

이산화탄소를 이용한 부상공정 개발을 위한 운전 요소 최적화 방안

김성진[†]

한영대학교 호텔조리영양과

Optimization of Operational Parameters for Development of Flotation Process Using Carbon dioxide

Seong-Jin Kim[†]

Department of Hotel Culinary Art & Nutrition, Han-Yeong College

Abstract

The flotation process using carbon dioxide(CO₂) possess (DCF) possess the economical advantage because of operating the saturator in the lower pressure than DAF. The optimal saturator operating pressure was 1.5 atm and in this case, the diameter of bubble was about 90-100 μm similar to bubble diameter and BVC also had the lower value than DAF because the average bubble diameter was the larger than that of DAF. So, The flotation efficiency was the lower about 10% than DAF. For the flotation efficiency of DCF have enhancing as that as DAF, the floc size need over 100μm and the recycle ratio of flotation column must be the higher until about 3-8% than DAF.

Keywords : DAF, DCF, Flotation, Carbon dioxide, BVC(bubble volume concentration), Saturator

1. 서론

부상 공정(flotation process)는 분산매 중에 함유된 응집된 플럭(flag)에 직경이 약 10-100 μm 정도의 미세공기방울(micro-bubble)를 부착시켜 공기가 접하고 있는 부상조 상층 공기 경계면까지 부상시키는 방법이다¹⁾. 수중에 부유해 있는 입자를 중력을 이용한 분리방법인 침전법과는 반대로 플럭에 기포를 부착시켜 부력에 의해 상승력을 증가시킴으로써 플럭을 부상시키는 방법으로 부상분리 공정은 초창기 수처리분야가 아닌 광산업 분야의

부유선광 분리과정에서 사용되었지만, 1920년대 부상분리 공정에 거품제가 도입됨에 따라서 비광물 물질까지 제거할 수 있게 되면서 다른 분야로 적용범위가 확대되어 왔다²⁾.

최근의 부상분리 연구는 부상공정과 타 공정과의 연계를 통한 package화에 관한 연구 및 실용화가 진행되고 있다. 부상공정과 경사판을 조합한 공정은 Purac사에서 개발하여 LDAF라는 상표로 제품화되었고, 부상공정과 모래여과공정을 조합한 공정은 Purac, Krofta, Ahlstrom사에 의해서 개발되어 Flofilter, Sandfloat, AhiFloat라는 상표로 실용

[†]Corresponding author E-mail: water007@mail.hanyeong.ac.kr

화되었다. 또한, 오존과 부상공정을 결합한 공정은 Ozo-Flotation 및 Flottozone이라는 상표로 실용화되었다. 기존의 장방형 침전지를 개량하여 부상조로 만드는 연구도³⁾ 진행되었으며, 침전의 장점인 고탁도 처리와 부상의 장점인 조류의 처리를 조합하여 기존의 침전지를 개량하는 연구도 활발히 진행되었다⁴⁾.

본 연구는 하·폐수 처리장에서 특히, 혐기성처리를 하는 공정에서 발생하는 이산화탄소를 공기 중으로 배출하는 대신 이를 이용하여 생물반응공정의 전처리 혹은 후처리에서 미세입자를 분리하는데 이용할 수 있도록 하기 위한 새로운 공정(dissolved carbon dioxide flotation, DCF)을 개발하기 위하여 이산화탄소 미세기포를 생성하는 포화기의 최적 운전조건과 부상효율에 영향을 미치는 운전 요소(parameter)의 최적화를 위하여 기존 DAF공정과 비교 연구를 진행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 CO₂ 미세기포에 의하여 일련의 입자분리 실험을 실시하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 실험실 규모(bench scale)로 이산화탄소를 이용한 공기부상 일명, DCF(dissolved carbon dioxide flotation) pilot plant를 제작하여 회분식(batch) 실험을 실시하였다.

포화기(saturator)의 부피는 약 1 L이며, 반응조의 크기는 직경 7 cm의 약 1.5 L의 원형아크릴로 제작하여 실험을 실시하였다. 포화기의 정확한 압력을 가하기 위하여 포화기 상부에 압력계를 설치하였고, CO₂ 주입은 순도 99.9999%의 순수 이산화탄소 가스를 이용하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에서 사용된 시료는 수돗물과 카올린(kaolin)을 섞은 표준인공시료(탁도 40-50

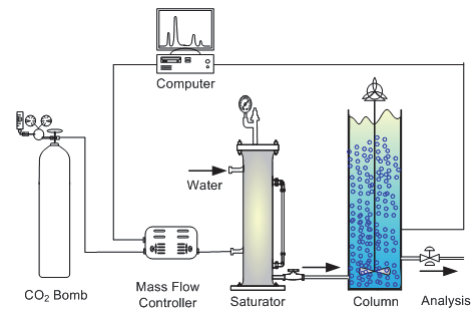


Fig. 1. Schematic diagram of DCF pilot plant.

