubble, which is an advantage as the decrease and the reuse of Green-House gas, can be a promising technology as an water treatment process. On the other hand, the further research to decrease the bubble size distribution of CO<sub>2</sub> is required to enhance the particle separation efficiency.

**Key words** : flotation, Carbon dioxide, Micro-bubble, DCF, Particle separation

**주제어** : 부상분리, 이산화탄소, 미세버블, 용존탄소부상, 입자분리

#### 1. 서론

부상분리(flotation)이란 분산매 중에 함유된 플러들에 공기를 부착시켜 공기가 접하고 있는 한계면까지 부상시키는 방법을 말한다(Kawamura, 1991). 수중에 부유해 있는 입자를 중력을 이용한 분리방법인 침전법과는 반대로 플러에 기포를 부착시켜 부력에 의해 상승력을 증가시킴으로써 플러를 부상시키는 방법으로 부상분리 공정은 초창기 수처리 분야가 아닌 광산업 분야의 부유선광 분리과정에서 사용

되었지만, 1920년대 부상분리 공정에 거품제가 도입됨에 따라서 비광물질까지 제거할 수 있게 되면서 다른 분야로 적용범위가 확대되어 왔다(Magravite, 1972).

부상분리를 수처리에 적용한 초기 연구로서는 원수 중에 함유된 중크롬산을 제거하기 위해 계면활성제를 투입하여 수처리를 수행하기도 하였으며(Grieves, et al., 1970), Cassell(1968; 1969)과 Mangravite(1975)는 미세 부상(micro flotation) 공정을 이용하여 유기성 콜로이드와 휴믹산의 제거에 관한 연구를 수행하였다. 1970년대에는

\* Corresponding author Tel:+82-63-270-2445, Fax:+82, E-mail: elyd@chonbuk.ac.kr(Lee, Y.)

Hyde(1977) 등에 의하여 하폐수처리 공정에서 가압식 또는 감압식 부상공정 이론이 도입한 공정이 개발되었으며, 이외에도 활성슬러지 공정에서 슬러지 농축과 처분에 관해서도 연구가 활발히 진행되었다. 1980년대에는 Zabel 등(1980; 1985)에는 PAC와 같은 응집제와 순환수를 이용한 용존공기부상 공정을 적용하여 실제로 운영되었으며, 영국의 Water Research center에서는 정수처리에 순환수가압을 통한 부상공정이 적용할 수 있는 가장 적절한 부상공정으로 보고하였고 포화장치압력과 순환비에 의존하여 발생하는 기포체적 농도에 따라 조류, 낮은 경도 및 높은 색도를 갖는 원수에 최적의 정수처리가 가능하다고 하였다. 또한, Edzwald(1982; 1993; 1995) 등 많은 학자들에 의해서 수처리 단위공정에 적용되는 DAF의 세부이론과 모델이 소개하였다.

최근의 연구는 부상공정과 타 공정과의 연계를 통한 package화에 관한 연구 및 실용화가 진행되고 있다. 부상공정과 경사관을 조합한 공정은 Purac사에서 개발하여 LDAF라는 상표로 제품화되었고, 부상공정과 모래여과공정을 조합한 공정은 Purac, Krofta, Ahlstrom사에 의해서 개발되어 Flofilter, Sandfloat, AhiFloat라는 상표로 실용화되었다. 또한, 오존과 부상공정을 결합한 공정은 Ozo-Flotation 및 Flottozone이라는 상표로 실용화되었다. 기존의 장방형 침전지를 개량하여 부상조로 만드는 연구도 Arnold(1995)에 의해서 진행되었으며, 침전의 장점인 고탁도 처리와 부상의 장점인 조류의 처리를 조합하여 기존의 침전지를 개량하는 연구도 활발히 진행되었다(Dahlgvist, 1997).

부상분리는 적용되는 대상에 따라 분류하기는 하지만 거품의 존재여부에 따라서 분류하기도 한다(Hyde *et. al.*, 1977). 기포를 생성하는 기술에 따른 분류는 일반적으로 용존공기부상법(DAF), 분산공기부상법(DaF), 진공부상법(VF), 전해부상법(EF), 미생물학적부상법(MAF) 등으로 구분할 수 있다(Krofta *et. al.*, 1982). 이 중에서 가장 간단하고 안정적인 효율을 기대할 수 있는 공정으로 평가받고 있는 용존공기부상(DAF)은 공기로 포화된 수류에서 압력을 감소시킴으로써 용존된 공기로부터 수중에 기포를 형성시키는 방법으로서 주로 3종류가 사용되고 있는데 진공부상(vacuum flotation), 미세부상(micro flotation), 가압부상(pressurized flotation)이다. 이 중에서 가압부상이 현재 널리 사용되고 있으며, 통상 용존공기부상공정은 가압부상을 일컫는다.

