

고분자 중공사막 모듈을 이용한 미세기포 발생과 이미지 분석기법을 이용한 기포 특성 파악

Utilization of Image Analysis Technique for Characterization of Micro-Bubbles Generated by Polymeric Membrane Module

김준영 · 장인성*[†]

Jun-Young Kim · In-Soung Chang*[†]

호서대학교 반도체 디스플레이 공학과 · *호서대학교 환경공학과
Department of Semiconductor and Display Engineering, Hoseo University

*Department of Environmental Engineering, Hoseo University

(2010년 10월 27일 접수, 2011년 6월 26일 채택)

Abstract : In this study, the polymeric membrane module is used as a diffuser and an image analysis technique based on visual information is applied to get bubble characteristics. The bubble size generated passed through polymeric membrane module was smaller from 30 to 64% than that of air stone, and bubble volume over 70% was ranged from 0.2 to 0.82 mm. But over 80% the bubbles from air stone diffuser ranged from 0.77 to 1.08 mm. The air stone and polymeric membrane module used as diffuser for a flotation system. The floc size inside the flotation reactor using air stone diffuser was bigger than that of the polymeric membrane module, which means that the micro-bubbles generated from polymeric membrane module could provide better opportunities for collisions between colloidal particles than those from air stone diffuser. Therefore, there is a possibility to apply the polymeric membrane module as a diffuser to increase the removal efficiency in the flotation process. Also, the image analysis technique used in this study could be applied as a useful analytical tool for acquisition of an information about the bubble characteristic.

Key Words : Flotation Process, Image Analysis Technique, Polymeric Membrane Module, Micro-bubble

요약 : 본 연구에서는 고분자 중공사막 모듈을 산기 도구로 사용하여 미세 기포 발생을 도모하였고 영상정보를 기반으로 하는 이미지 분석 기법을 적용하여 발생한 기포 특성을 파악하고자 하였다. 기포의 이미지 분석 결과, 고분자 중공사막 모듈을 통해 수중에 분사된 기포는 산기석을 통한 기포보다 약 30~64% 작은 크기로 발생되는 것을 관찰하였고, 기포의 70% 이상이 0.2~0.82 mm 범위에 분포된 반면, 산기석의 경우는 0.77~1.08 mm의 범위에 속한 기포가 80% 이상이었다. 산기석과 고분자 중공사막모듈을 각각 기포발생 장치로 사용한 부상조를 운영하였을 때 반응조에 잔존하는 플록의 크기는 산기석을 이용했을 때가 고분자 중공사막 모듈의 경우보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 고분자 중공사막 모듈에 의해 발생한 미세기포가 충돌 효율의 증가 때문에 크기가 작은 콜로이드 입자들까지 응집/부상할 수 있는 기회를 제공하였기 때문이다. 따라서 부상공정에 고분자 중공사막모듈을 산기장치로 활용하였을 경우 응집부상 제거효율이 증가할 수 있는 가능성을 보였다. 또한 본 연구에서 사용한 이미지 분석기법은 제공된 영상정보를 기반으로 기포의 기초 특성들과 관련된 정보습득을 위한 분석도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 부상공정, 이미지분석기법, 고분자 중공사막 모듈, 미세기포

1. 서론

부상분리는 수중에 확산되는 기포에 오염물질을 부착 혹은 포집하여 수면으로 부상시켜 분리하는 공정으로 조류와 휴믹물질 같은 저밀도 입자가 포함된 원수와 상대적으로 크기가 작은 입자상 물질의 분리를 위해 사용되는 수 처리 공정이다.¹⁾ 부상공정의 중요한 운영요소 중 하나는 수중에 확산되는 기포 크기를 감소시켜 표면적을 증가시킴과 동시에 수많은 기포들을 수중에 확산시켜 기포와 입자들 간의 충돌기회를 증가시키는 것이다.²⁾ 이를 위해 가압공기부상, 전기부상공정, 노즐부상공정, 그리고 컬럼(column)부상공정 등 기존의 다양한 처리 공법들이 처리대상물질에 따라 적절하게 적용되고 있다.^{3,4)}

하지만, 이러한 공정의 효율성 증대를 위해서는 기포 크기의 제어와 함께 낮은 에너지를 필요로 하는 공정개발과 관련된 연구뿐만 아니라 수중에 확산되는 기포들의 특성을 파악하기 위한 연구들도 수반되어야 한다. 이는 기포의 크기 및 확산 등과 같은 메커니즘의 이해를 통해 운전적인 측면에서 좀 더 효율성을 높일 수 있기 때문이다.

