

공기부상법을 이용한 활성슬러지의 부상분리 특성

Thickening Characteristics of Activated Sludge by Air Flotation Process

박찬혁¹ · 홍석원^{1,2} · 맹주원^{1,3} · 이상협¹ · 최용수^{1,*} · 문성용⁴

Chanhyuk Park¹ · Seok-won Hong^{1,2} · Juwon Maeng^{1,3} · Sanghyup Lee¹ · Yong-su Choi^{1,*}
Seong-yong Moon⁴

- 1 한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터
- 2 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부
- 3 서울시립대학교 도시과학대학 환경공학부
- 4 엔바로테크(주) 부설연구소

(2006년 8월 17일 논문 접수; 2006년 10월 12일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Air flotation is a solid-liquid separation process that utilizes up-flow microbubbles to thicken activated sludge and enhance clarification efficiency. Continuous air flotation experiments were performed to investigate the effect of operation parameters such as initial MLSS (mixed liquor suspended solid) concentration, air pressure, surface loading rate, air to solid (A/S) ratio, and flotation time on thickening efficiency. An initial activated sludge concentration ranged from 3,000 to 12,000mgSS/L and thickened sludge concentration varied from 6,400 to 28,100mgSS/L. The result showed that the thickening efficiency was mainly dependent on surface loading rate, A/S ratio, and flotation time. The pressure did not affect the thickening efficiency when it kept in the range of 1.6 to 1.8 bar. Experimental results showed that the thickening efficiency of activated sludge was increased only when the feed sludge concentration exceeded 5,000mgSS/L and the thickened concentration was over 20,000mgSS/L. At this time, SS concentration in the clarified liquid was ranged from 5 to 10mg/L.

Key words: Air flotation, A/S ratio, Air pressure, Flotation time, Initial MLSS concentration, Surface loading rate

주제어: 공기부상법, A/S비, 공기압, 부상시간, 초기 MLSS 농도, 표면부하율

*Corresponding author Tel: +82-2-958-5834, FAX: +82-2-958-5839, E-mail: yschoi@kist.re.kr (Choi, Y.S.)

1. 서 론

고도처리시설로의 개량(retrofitting)은 기존 활성슬러지 공정 운영으로 제거가 어려운 질소, 인을 제거하고, 점차 강화되고 있는 방류수 수질기준을 대비하여 설치사업이 활발히 진행 중이다. 최적의 고도처리 공정을 선택하기 위해서는 제거대상 오염물질, 처리 성능, 목표수질, 슬러지 발생량, 운전 및 유지관리 용이성 등이 중요한 운영인자로 고려되며, 최근에는 고도처리시설의 문제점으로 지적되어 왔던 경제성 및 부지사용 측면의 검토가 부각되고 있다. 대부분의 하수처리장 개량시, 기존 활성슬러지 공정의 호기조를 다양한 방식의 BNR(biological nutrient removal) 공정으로 개선하고 있으나, 중력식 침전조에 대한 시설개량 시도는 진행되고 있지 않다. 현재 사용되고 있는 중력식 침전조는 BNR공정으로의 개량시, 생물반응조의 활성슬러지 농도를 적절히 조절하거나 고농도로 유지하기 어렵다. 또한, 간헐적으로 발생하는 슬러지 팽화현상(sludge bulking)이나 침전과정에서 탈질에 의해 발생하는 질소가스에 의한 슬러지 재부상과 이에 따른 고액분리 효율의 저하 및 활성슬러지의 과다 유실 문제는 중력 침전에서 가장 대처하기 곤란한 사항이다.