한편, 화석연료를 이용하는 산업시설의 대부분은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 배출하게 되며 배출된 이산화탄소는 지구온난화의 문제를 일으키는 대표적인 온실가스로 인식되고 있

다. 최근 이산화탄소의 저감기술에 대한 연구뿐 만 아니라 재이용에 관한 연구가 여러 분야에서 활발히 진행되고 있다. 이산화탄소는 산업체 뿐 만 아니라 하·폐수처리장 특히 혐기성처리를 실시하는 처리장의 소화공정과 바이오가스 생산시설, 매립지 등에서도 다량으로 발생되어 배출된다.

본 연구는 이와 같이 배출되는 이산화탄소를 상수처리장 및 하폐수처리장의 부상공정 및 농축공정에 재이용할 수 있는 대안으로 기존 가압식 부상공정인 DAF공정에 공기 대신 이산화탄소를 이용하는 부상분리공정을 개발하기 위한 입자분리특성과 부상효율에 관한 기초연구를 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 CO<sub>2</sub> 미세기포에 의하여 일련의 입자분리 실험을 실시하기 위하여 실험실 규모(laboratory scale)의 DCF(dissolved carbon-dioxide flotation, 용존이산화탄소부상) 실험장치를 제작하였다. 또한 DCF의 제반 처리효율과 부상분리 특성을 전형적인 DAF(dissolved air flotation) 방식의 비교 실험도 병행하였다. DCF 및 DAF 실험장치에는 응집제 투입 및 교반장치를 설치하여 적절한 약품혼합 및 완속 교반을 실시한 후 형성된 플록과 미세기포가 원활히 결합할 수 있도록 하였다. DCF의 포화기는 1 atm. ~ 3 atm.으로 운전하였으며, 비교대상인 DAF의 가압탱크는 4 atm. ~ 6 atm.으로 운전하였다. 정확한 압력을 가하기 위하여 포화기 상부에 압력계를 설치하였고, CO<sub>2</sub> 볼베와 air 볼베를 사용하여 본 실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 DCF와 DAF 실험장치의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 한편, 순환비(recycle ratio)는 연속적으로 부상조를 운전할 경우 주요한 운전인자중 하나이다. 본 회분식 실험에서는 포화기에서 부상컬럼(flotation column)으로 유입되는 포화수 부피(ml)를 부상컬럼에서 처리한 시료의 부피(ml)당 퍼센트(%)로 나타낸 값을 순환비(recycle ratio)로서 사용하였다.

### 2.2 응집 및 기포측정 실험방법

본 실험에서 사용된 시료는 수돗물과 카올린(kaolin)을 섞은 표준인공시료(탁도 10~200 NTU)를 사용하였으며, 응집 조건은 응집제로 폴리염화알루미늄(PACl, poly-aluminium chloride) 20 ppm, 응집보조제로 수산화나트륨(NaOH) 첨가한 후 급속교반 200rpm으로 5분, 완속교반 50 rpm으로 15분의 조건으로 응집하였다. DCF 실험장치의 부상조에서 체류시간은 충분히 부상할 수 있는 시간을 고려하여 10 min으로 하였으며, 부상이 끝나면 부상컬럼

Table 1 Dimension of DAF lab scale plant and equipments

Compressor	Mass flow controller	Saturator	Flotation column
Inflow air 111 ℓ/min Outflow air 60 ℓ/min 8bar(116psi), 1,700 rpm	Max pressure 9.9 kgf/cm <sup>2</sup> Control range 0~10 kgf/cm <sup>2</sup> Air flow rate 0~10 ℓ/min	Diameter 148 mm Height 430 mm Total volume 7.40 ℓ	Diameter 100 mm Height 1,000 mm Total volume 7.85 ℓ (Effec. volume 6.28 ℓ)

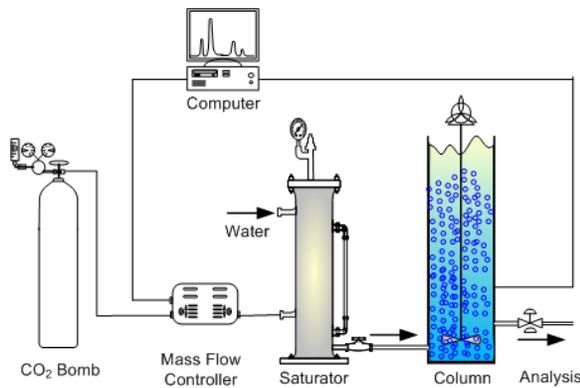


Fig. 1 Schematic diagram of DCF lab scale plant used in this study.