이를 위해 화상분석과 입자계수기(particles counter) 등의 분석 기술들을 활용하여 필요한 정보들을 얻는 사례가 보고된 바 있다.⁵⁾ 또한 최근 들어 이러한 기술 이외에 많은 연구자들이 초고속 카메라를 이용하거나 전단력 측정과 같은 방법들을 통해 기포의 크기나 유량 변화에 따른 빈도 수 측정을 통해 정량적인 정보들을 얻기도 한다.⁶⁻⁹⁾ 그러나 수중에서 발생하는 기포의 불규칙한 유동성과 형태는 기포의

[†] Corresponding author E-mail: cis@hoseo.edu Tel: 041-540-5744 Fax: 041-540-5748

기초적 특성인 기포크기 및 확산분포의 측정을 어렵게 하는 단점이 존재한다.

한편 위에 언급된 기술 이외에 이미지 분석(image analysis) 기법을 적용해 볼 수 있다. 이는 관찰하고자 하는 대상을 현미경이나 카메라를 통해 얻은 이미지를 분석 프로그램을 이용하여 영상정보를 기반으로 다양한 정보들을 습득하는 것으로 상대적으로 짧은 시간 안에 원하는 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 부상공정에서 발생하는 기포들의 다양한 특성들과 관련된 정보습득을 위해 이미지 분석기법이 적용되었다. 이는 이미지 분석 프로그램을 적용하여 얻는 영상정보들을 바탕으로 기포크기와 개수, 그리고 크기 분포도 등과 같은 정량화 된 수치를 이용하여 기포의 특성을 파악할 수 있기 때문이다. 이를 위해, 본 연구에서는 부상공정의 기포 발생을 위해 고분자 중공사형 분리막 모듈과 산기석을 각각 산기장치로 활용하였다. 이는 고분자 중공사형 분리막 모듈이 가지고 있는 특성을 이용해 기포 크기 변화에 따라 발생하는 상대적인 차이를 비교함에 있어 적합하다고 판단되었기 때문이다.

2. 연구 방법

2.1. 시료선정 및 플록 형성 실험

부상실험에 사용되어진 원수는 충남의 S호에서 채취하였으며, 대상 시료의 특성을 Table 1에 나타내었다. 실험실로 운송된 시료는 GF/C 여과지로 여과 한 후 실험기간 동안 4°C에서 저장하여 사용하였다. 그리고 자-테스트를 이용하여 시료의 적절한 플록 크기를 유도하기 위해 주입되는 응집제 농도를 결정하였다. 응집실험은 총 6개의 500 mL 비커에 시료 300 mL와 서로 다른 농도의 응집제를 주입한 후 급속교반(250 rpm) 5분과 30분의 완속교반(60 rpm)을 하여 다양한 크기의 플록을 형성하게끔 하였다. 형성된 플록의 크기 및 입도 분포도는 입도분석기(HELOS, SYMPA-TC, Germany, 0.5~350 μm range)를 이용하여 분석하였으며, 실험

Table 1. water quality of the sample in used this study

pH	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	Chlorophyll-a (mg/m ³)	COD (mg/L)	Conductivity (μs/cm)	TDS (mg/L)
7.59	50	4.93	41.3	18.1	161.3	77.8

에 사용된 응집제는 무기고분자응집제인 폴리염화알루미늄(PACl : Poly aluminum chloride)이었다.

2.2. 이미지 분석기법을 이용한 기포의 기초적 특성 관찰

기포의 기초 특성들을 파악하기 위해 이미지 분석 기법을 적용하였다. 부상공정에서 발생된 기포의 이미지를 분석하기 전에 장방형 반응조에 표시된 눈금을 촬영 한 이미지를 이용해 이미지 프로그램의 픽셀 크기를 교정하였다. 이후 초순수가 채워진 동일한 반응조에 기포의 특성을 상호 비교하기 위해 분리막과 산기석을 설치하였고, 기공을 통과하면서 확산되는 기포를 동일한 거리와 높이에 고정시킨 디지털 카메라를 이용하여 분석하고자 하는 이미지를 취득하였다.