NTU)를 사용하였으며, 실험에 사용된 약품은 통상 부상처리에 사용되는 폴리염화알루미늄(PACl, poly-aluminium chloride)을 사용하였고, 응집에 요구되는 알칼리도의 보충을 위하여 수산화나트륨(NaOH)을 사용하였다. 응집제 주입은 교반시험(Jar-test)을 걸쳐 확정된 최적 응집제 주입율로 주입하였다. 부상컬럼의 부상시간은 10 min으로 하였으며, 부상이 끝나면 부상컬럼 하단 20% 지점에서 시료를 채취하여 분석하였다.

플록 크기와 표면전하는 Zeta potential & particle size analyzer(ELS-6000, USA)를 이용하여 측정하였다. 부상효율은 부상 전 후의 탁도 농도차이로 분석하였으며, 탁도는 탁도계(HACH, 2100P)를 사용하였으며, 0-200 NTU의 표준용액으로 보정시킨 후 2차 표준액으로 확인 후 탁도를 측정하였으며 측정셀(cell)내의 기포생성에 주의하며 셀을 흔들어 준 이후 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 포화기의 최적 운전 조건

3.1.1. 포화기 압력이 부상효율에 미치는 영향

미세기포 발생기인 포화기(Saturator)의 압력변화에 따른 부상컬럼의 고형물 제거효율을 살펴보고, 가압조의 최적압력조건을 알아보기 위하여 포화기의 압력을 1.0-3.0 atm까지 증가시켜 실험을 실시하였다.

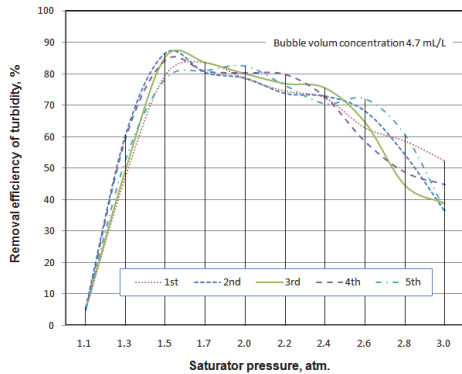


Fig. 2. Flotation efficiency on the saturator pressure.

그 결과, Fig. 2에서 1.5 atm에서 가장 좋은 제거효율을 보였으며, 1.5 atm을 초과하면서 지속적으로 제거효율이 감소하는 경향을 나타내었고 2 atm을 초과하면서 부터는 제거효율이 평균 80% 이하로 크게 감소하는 결과를 나타내었다.

3.1.2. 포화기 압력이 미세기포의 크기에 미치는 영향

DAF공정은 포화기의 가압수에 공기를 포화시키기 위하여 포화기 압력을 통상적으로 4-6 atm으로 조절하여 공기를 용해하며, 포화기의 압력이 3.5 atm 이상에서는 기포의 크기가 더 이상 감소하지 않으며, 포화기 압력이 4 atm에서 평균 기포 직경은 약 30 μm 정도로 알려져 있다⁵⁾.

그러나, DCF에서 포화기(saturator) 압력 변화에 대한 기포의 크기변화를 측정한 결과, Fig. 3에서와 같이 DCF는 DAF와 달리 압력이 증가함에 따라 CO_2 기포 크기는 지수적으로 증가(exponential growth)하였다.

DAF와 DCF의 압력변화에 따른 기포의 직경의 증가 추세의 차이는 DCF공정의 부상효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다.