하단 지점에서 시료를 채취하여 분석하였다.

투명한 아크릴 관으로 제작된 부상컬럼의 하단으로부터 5cm 위치에 포화기의 유입구와 하단으로부터 4cm 높이에 유출구를 만들고 정량펌프를 부착하였다. 포화기로부터 공급되는 포화수(mily water)는 부상조에 연속적으로 주입하면서 부상컬럼에서 형성되는 미세기포 층의 부피를 측정하였다. 이 미세기포 층은 부상 컬럼에는 깨끗한 중류수를 넣은 상태에서 포화수를 순간적으로 주입시키면, 주입과 함께 발생하는 미세한 CO<sub>2</sub> 기포들은 군집을 이루면서 서서히 퍼져 부상하게 되며 이 모양이 구름처럼 나타나므로 이를 통상 ‘milky water 또는 bubble cloud’ 라고 칭한다. 또한, lab scale의 DCF 실험장치에서 발생하는 CO<sub>2</sub> bubble의 부상속도의 측정은 포화기에서 주입되는 CO<sub>2</sub>기포가 투명한 부상컬럼의 일정 높이를 부상하여 통과하는데 소요되는 시간을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 기포의 부상 속도

DAF에서 발생하는 미세기포(micro-bubbles)의 입경 측정은 생성되는 기포가 20~100μm의 매우작고 또한 하나

씩 개별적으로 발생하는 것이 아니고 군집(bubble cloud)을 형성하기 때문에 측정하기가 용이하지 않다. 최근 미세기포의 측정방법으로 particle image velocimetry (PIV)와 X-ray 촬영기법과 같은 영상 분석 방법을 이용하여 측정이 가능하지만 DAF와 같이 군집을 이루는 미세기포의 측정에는 적용한 사례가 없으며, 현재까지 입자화상분석기 (particle image analysis)에 의해 미세기포의 입경을 측정하거나(Han *et al.*, 2002) 부상조의 기포의 상승속도의 측정으로부터 stoke's law을 이용한 기포입경의 크기를 계산하는 방법이 주로 사용되고 있다.

본 DCF 실험장치에서 발생하는 CO<sub>2</sub> bubble의 부상속도의 측정에서 bubble cloud가 매우 뚜렷이 관찰되었고 이 bubble cloud의 부상속도를 각각 측정하였다. 부상 컬럼에 주입한 CO<sub>2</sub> 포화수(milky water)는 실험의 측정오차를 줄이기 위하여 10회(A~J: Fig. 1과 Fig. 2의 X축) 반복 주입하여 측정실험을 실시하였다. 이 측정결과는 다음의 Fig. 1과 같으며, bubble cloud의 평균 부상속도를 Stoke 's law에 따라 기포의 평균 입경을 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 문헌(Hurwitz and Katz, 1959)에 의하면 부상속도의 관찰 값은 2.56~12.7cm/min정도이고 기포체적농도가 증가할수록 증가하는데 고형물 농도 0.91%, 276kPa의 활성 sludge에 대하여 DAF 공정을 이용한 부상분리에서 순환비가 100, 200, 300%일 때, 부상속도는 각각 9, 37, 55 cm/min이었다.

Fig. 1에서 CO<sub>2</sub> 기포(bubble)의 부상속도 분포는 16~113 cm/min의 범위를 나타내었으며 bubble cloud의 중앙부분의 상승속도는 37 cm/min을 나타내었다.

Fig. 2에서 Fig. 1의 CO<sub>2</sub> 기포의 부상속도에 기초하여 기포의 평균 입경을 계산한 결과, bubble cloud의 각 층에서 측정된 기포의 입경(diameter)은 70.1~186.6 μm의 범위를 나타내었으며, bubble cloud의 중앙부분(center)의 기포 입경은 107.1 μm로 계산되었다. 아울러 수표면으로 방출되는 기포의 체적을 기초로 계산된 CO<sub>2</sub> bubble의 평균 입경은 120.5 μm로 나타났으며, 기포 체적을 발생기포의 개수로 나타내어 계산된 기포개수의 분율(fraction)로 계산된 기포의 평균 입경은 95.8 μm로 나타났다. 통상 입자계수