이미지 분석을 위해 Image-Pro[®]Plus (Image-Pro[®]Plus Version 4.0 for Window[™], Media Cybernetics, USA) 프로그램이 사용되었으며, 이 프로그램은 일련의 이미지 처리(Image processing) 과정을 거쳐 관찰하고자 하는 대상에 프로그램에서 제공하는 분석 도구들을 활용하면, 촬영된 이미지에 대해 다양한 정보를 습득할 수 있다. 이는 촬영된 이미지의 정보들을 컴퓨터가 인식할 수 있는 디지털 형태의 정보로 변환시켜 명도(brightness), 대비(contrast), 그리고 감마(γ)계수 보정 등과 같은 이미지의 명암조절과 관련된 기능들을 적용하여 일정한 필터링 과정 후 이미지의 해상도를 향상시켜 보다 더 정확한 정보를 습득할 수 있게 한다.

Fig. 1에 산기석과 고분자 중공사형 분리막 모듈을 통해 수중에 분사된 기포들이 촬영된 이미지에 일련의 이미지 처리 과정을 적용시켜 변화되는 이미지를 나타내었다(Fig. 1-ii). 이러한 이미지에는 다양한 크기를 가지는 기포들이 존재하기 때문에 비슷한 크기별로 분류할 필요가 있다. 이는 기포들의 다양한 크기분포와 관련하여 세분화된 분포도의 정량적인

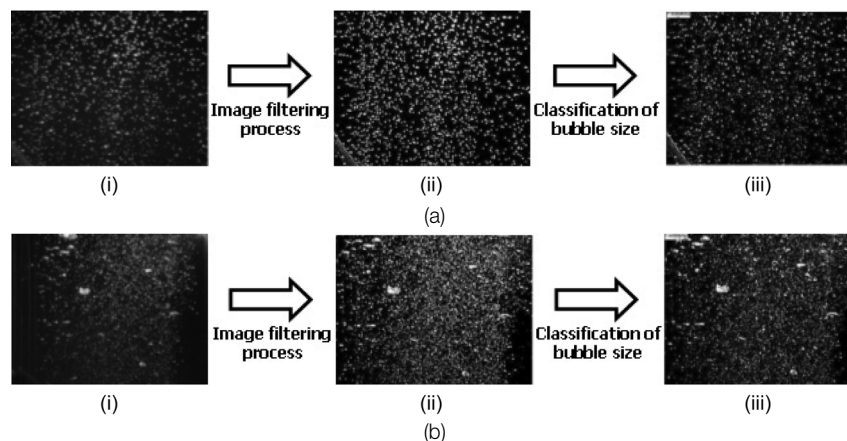


Fig. 1. Image processing of the pictures: (a) Air stone diffuser (b) membrane module.

데이터들을 얻기 위함이다. 이를 위해 불필요한 이미지들은 제거하고, 측정하고자 하는 대상의 이미지들을 배경이미지에서 추출하였다. 그 후, 이미지들에서 비슷한 크기의 범위에 존재하는 기포들을 이미지 분석 프로그램에서 제공되는 적절한 도구들을 활용하여 동일한 색상별로 군집화시켜(Fig. 1-iii) 각각의 군집(Cluster)에 포함된 기포의 개수와 기포의 평균 반지름, 그리고 크기에 따라 분류된 각각의 군집에 포함되는 기포들이 차지하는 비율 등의 정보들을 비교하였다. 기포의 크기별 군집 산정은 측정하고자 하는 기포들의 각 개체의 중심픽셀과 외곽사이의 종횡비(Aspect ratio)를 기준으로 계산되었으며, 지정된 군집 번호(1~5)의 증가는 그 군집의 측정개체의 크기가 큰 것을 의미한다. 이 때, 각각의 산기기에서 발생한 기포 크기의 차이 때문에 동일한 범위의 선정을 통한 비교 대신에 수많은 군집 중 각각의 산기기에서 차지하고 있는 대표적인 범위를 선정하여 비교하였다.

2.3. 부상공정

Fig. 2는 부상실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이며, 부상실험을 위한 기포발생을 위해 6 L 반응조 하부에 각각 설치된 고분자 중공사막 분리막 모듈과 산기석에 질소(N₂) 실린더와 유량계를 연결하여 공급하였다. 반응조 내 유량공급 시 고분자 중공사막 분리막 모듈과 산기석이 가지고 있는 서로 다른 기공도는 균일한 유량 공급을 방해하기 때문에 유량계에 압력게이지를 연결하여 운전기간 동안 변화되는 압력 수치를 조절하여 두 반응조 내의 가스 유속과 운전압력을 각각 1.5 LPM과 30 Kpa로 유지하며 실험을 진행하였다. 실험실에서 일반적으로 사용되는 산기석과의 비교실험을 위해 산기기로 사용된 고분자 중공사막 분리막 모듈은 0.4 μm의 기공을 가지는 정밀여과막으로 반응조 내 기포의 균일한 확산을 위해 U 형태로 제작되었다(Table 2).