3.1.3. 포화기 압력이 기포체적농도(bubble

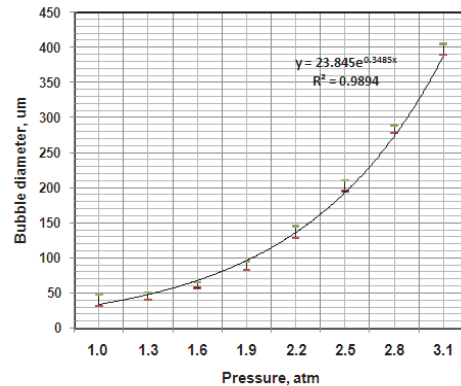


Fig. 3. CO_2 bubble diameter by variation of saturator pressure.

volume concentration)에 미치는 영향

수온은 평균 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 실시하였으며, 포화기 압력(saturator pressure)은 포화기에서 생성된 CO_2 기체가 부상컬럼 가압수에 과포화되어 가압수가 채워지지 않은 공간에 CO_2 기체가 육안으로 확인될 수 있는 정도의 충분한 시간동안 주입하였다. 부상컬럼의 부피 1 L의 10%(100 mL)의 가압수를 부상컬럼에 주입하여 기포 체적 농도 (Bubble Volume Concentration, BVC))를 측정하였다.

일반적으로 DAF공정에서 이용되는 포화기의 압력은 4.0-5.0 atm, 순환비는 7-30% 범위이며 기포체적농도 1-10 mL-air/L-water가 통상 사용되며⁶⁾, 기포체적농도는 DAF는 포화기의 압력에 비례하여 증가는데⁷⁾, DCF의 경우는 Fig. 4에서와 같이 기포체적농도(BVC)는 포화기의 압력이 1.5 atm에서 최대치를 보였으며, 그 이상의 압력에서는 오히려 감소였다. 본 실험에서 같은 포화기를 이용한 결과, DAF의 경우 4 atm에서 약 7 L/m^3 의 BVC를 나타낸 반면, DCF의 경우 최대 BVC는 1.5 atm의 포화기 압력에서 약 5.4 L/m^3 로 DAF보다 낮은 수치를 보였다.

DCF의 경우 실제로, 2 atm이상의 압력에서는 거대기포(macro-bubble)가 유관으로 확

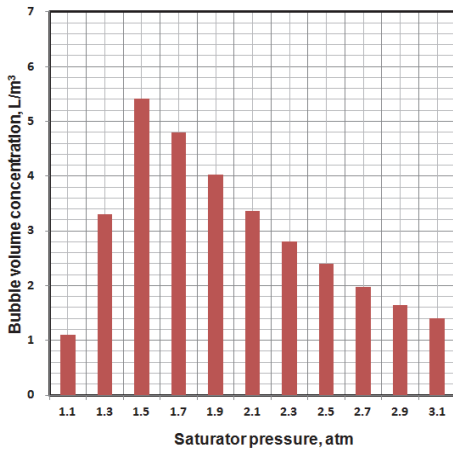


Fig. 4. Variation of BVC in terms of saturator pressure.

인되었으며 이 때문에 BVC가 낮아 졌다. 거대기포의 생성원인은 이산화탄소와 공기의 물리적 조성 차이에 따른 표면장력의 차이 때문으로 이산화탄소 기포의 표면장력이 공기 기포의 표면장력보다 작기 때문이다.

3.1.4. 최적 포화기 압력에서 미세기포의 크기

부상컬럼에 깨끗한 증류수를 넣은 상태에서 포화기에서 만들어진 포화수(saturated water)를 순간적으로 주입시키면, 주입과 함께 발생하는 미세한 CO₂ 기포들은 군집을 이루면서 서서히 퍼져 부상하게 되며 이 모양이 구름처럼 나타나므로 이를 통상 ‘bubble cloud’ 혹은 ‘milky water’ 라고 한다. 이 CO₂ bubble cloud의 부상속도는 부상 컬럼의 상단과 하단 그리고 중앙부의 이동속도를 각각 측정 측정하여, 기포의 입경과 그 분포를 Stoke's law에 의하여 계산하여 CO₂ 미세기포의 크기를 제시하였다. 실험의 측정오차를 줄이기 위하여 10회(A-J) 반복 실시하였다.

Bubble cloud의 각 층에서 측정된 기포의 입경은 70.1-186.6 μm 의 범위를 나타내었으며, bubble cloud의 중앙부분의 기포 입경은 107.1 μm 로 계산되었다. 아울러 수표면으로 방출되는 기포의 체적을 기초로 계산된 CO₂

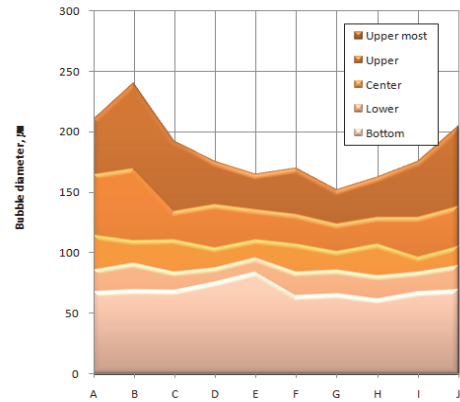


Fig. 5. Bubble diameter for five layers of CO₂ bubble cloud in flotation column.

bubble의 평균 입경은 120.5 μm 로 나타났으며, 기포 체적을 발생기포의 개수로 나타내어 계산된 기포개수의 분율(fraction)로 계산된 기포의 평균 입경은 95.8 μm 로 나타났다. 이 값은 일반적인 DAF의 평균 입경범위인 30-40 μm 에 비하여 다소 큰 값에 해당한다⁸⁾.