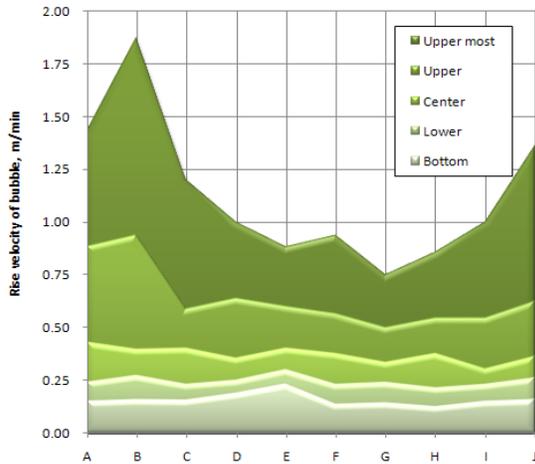


Fig. 1. Rising velocity for five layers of CO<sub>2</sub> bubble cloud in flotation column.

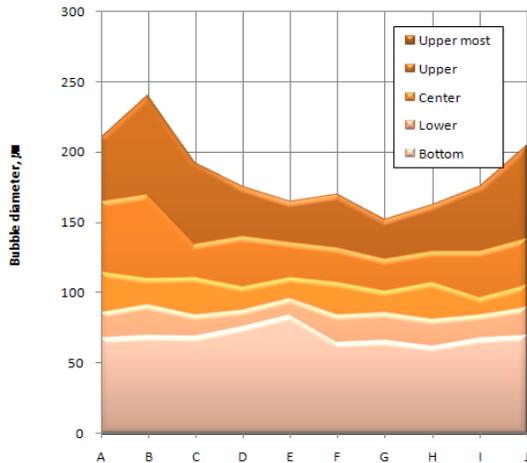


Fig. 2. Distribution of bubble diameter calculated by Stoke's law for five layers of CO<sub>2</sub> bubble cloud in flotation column.(Stoke's eq.).

기(particle analyzer)를 이용하여 입자의 평균 입경을 나타낼 때 입자의 수에 기초한 값으로 표현하므로 본 연구에서의 DCF lab scale 실험장치에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 기포의 평균 입경은 95.8 μm로 볼 수 있으며 이 값은 일반적인 DAF의 평균 입경범위인 20~100 μm에 비하여 다소 큰 값에 해당한다.

DAF공정은 포화기 내의 가압수에 공기를 포화시키기 위하여 포화기의 압력이 4~6atm으로 조절하여 공기를 용해하며 포화기의 압력 3.5atm 이상에서는 기포의 크기가 더 이상 감소하지 않으며, 포화기 압력이 4 atm.에서 평균 기

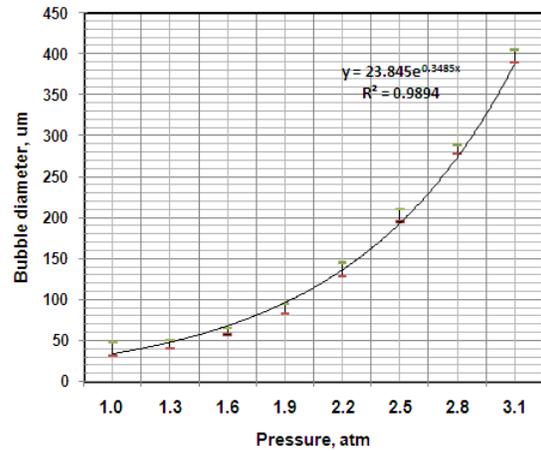


Fig. 3 Distribution of CO<sub>2</sub> bubble diameter in terms of saturator pressure.

포 직경은 약 30μm정도로 알려져 있다(Han *et al.*, 2002). 그러나 DCF에서 포화기 압력 변화에 대한 기포의 평균 직경에 대한 실험을 실시한 결과, Fig. 3에서와 같이 DCF는 DAF와 달리 압력이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 기포의 평균 입경은 지수적으로 증가(exponential increasement)하는 차이를 보였다.

### 3.2 기포체적농도와 유효기포수율

기포체적농도((bubble volume concentration, BVC)는 포화기에서 형성된 미세기포가 부상조로 유입될 때, 부상조의 부피에 따른 미세기포의 양(부피)의 비를 나타내는 지표로서 수온, 포화기 압력, 포화기에서 부상조로 유입되는 유입량(연속운전 공정의 순환비), 그리고 포화기 장치효율 순환비(recycle ratio) 등 대체적으로 4가지 변수의 함수로 나타내어진다.

본 실험에서는 수온은 평균 25℃에서 실시하였으며, 포화기 압력(saturator pressure)은 1.1 atm.에서 0.2 atm.씩 3.1 atm.까지 증가시키면서 CO<sub>2</sub>가 가압수에 과포화되어 가압수가 채워지지 않은 공간에 CO<sub>2</sub> 기체가 육안으로 확인될 수 있는 정도의 충분한 시간동안 주입하였고, 유입량은 부상조의 부피 1L의 10%로 실험을 실시하였다.