부상실험은 자-테스트를 통해 농도가 결정된 응집제 주입량을 부상 반응조로 주입하면서 1시간 동안 수행하였다. 운전 종료 후 부상된 플록과 반응조 내부에 존재하는 플록의 분포도를 상호 비교하기 위하여 반응조의 수면과 중간 지점에서 각각 샘플링을 한 후, 입도분석을 수행하였다.

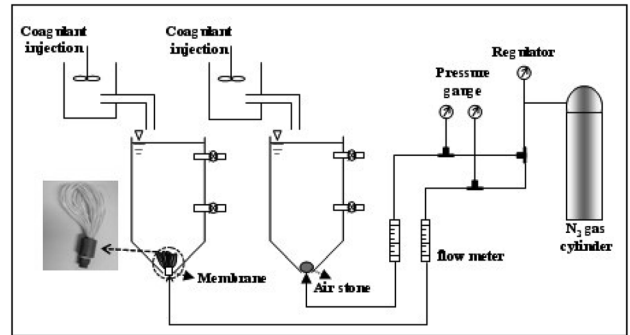


Fig. 2. Schematic diagram of experimental set-up for the air flotation.

Table 2. Characteristics of membrane module used in the air flotation

Material	PVDF (Polyvinylidene difluoride)
Type of module	U-shaped Hollow fiber
Nominal pore size (μm)	0,4
Effective surface area (m ²)	0,05

3. 결과

3.1. 이미지 분석기법을 이용한 기포의 기초 특성 관찰

이미지 분석 프로그램을 이용하여 기포의 기본 특성을 파악한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 노즐로 사용된 산기석(a-ii)과 고분자 중공사막 분리막 모듈(b-ii)을 통해 분사된 기포의 크기나 그 수에서 뚜렷한 차이가 남을 시각적으로 알 수 있다.

그러나 이러한 이미지로만으로는 기포의 특성을 정량적으로 파악할 수 없다. 따라서 일련의 필터링 과정 후 기포 크기별로 군집시켜 얻은 영상정보(iii)를 바탕으로 수중에 확산되는 기포의 특성과 관련된 정량적인 데이터를 얻었다.

Table 3은 각각의 고분자 중공사막 분리막 모듈과 산기석을 이용해 발생한 다양한 기포들을 각각 비슷한 크기별로 군집시켜 나타낸 것이다. 크기가 가장 작은 기포가 속해 있는 군집 1을 한 예로 볼 때 고분자 중공사막 분리막 모듈

Table 3. Classification of bubble clusters passed through polymeric membrane module and air stone

Cluster	Polymeric membrane module				Air stone			
	Mean radius		Objects		Mean radius		Objects	
	mm	%	number	%	mm	%	number	%
1	0,20	9,6	756	29,0	0,77	43,7	738	55,4
2	0,54	33,6	804	30,8	1,08	33,8	410	30,8
3	0,82	26,9	667	25,5	1,47	15,8	141	10,6
4	1,27	29,9	383	14,7	1,99	6,2	41	3,0
5	-				2,60	0,5	3	0,2
Total	-		2,710	-	-		1,333	-
-	Minimum size				Maximum size			
Membrane	-		0,05	-	-		0,41	-
Air stone	-		1,7	-	-		3,03	-

을 통해 수중에 분사된 기포의 크기는 0.2 mm이며, 산기석은 이보다 약 30% 큰 0.77 mm의 기포 크기를 보였다. 그리고 이 크기와 유사하게 형성된 기포의 개수는 각각 756과 738개이었다. 또한 전체 균집을 기준으로 이 균집에 포함된 기포들이 차지하고 있는 비율은 고분자 중공사형 분리막 모듈과 산기석이 각각 9.6%와 43.7%이었으며, 기포 개수를 기준으로 계산된 상대비율은 각각 29%와 55.4%이었다. 또한 고분자 중공사형 분리막 모듈의 기공을 통해 수중에 확산된 기포들의 약 70% 이상이 0.2~0.82 mm의 범위에 분포되어 있었으며, 산기석의 경우 이보다 64~30% 커진 0.77~1.08 mm 범위에서 약 77%를 차지하였다.