3.2. DCF 부상효율 제고 방안에 대한 제언

3.2.1. 전처리 응집과정에서 플록의 크기

Fig. 1에서 DCF의 부상효율은 최적 포화기 압력 조건 1.5 atm에서 85.5%를 나타냈으며, 이것은 DAF의 보편적인 부상효율 95%정도에 비해 낮은 효율을 보인다. 그래서, SCCE모델⁹⁾을 기초로 한 부상효율 예측모델^{10,11)}를 이용하여 플록의 크기 변화에 대한 DAF와 DCF의 부상효율에 대하여 시뮬레이션(simulation)을 통해 비교 분석하였다.

Fig. 6의 시뮬레이션 결과에서도 동일한 플록의 크기에서 DAF와 DCF의 부상효율을 비교한 결과 DAF가 DCF에 비하여 부상효율이 높음을 알 수 있으며, 플록의 크기가 90 μm 이상일 경우에는 두 공정 사이에 부상효율의 차이가 없이 98-99% 이상의 효율을 달성할 것으로 예측되었다.

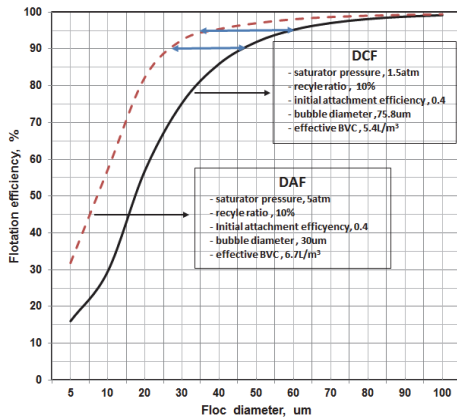


Fig. 6. Simulation on flotation efficiency of DAF and DCF in terms of floc diameter.

DAF공정에서 10-30 μm 정도의 플록 크기에서 충분한 부상효율을 달성할 수 있으며¹²⁾ 플록의 크기가 클수록 부상효율은 증가한다 하였다¹³⁾.

Fig. 6에서 DAF 시뮬레이션 결과 역시 Edwald¹²⁾와 Mally¹³⁾의 결과를 확인할 수 있으며, DAF와 DCF의 부상효율은 공통적으로 95% 정도의 부상효율을 나타내는 플록의 크기는 기포 크기와 거의 같거나 약간 큰 크기 ($D_f/D_b \approx 1$)일 때임을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 Han¹⁴⁾의 결과와 일치하였다.

결론적으로 DCF의 부상효율을 제고하기 위한 플록 크기는 DAF에 비해 크게 형성하도록 하여야 하며 응집과정에 있어서 응결(flocculation) 시간을 DAF에 비해 좀 더 연장하여야 할 것으로 판단된다. 그러나 응결시간의 연장은 DAF에 비해 부상분리 공정 효율성을 떨어뜨리기 때문에 근본적인 해결책인 CO₂ 기포의 크기 작게 형성하는 방안의 모색이 필요할 것으로 사료된다.

3.2.2. 부상조 순환비(recycle ratio)

DAF공정에서 부상효율이 90% 이상 달성하기 위한 통상적인 DAF의 부상조의 순환 비는 5-10%로 운전한다.

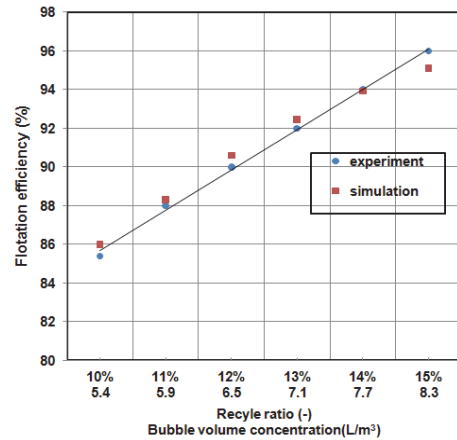


Fig. 7. The effect of flotation efficiency on the variation of recycle ratio.