Kwak 등(2003)의 연구에서 DAF는 포화기의 압력에 비례하여 기포체적 농도가 증가함을 이론적 계산과 경험식을 제시하였다. Fig 4 (a)에서 포화기의 압력은 4 atm., 5 atm., 6 atm.으로 조절하여 DAF 실험을 실시한 결과 이론적인 기포체적 농도와 유효 기포체적 농도 모두 압력에 비례하여 증가함을 알 수 있었으며, 이를 통해 Fig 4 (b)에서

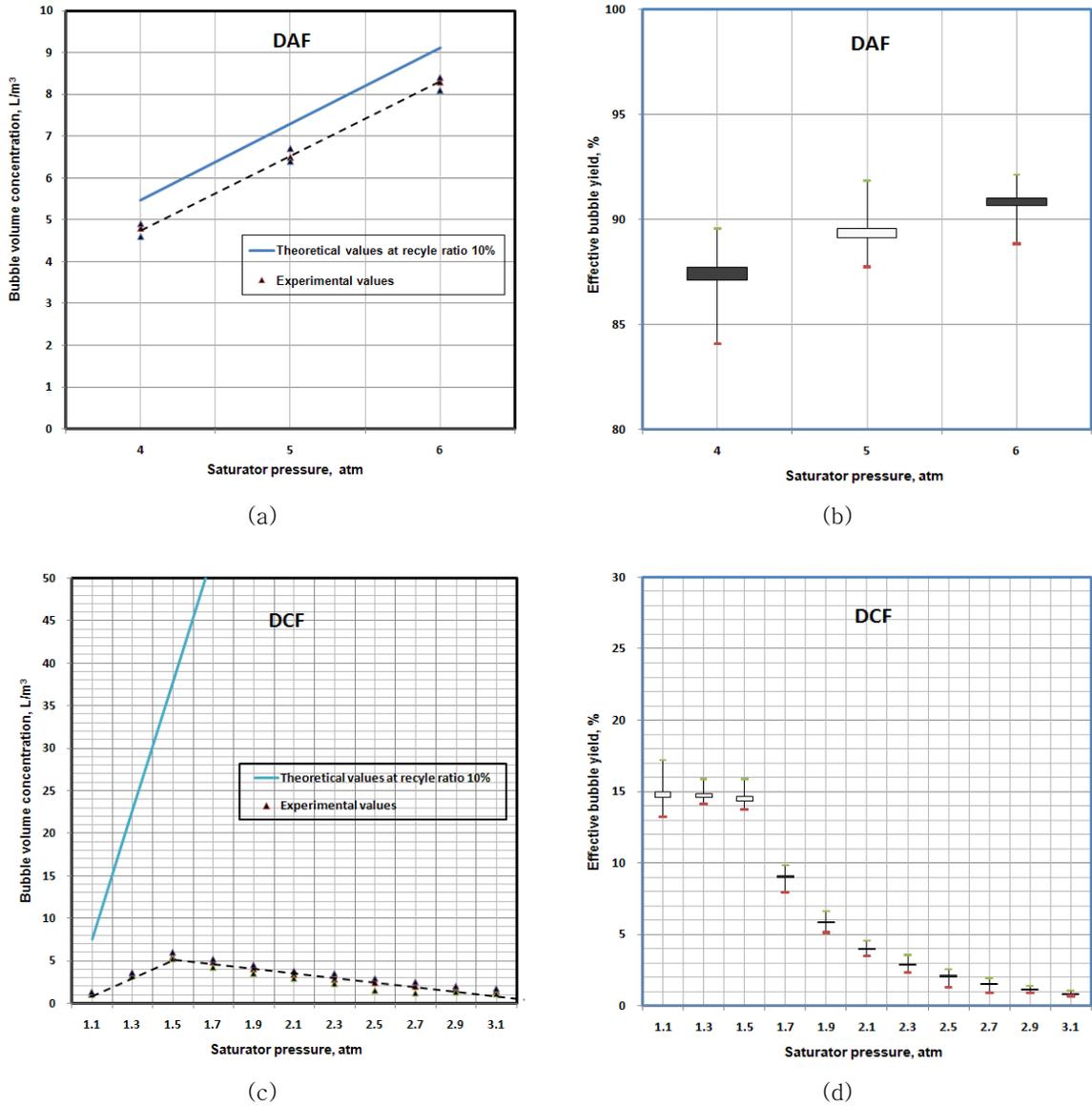


Fig. 4 Variation of bubble volume concentration and effective bubble yield in terms of saturator pressure for DAF and DCF processes.