이는 본 연구에서 적용된 산기기 뿐만 아니라 부상공정에서 사용되는 다양한 산기방법에 따라 발생하는 기존의 기포 특성의 이해를 위해 다양하게 시도되었던 방법들,¹⁰⁻¹³⁾ 즉 기포 크기 제어와 제거 효율성, 그리고 현상 해석을 위한 모델링의 적용 등과 같은 방법이 아닌 별도의 측정 장치 없이 이미지 분석 기법의 적용을 통해 제공되는 다양한 수치적인 정보들을 이용함으로써 상대적으로 간편한 분석방법을 통해 정량적인 해석을 가능케 함을 보여 주는 것이다.

또한 이미지 분석 프로그램의 결과들을 기반으로 고분자 중공사형 분리막 모듈과 산기석을 통해 발생한 기포들의 전체 크기 분포도를 Fig. 3에 나타내었다. 고분자 중공사형 분리막 모듈과 산기석의 기공을 통해 각각 발생한 기포의 전체 크기 분포는 상반된 경향을 보이고 있다. 즉 고분자 중

공사형 분리막 모듈의 경우 약 0.2~0.6 mm 크기 범위에 존재하는 기포들의 빈도수가 높은 반면, 산기석의 경우 이보다 크기가 큰 0.6~1 mm 범위에서 높은 빈도수를 나타내었다. 이는 이미지 분석 프로그램의 적용을 통해 동일한 유량과 압력 조건에서 서로 다른 기공 크기를 가지는 산기기로 인해 발생한 기포들의 크기 분포도 표현이 가능함을 보여 주는 것이다.

3.2. 응집-부상공정의 플록 분포도 비교

본 연구는 이미지 분석 기법을 적용하여 얻은 기포의 기본 특성과 관련된 정보 습득을 기반으로 상대적으로 크기가 작은 입자들의 제거를 위해 고분자 중공사형 분리막 모듈을 이용해 기포 크기를 제어함으로써 부상공정에서 산기 장치의 활용 가능성을 알아보았다. 이를 위해 다양한 응집제 농도를 시료에 주입한 후 형성된 플록의 평균입도와 입도 분포도를 원수와 비교하여 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다. 20 mg/L의 응집제 농도를 제외한 다른 응집제 농도 투여 시 형성된 플록의 평균 크기는 원수와 비교 시 큰 편차를 보이지 않았다. 이는 주입되는 응집제의 농도 증가가 충분히 응집이 되지 않은 다른 오염물질을 플록화시켜 데이터 상 그 빈도 수(Frequency)의 변화를 야기할 뿐, 응집된 플록의 크기를 지속적으로 더 증가시키는 것은 아니기 때문이다. 따라서 부상실험에서 미세플록을 유도하기 위한 응집제 농도는 원수와 비슷한 입도 분포도를 보이는 40 mg/L의 응집제 농도를 사용하였다.

결정된 농도로 응집제를 부상조에 주입하면서 생성된 플록의 상대적인 크기 분포도를 알아보기 위해 부상조의 수면과 중간지점에서 각각 샘플링하여 측정된 플록의 평균 입경을 Fig. 6에 나타내었다.

산기석이 노즐로 적용된 부상조 내부 플록의 평균입경은 고분자 중공사형 분리막 모듈을 산기기로 사용한 부상조의 플록보다 작은 값을 나타내었다. 이는 산기석을 통해 분산된 크기가 큰 기포들이 작은 기포를 형성한 고분자 중공사형 분리막 모듈보다 크기가 작은 플록들을 효과적으로 부상시키지 못하였음을 의미한다. 즉, 고분자 중공사형 분리막 모듈이 적용된 부상 반응조 내부에 있는 플록의 평균입경이 상대적으로 큰 것은 미세기공을 통해 분사되는 표면적이 큰 미세기포가 크기가 작은 플록들과의 충돌기회 증가로 인해 반응조 내부에 남아있는 미세플록까지 부상시켰기 때문이다.