본 연구에서 포화기의 압력을 1.5 atm에서의 부상효율을 측정한 결과 Fig. 7에서 90% 이상의 부상효율을 달성하기 위해서 DCF 순환비 운전 조건은 약 13% 이상으로 운전해야 함을 알 수 있었으며, 이것은 DAF 비해 최소 3%에서 최대 8% 이상 순환비를 높여야 함을 알 수 있다.

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) DCF의 미세기포의 직경은 포화기 압력이 증가함에 따라 지수성장(exponential growth)의 경향을 나타내었으며, 이로 인하여 DAF공정보다 DCF 공정이 포화기 압력에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.
- 2) 포화기 압력이 1.5 atm에서 최대 기포체 적농도(BVC)와 최대 부상효율을 보였다. 이로 인해, DCF의 포화기의 최적 운전조건은 1.5 atm임을 알 수 있었다.

- 3) DAF공정보다 부상효율의 저하의 원인은 포화기의 최적 압력조건(1.5 atm)에서 생성된 기포체적농도는 DAF에 비해 떨어지며, 미세기포의 평균 직경이 DAF공정에서 보다 크게 형성되기 때문이다.
- 4) DCF 공정이 보편적인 DAF와 동일한 수준의 부상효율을 달성하기 위한 최전운전조건은 순환비를 DAF보다 3-8%정도 상향 조정하여 운전하여야 하며, 응집과정에서 생성된 플럭의 직경을 미세버블의 직경과 비슷하거나 더 크게 형성되어야 함을 알 수 있었다.
- 5) 본 연구를 통해서 이산화탄소 기포를 이용한 DCF 공정은 온실가스인 이산화탄소를 저감하고, DCF의 포화기 압력이 DAF보다 낮게 운전되기 때문에 DAF보다 높은 경제성을 가진 공정으로 판단된다.
- 6) 앞으로, DAF공정에 비해 DCF의 부상효율이 저하되는 근본적인 원인은 미세기포의 직경이 DAF보다 크게 형성되기 때문으로 순환비의 증가와 응집시간의 연장과 같은 운전변수의 최적화보다 미세기포의 크기를 보다 작게 형성할 수 있도록 하는 연구가 필요하다.

References

1. Kawamura, S., 1991. Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment. J. AWWA. 10, pp. 88-91.
2. McGrawite, Jr. F. J., Cassell, E. A. and Matijević, E., 1972, The microflotation of silica, Journal of Colloid and Interface Science, 39(2), pp. 357-366.
3. 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), pp. 327-340.
4. 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.
5. 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), pp. 77-83
6. Malley, J. P. and Edzwald, J. K. (1991a), Laboratory Comparison of DAF with Conventional Treatment, Journal of AWWA, Vol.83, No.9, pp. 56-61
7. Kwak, D. H. and Dockko, S. (2003), Effect of controlling the of microbubble in DAF. Proceeding of 2nd International Workshop on Flotation, B-5, pp. 157-167.
8. Zabel, T., 1985, Advantages of dissolved-air flotation for water Treatment. J. AWWA. 77, pp. 42-45.
9. Edzwald, J. K. (1995), Principles and Applications of Dissolved Air Flotation, Water Science Technology, 31(3-4), pp. 1-23.
10. Okada, K., Akagi, Y., Kogure M., Yoshioka, N (1990), Analysis of particle trajectories of small particles in flotation when the particles and bubbles are both charged, The Canadian journal of Chemical Eng., 68, pp. 614-621.
11. Baeyens, J., Mochtar, I. Y., Liers, S., and De Wit, H. (1995), Plugflow Dissolved Air Flotation, Water Environment Research, Vol.67, No.7, pp. 1027-1035.
12. Edzwald, J. K and Walsh, J. P. (1982), Dissolved Air Flotation : Laboratory and Pilot Plant Investigations, AWWA Research Foundation and AWWA, U.S.A.
13. Malley, J. P., and Edzwald, J. K. (1991b),

- Conceptual Model for Dissolved-Air Flotation in Drinking Water Treatment, Journal of Water SRT-AQUA, Vol.40, No.1, pp. 7-17.
14. Han, M. Y., Park, Y. H., kwak, D. H., & Kim, I. K.(2001b), Development of measuring bubble size in flotation process using on-line particle counter, Journal of KSWW., Vol.15, No.6, pp. 559-565.