보는 바와 같이 유효 기포체적농도는 이론적 기포체적농도에 비해 실제 평균 90% 정도로서 10%정도 낮았다. 이것은 포화기의 효율과 발생 기포의 입경 분포가 주요 원인으로 작용하는데, DAF에서 포화기 기압이 본 실험에서의 기압으로 운전할 경우 발생하는 기포는 거의 95% 이상이 100 $\mu m$ 이하의 미세기포(Kwak et al., 2003)이기 때문에 유효 기포체적 농도가 이론적 기포체적농도 보다 10%정도 낮은 원인은 장치의 효율 때문이다.

동일한 방식으로 DCF의 이론적 기포체적 농도와 유효기

포체적 농도를 실험한 결과, Fig 4의 (c)와 (d)에서처럼 유효기포체적 농도는 1.5 atm. 이하에서는 평균15% 측정되었으며 1.5 atm. 이상의 포화기 압력에서는 압력이 증가할수록 유효 기포체적 농도가 더욱 감소하였다. 여기서, DAF와 DCF의 유효 기포체적농도의 차이는 DAF와 동일한 포화기를 사용하였으므로 포화기의 효율 때문이 아니라 기포입경 분포가 원인을 알 수 있다. 앞의 3.1절에서 기술한 기포입경 측정실험에서 기포의 크기가 압력이 증가하면서 다수의 macro-bubble이 발생한 원인으로 관찰되었다.

이 macro-bubble은 입자분리에 유용한 미세 기포에 비하여 그 체적이 매우 크므로 기포체적농도(BVC)는 발생된 macro-bubble의 개수에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다.

### 3.3 포화기(saturator) 압력

부상분리를 위한 원수는 무기성입자인 카올린(kaoline)으로 50 NTU 제조하였으며, 압력조절 밸브를 이용하여 포화기의 압력을 1.0~3.0 atm까지 0.2atm씩 압력을 증가하면서 부상조에서 탁도 제거효율을 5회 반복하여 실험을 하였다. 이때, 부상조에 주입되는 순환비(recycle ratio)는 10%로 실험을 실시하였다.

실험결과 Fig. 5에서와 같이 포화기 압력이 1.5 atm에서 80~84%정도의 가장 높은 부유고형물 제거효율을 보였으며, 1.5 atm.이상의 압력에서는 제거효율이 오히려 감소하였다. 이와 같은 이유는 1.5 atm. 이상의 포화기 압력조건에서는 Fig. 3에서와 같이 압력이 증가 할수록 기포 입경이 지속적으로 커지게 되며 이는 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 발생된 macro-bubble에 따라 DCF의 유효기포수율이 급격히 감소하기 때문으로 판단된다. 결국, 높은 기포체적농도(BVC)를 얻기 위하여 DCF 공정의 포화기 운전압력을 상승시킬 경우에는 macro-bubble의 발생 억제에 노력을 기울여야 하며, 부상조의 플록과 충돌 부착하여 부상할 수 있는 유효 기포수율(effective bubble yield)의 향상 여부도 평균입경의 감소뿐 아니라 macro-bubble의 억제에 성과가 달려있을 것이다.

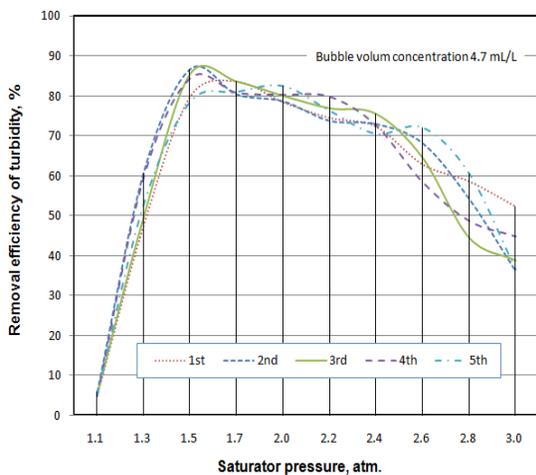


Fig. 5 Removal efficiency of turbidity in terms of saturator pressure.

### 3.4 부유고형물(SS) 부상효율과 순환비

부상분리는 기포의 충돌효율을 증가시켜 다량의 플로트(float) 발생시키기 위하여 직접적인 운전인자로 선택하는 것이 기포체적농도(BVC)이다. 기포체적농도(BVC)는 포화기의 압력과 순환비(recycle ratio) 조절을 통해 제어하는데 일반적으로 실제 운전에서 포화기의 압력은 자주 변경되지 않는다.