Fig. 7은 각각의 부상조 내부에 존재하는 플록크기의 분포도를 나타낸 것이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 1.8~2.6 μm 범위에서 상대적인 크기 차이가 관찰되어, Fig. 8에 이 범위에 포함되어있는 플록 부피를 크기별로 나타내었다. 부상조 내부의 1.8~2.6 μm 범위의 플록 입자 크기를 부피로 나타내었을 때 산기석이 고분자 중공사형 분리막 모듈보다 각각 1.8 μm에서 약 5배, 2.2 μm에서 약 1.5배 그리고 2.6 μm에서는 약 1.1배 큰 수치를 보였다. 이는 고분자 중공사형 분리막 모듈보다 상대적으로 크기가 큰 기포를 발

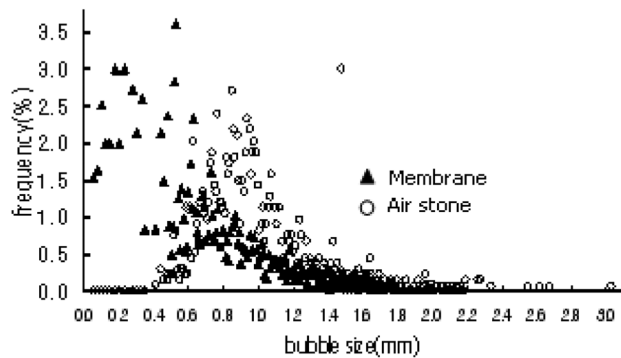


Fig. 3. Distribution of bubble size passed through membrane and air stone.

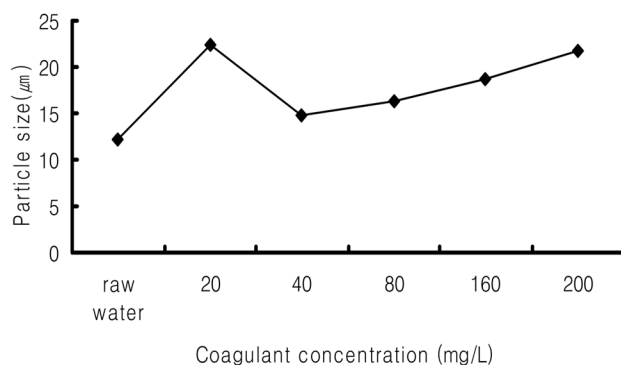


Fig. 4. Average particle size of the floc in various coagulant concentration.

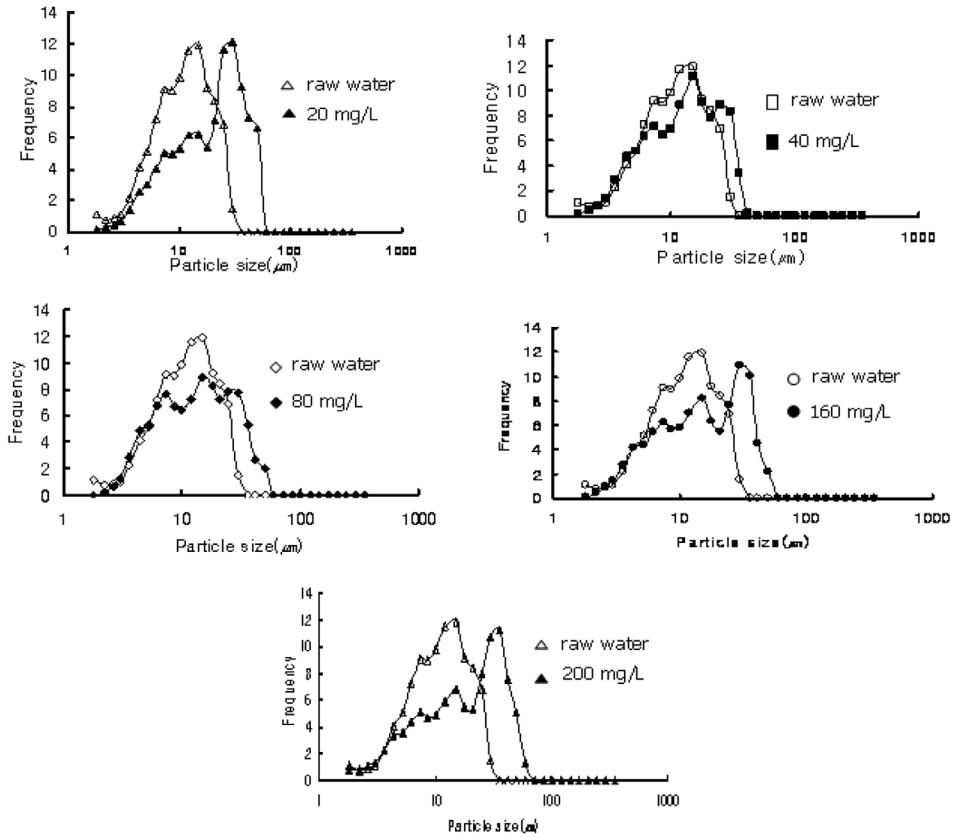


Fig. 5. Particle size distribution at various coagulant concentration.