한편, 부상분리공정은 중력 침전과는 반대로 상향으로 발생하는 미세기포를 이용하여 슬러지를 포함한 고형물질을 부상시켜 상부에는 농축 슬러지 층을 형성하고 하부에는 처리수 층을 형성시킴으로써 고액분리를 하게 된다(Dockko and Han, 2004; Edzwald, 1995). 이는 고농도 농축슬러지(MLSS 20,000mg/L 이상)를 확보하여 생물반응조를 고농도(MLSS 5,000~8,000mg/L)로 유지할 수 있으며, 고액분리 시간을 단축하여 부지면적을 획기적으로 줄일 수 있는 공정이다. 슬러지의 부상을 위해서는 미세 기포의 크기가 40~100 μ m 정도에서 가능한 것으로 알려져 있으며(AWWA, 1999; Omata et al., 2006; Valade et al., 1996) (Fig. 1), 이러한 미세 기포의 발생이 가능한 부상분리공정의 예는 단위공정(농축조)으로서 용존공기부상(DAF: dissolved air flotation) 공정이 상용화되어 있으며(Han et al., 2001), 전극판을 이용하여 미세 기포를 발생시키는 전해부상(EF: electro flotation) 공

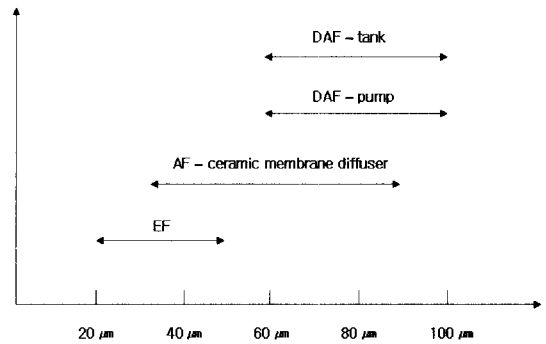


Fig. 1. Distribution of bubble size generated by different flotation methods.

정 등이 있다(Chen, 2004). 하지만, DAF는 4~5기압의 고압을 요구하는 동시에, 대용량의 공기 압축장치를 필요로 하며, EF의 경우 고형물질이 전기분해극판에 접촉하여 스케일을 형성하여 시간이 지나면서 효율이 급격히 떨어져 적용을 기피하는 경향을 나타내고 있다(Burns et al., 1997). 반면, 세라믹 멤브레인 산기관(ceramic membrane diffuser)을 이용하여 1~2기압의 작은 압력으로 부상 가능한 미세 기포를 생성하는 공기부상법(AF: air flotation)은 기타 부상분리법의 단점을 대체할 수 있는 방법으로 제시되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 AF공정의 부상분리 효율을 체계적으로 평가하고자 하였으며, 고농도 슬러지 농축에 영향을 미치는 여러 인자를 대상으로 농축 정도를 조사하였다. 이는 활성슬러지의 공기부상법에 있어서 기본적인 부상분리 특성을 제시하고, 실제 침전조를 대체하여 부상조를 운전하는 데 있어서 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 세라믹 멤브레인 산기관

AF공정에서 미세 기포를 발생하기 위한 방법으로 미세 기포를 지닌 세라믹 멤브레인 산기관을 선정하였다. 상업용 세라믹 멤브레인 산기관(DISK 152, KERAFOL Company, Germany)은 알루미늄(Al_2O_3) 재질로 구성된 세라믹 산기관으로 2.0 μ m의 공극을 가지고 있다. 공극의 크기는 미세 기포를 발생하여 활성슬러지를 부상시키는 데 있어서 가장 중요한 요

인이므로 제조사에서 제시한 2.0 μ m 공극을 확인하기 위해 FE-SEM(S-4100, HITACHI High-Tech Science Systems, Japan)을 통해 표면의 공극 크기를 측정하였다. 원형 세라믹 멤브레인 산기관은 외경 152mm, 내경 25.5mm, 두께 4.5mm이며, 표면적은 360cm²으로 3bar의 공기압까지 사용가능하다. 한편, 미세 기포는 내부의 채널 안으로 공기압을 가하여 산기관 전체 표면으로 발생하게 되며, air regulator(AFR200-8, Parker Co. Ltd., USA)를 이용하여 압력을 조절하였으며, 발생된 공기량은 공기유량측정기(RMA-12-SSV, Dwyer Instruments, Inc., USA)를 통해 측정하였다.