먼저 원수 시료의 고형물 농도의 변화에 따른 DAF와 DCF의 처리효율의 차이를 살펴보기 위하여 입자분리 실험을 실시하였다. 부유 고형물(SS)은 카올린을 사용하였으며, 0 ~ 200 NTU의 탁도 범위로 인공 시료를 제조하여 실험에 사용하였다. DAF와 DCF의 운전조건은 포화기 압력 부상시간은 실험에서의 결과를 토대로 충분한 부상분리 시간인 10분으로 실험을 실시하였다. 실험에 의해 유효기포농도로써 최대 체적농도를 나타내는 DCF의 포화기 압력 1.5atm과 DAF의 통상적 운전범위인 5atm의 조건으로 포화기의 압력을 맞추어 실험하였고 순환비는 두 공정 모두 10%로 운전하였다.

실험 결과 원수 탁도의 변화에 대응하여 나타나는 전반적 부상효율은 DCF가 DAF보다 10%정도 낮았으나, 부유고형물 농도에 따라 부상효율의 변동폭은 DAF와 마찬가지로 크지 않았다.

다음으로 순환비의 변화에 따른 입자분리 실험결과, 다음의 Fig 7에서와 같이 순환비가 5%에서 15%까지 증가할수록 제거효율은 DAF와 DCF 모두 비례 증가(proportional growth)의 경향을 보였으며, DAF는 순환비가 10%일 때,

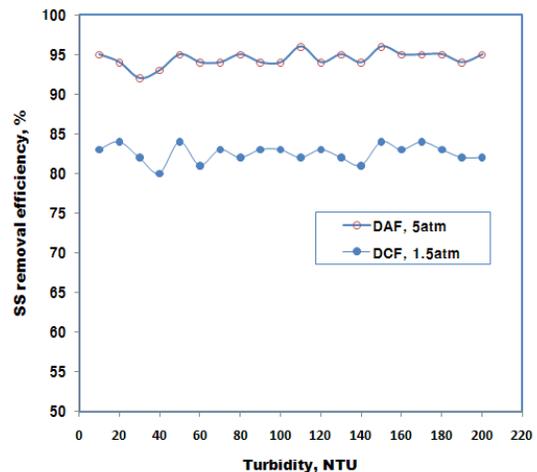


Fig. 6 Removal efficiency of DAF and DCF in terms of source water turbidity.

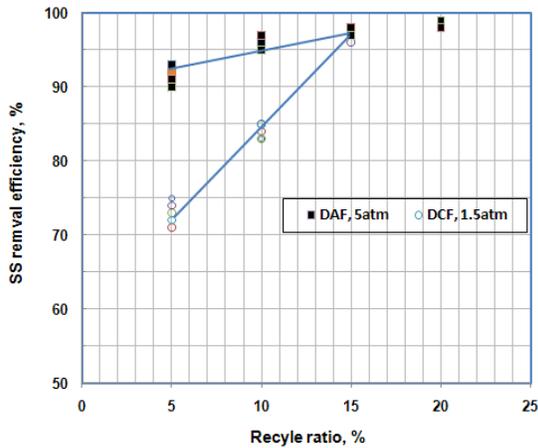


Fig. 7 Comparison of SS removal efficiency between DCF and DAF on recycle ratio.

DCF는 순환비가 15%일 때 평균 부상효율은 97%를 나타내었다. 이 실험에서 통상 DAF의 순환비 운전범위인 5~10% 운전 조건에서와 같은 DCF 순환비 운전 조건은 13~15%정도로서 DCF 순환비를 약 3~5% 상향조정하여 운전할 경우 DAF와 같은 정도의 부상효율을 달성할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

이산화탄소 재이용 및 저감기술로서 기존 용존공기부상(DAF)의 공기 대신 이산화탄소를 적용한 부상분리 공정(DCF)을 개발하고자 입자분리특성과 부상효율에 대한 일련의 기초적 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) DAF 공정에서는 포화기의 압력이 증가함에 따라 기포의 입경이 감소하며 통상 3.5 atm.이상의 압력에서는 거의 기포의 크기가 감소하지 않는 반면, DCF에서 포화기 압력에 따른 생성되는 CO<sub>2</sub> 기포의 평균 직경은 압력이 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 차이를 보였다. 최대 기포체적농도를 나타내는 DCF의 포화기 압력은 1.5 atm.이었다.