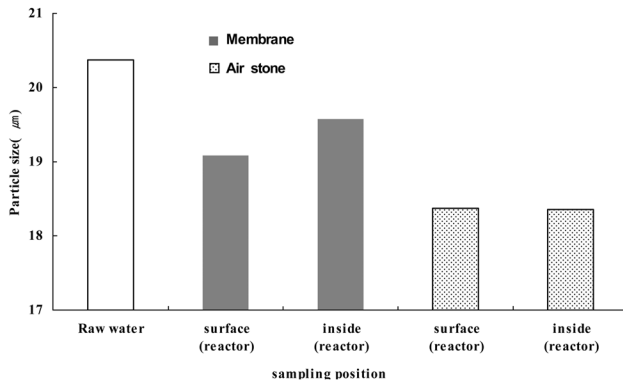


Fig. 6. Average size of the floc in the air flotation.

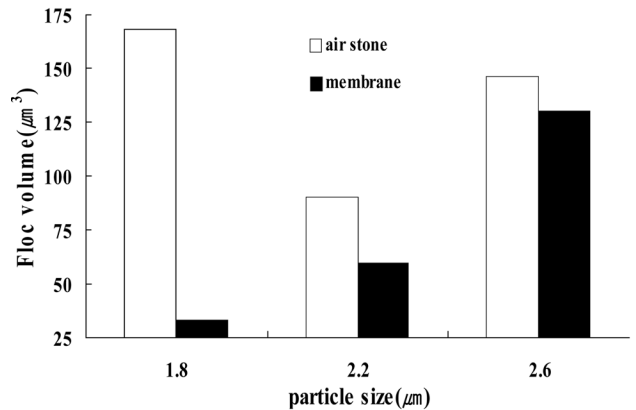


Fig. 8. The floc volume of the inside of the reactor through membrane and air stone at air flotation.

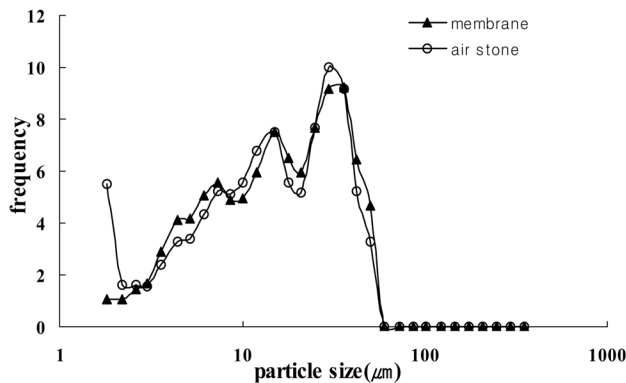


Fig. 7. Floc distribution to the inside of the reactor through membrane and air stone.

생시킨 산기석이 미세한 플록을 부상시키기에는 적합하지 않다는 것을 의미한다. 즉, 부상 공정에서 수중에 분사되는 기포의 개수 증가와 미세화 된 기포들과 플록들의 충돌기회를 증가시키는 것이 부상공정의 핵심¹⁴⁾이라고 볼 때, 미세기공과 다공도를 가지는 고분자 중공사막 분리막 모듈이 표면적이나 개수가 증가된 미세 기포들의 수중 확산이 플록과의 충돌기회 증가를 제공함으로써 반응조 내부의 작은 플록까지 플로오트를 형성하게끔 하여 표면까지 부상시킬 수 있음을 의미한다.

4. 결론

부상공정에서 크기가 작은 미세기포를 발생시키기 위해 고분자 중공사형 분리막 모듈을 산기장치로 사용하였다. 이때, 발생하는 기포의 기본 특성에 대한 정보들은 영상정보를 기반으로 하는 이미지 분석 기법의 적용을 통해 습득하였다. 기포의 이미지 분석 결과 고분자 중공사형 분리막 모듈의 기공을 통과해 발생한 기포들의 크기는 산기석의 경우보다 약 30~64% 감소된 0.2~0.82 mm 범위에 70% 이상이 분포하였다. 반면 산기석은 고분자 중공사형 분리막 모듈보다 0.77~1.08 mm 범위에 형성된 기포가 70% 이상이었다. 산기석과 고분자 중공사형 분리막 모듈을 각각 기포발생장치로 사용한 부상조 내부에 있는 1.8~2.6 μm 범위의 플록 입자 크기를 부피로 나타내어 비교하였을 때 산기석이 고분자 중공사형 분리막 모듈보다 1.8 μm 에서 약 5배, 2.2 μm 에서 약 1.5배, 그리고 2.6 μm 에서는 약 1.1배 큰 것을 확인하였다. 이는 부상공정에 고분자 중공사형 분리막 모듈을 산기장치로 적용하였을 경우 크기가 작은 입자들의 제거효율성을 증대시킬 수 있는 가능성을 의미한다. 결론적으로 본 연구에서 활용한 영상정보를 기반으로 한 이미지 분석 기법은 기포의 기본 특성들과 관련된 정보습득을 위해 유용한 분석도구로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 부상공정의 효율성을 높이기 위한 대안으로 분리막의 적용을 고려해 볼 때 분리막의 장점인 미세기공과 다공도는 미세기포의 발생을 최대화시켜 효율성 증대를 도모할 수 있음을 보여주었으며, 이미지 분석 기법을 기반으로 기포와 관련된 다양한 정보의 습득을 토대로 에너지 효율성과 관련시킨다면 향후 응집부상공정의 기초자료로써 활용가능 할 것으로 사료된다.

사사

이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구(2009-0140)임을 밝힙니다.

KSEE

참고문헌

1. 이창한, 안대명, 김성수, 조석호, 안갑환, "DAF펌프를 이용한 실규모 용존공기부상 공정의 전처리 조건," 대한환경공학회지, **31**(1), 58~63(2009).
2. 박용호, 한무영, "DAF에서 기포크기의 영향," 상하수도 학회지, **17**(4), 528~533(2003).
3. 한무영, 김충일, 박성원, 김하룡, 이관우, 유해운, "DAF에서 맞춤형 기포크기 제조장치의 개발과 응용," 한국수처리학회지, **15**(2), 13~23(2007).
4. Han, M. Y., Kim, M. K. and Ahn, H. J., "Effects of surface charge, micro-bubble size and particle size on removal efficiency of electro-flotation," *Water Sci. Technol.*, **53**(7), 127~132(2006).
5. 한무영, 김충일, 박성원, "플록과 기포의 크기가 DAF 공정의 효율에 미치는 영향," 한국수처리학회지, **15**(1), 11~16(2007).
6. Lu, Y., Ding, Z., Liu, L., Wang, Z. and Ma, R., "The influence of bubble characteristics on the performance of submerged hollow fiber membrane module used in micro-filtration," *Sep. & Purif. Technol.*, **61**, 89~95(2008).
7. Drews, A., Prieske, H., Meyer, E. L., Senger, G. and Kraume, G. M., "Advantageous and detrimental effects of air sparging in membrane filtration: Bubble movement, exerted shear and particle classification," *Desalination*, **250**, 1083~1086(2010).
8. Yamanoi, I. and Kageyama, K., "Evaluation of bubble flow properties between flat sheet membranes in membrane bioreactor," *J. Membr. Sci.*, **360**, 102~108(2010).
9. Liu, N., Zhang, Q., Chin, G. L., Ong, E. H., Lou, J., Kang, C. W., Liu, W. and Jordan, E., "Experimental investigation of hydrodynamic behavior in a real membrane bio-reactor unit," *J. Membr. Sci.*, **353**, 122~134(2010).
10. Zhang, K., Cui, Z. and Robert, W. F., "Effect of bubble size and frequency on mass transfer in flat sheet MBR," *J. Membr. Sci.*, **332**, 30~37(2009).
11. Rodrigues, R. T. and Rubio, J., "New basis for measuring the size distribution of bubbles," *Minerals Eng.*, **16**(8), 757~765(2003).
12. French, K., Guest, R. K., Finch, G. R. and Haas, C. N., "Correlating cryptosporidium removal using dissolved air flotation in water treatment," *Water Res.*, **34**(16), 4116~4119(2000).
13. Dupre, V., Ponasse, M., Aurelle, Y. and Secq, A., "Bubble formation by water release in nozzles-I. Mechanisms," *Water Res.*, **32**(8), 2491~2497(1998).
14. Ponasse, M., Dupre, V., Aurelle, Y. and Secq, A., "Bubble formation by water release in nozzles-II. Influence of various parameters on bubble size," *Water Res.*, **32**(8), 2498~2506(1998).