2) DAF와 DCF의 기포체적농도 실험 결과 DAF의 유효 기포수율은 이론적 기포체적농도의 90%정도인 반면, DCF의 경우 포화기 압력이 1.5 atm.이하에서 15~18%정도로 상대적으로 매우 낮았고, DAF는 압력이 증가할수록 유효 기포수율에 큰 변화가 없는 반면 DCF는 포화기의 압력이 1.5atm 이상으로 증가할수록 오히려 유효기포수율이 더욱 감소하였다.

3) DCF(최대 기포체적농도를 나타내는 포화기 압력조건 1.5 atm.)와 DAF(통상적인 포화기 운전범위인 압력조건 5.0 atm.)의 부상효율을 상호 비교한 결과, 순환비 10%에서 DCF가 DAF보다 입자분리 효율이 10%정도 낮게 나타났다으며 이는 기포입경의 차이에서 유발되었을 것으로 여겨진다. 그러나 DCF의 순환비를 3~5%정도 상승 시킬 경우 DAF와 동일한 부상효율 달성할 수 있었다.

4) 최대 기포체적농도를 나타내는 DCF의 포화기 압력이 1.5 atm.로써 낮은 동력비로 운전이 가능한 장점이 있음을 확인하였으나 DAF와 동일한 수준의 처리효율을 얻기 위해서는 순환비를 5%정도 증가하여 운전할 필요가 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해서 이산화탄소 기포를 이용한 DCF 공정은 대표적 온실가스인 이산화탄소의 재이용과 저감기술이라는 장점과 함께 DAF에 비하여 DCF의 낮은 포화기 운전 압력으로 인한 동력비 절감을 도모할 수 있는 실용성을 확인하였다. 아울러, 향후 DCF 공정의 부상효율 향상을 위해서는 포화수의 주입과정에서 생성되는 macro-bubble의 억제와 더불어 CO<sub>2</sub>기포 유효기포수율을 증가시키거나 보다 작은 기포입경 발생을 위한 연구가 요구된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2011-0002445)입니다.

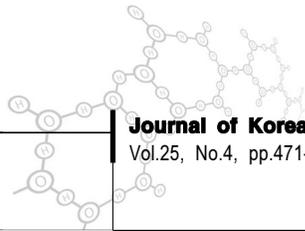
#### 참고문헌

Arnold SR, Grubb TP, Harvey P. J. (1995), Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design. *Water Science Technology*, **31**(3-4), 327-340.

Cassell E. A. *et al.*, (1969), Removal of organic colloids by microflotation, *Water and Wastewater Engineering*, **6**(C7), 103-112.

Dahlquist, J. (1997) The state of DAF development and application to water treatment in Scandinavia. Dissolved Air Flotation. *Chartered Institution of Water and Environmental Management*, London, Conference Proceedings.

Edzwald, J. K and Walsh, J. P. (1982), Dissolved Air



- Flotation : Laboratory and Pilot Plant Investigations, *AWWA Research Foundation and AWWA*, U.S.A.
- Edzwald, J. K. (1993), Algae, Bubble, Coagulants and Dissolved Air Flotation, *Water Science and Technology*, **10**, 67-81.
- Edzwald, J. K. (1995), Principles and Applications of Dissolved Air Flotation, *Water Science Technology*, **31**(3-4), 1-23.
- Hyde, R. A., Miller, D. G., Packham R. E. and Richards, W. N. (1977), Water clarification by flotation, *J. AWWA*, **69**, 369-374.
- Han M.Y., Park Y. H. and Yu T.J. (2002) Development of new method of measuring bubble size. *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(2), 77-83
- Grieves R. B., et al., 1970, "Foam Separation Clarification of Natural Waters", *Journal of AWWA*, **62**(5), 304-311.
- Kawamura, S., 1991. Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment. *J. AWWA*, **10**, 88-91.
- Krofta, M. and Wang, L. K., 1982, Potable Water treatment by dissolved air flotation and filtration, *Journal of America Water Works Association*, **74**, 304-310.
- Kwak, D. H. and Dockko, S. (2003), Effect of controlling the of microbubble in DAF. *Proceeding of 2nd International Workshop on Flotation*, **B-5**, 157-167.
- Kwak, D.H., Jung, H.J., Kwon, S.B., Lee, E.J., Won, C.H., Lee, J.W. and Yoo, S.J. (2009), Rise Velocity Verification of Bubble-Floc Agglomerates Using Population Balance Model in DAF Process, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **58**(2), 85-94.
- Magravite, Jr. F. J., Cassell, E. A. and Matijević, E., 1972, The microflotation of silica, *Journal of Colloid and Interface Science*, **39**(2), 357-366.
- Zabel, T., 1985, Advantages of dissolved-air flotation for water Treatment. *J. AWWA*, **77**, 42-45.