2.2. 미세기포 크기 측정

세라믹 멤브레인 산기관으로부터 발생한 기포의 크기와 고액분리의 대상이 되는 활성슬러지 입자 크기와의 관계는 충돌 효율을 결정하여 부상능력에 영향을 미치므로 발생된 기포 크기를 측정하는 것은 필수적이다(Elimelech et al., 1995; Omate et al., 2006). 발생 기포 크기를 측정하는 방법으로는 화상분석을 이용하는 것과 PC(particle counter) method가 있으며, 사용의 편리함으로 인해 최근에는 PC method가 많이 사용되고 있으며(Han et al., 2002), 본 연구에서도 on-line particle counter(LaserTrac Model PC 2400D, Hemtrac)를 사용하여 기포 크기를 측정하였다. 이 방법은 입자 계수기의 센서부를 통과하는 입자들이 laser에 감지되어 발생하는 pulse로 크기를 측정하지만, 입자와 기포를 구분하지 않고 측정하는 문제점이 있어, 증류수를 사용하여 측정하였다. 또한, 세라믹 멤브레인 산기관은 공기압에 따라 기포 크기가 달라지며, 슬러지 부상능력을 가지는 압력 범위(0.2~1.8bar) 내에서 기포 크기를 측정하였다.

2.3. 연속식 부상 실험

활성슬러지의 부상분리 특성을 평가하기 위해 각 산기관에서 발생하는 공기 발생량과 공기 부상속도를 측정하였으며, 연속식 부상 실험을 통해 슬러지 부상에 미치는 영향 인자에 대해 조사하였다. 공기량은 유입되는 양을 공기유량계를 통해 측정하였고, 기포의 부상속도는 Reynolds No.1 이하일 때, 다음 식(1)과 같은 stokes식을 사용하여 계산하였다(Schers and

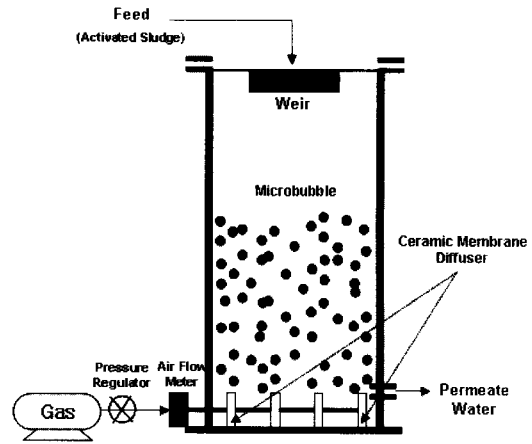


Fig. 2. Schematic diagram of the air flotation experiments by using ceramic membrane diffuser.

Dijk, 1992).

$$V_b = \frac{g(\rho_w - \rho_b)d_b^2}{18\mu} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, g는 중력가속도, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_b 는 공기의 밀도, d_b 는 기포의 직경, μ 는 점성계수이다. 회분식 및 연속식 실험은 Fig. 2의 아크릴 사각조에 4개의 세라믹 멤브레인 산기관을 5cm 간격으로 세로로 넣어 수행하였으며, 크게 유입 MLSS농도, 표면부하율(surface loading rate), A/S비(air to solid ratio)가 부상 효율에 미치는 영향을 파악하였다. 한편, 슬러지 침전성의 영향을 고려하여 DSVI₃₀가 120-150mL/g인 불량 슬러지를 대상으로 부상 능력을 평가하여 일반 활성슬러지의 경우에는 더욱 부상 효율이 좋을 것으로 판단된다(Daigger and Roper, 1985). 또한, 농축 슬러지는 시간에 따른 농축 슬러지층의 두께와 농축된 활성슬러지의 MLSS농도를 측정하였으며, 고액분리 후의 유출수는 SS 농도를 측정하여 수질 기준의 적합 여부를 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발생 기포의 크기 분포

기포의 크기는 슬러지 부상 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져, 세라믹 멤브레인 산기관에서 발생하는 기포의 크기를 압력 변화에 따라 측정하였다. Fig. 3에서와 같이 발생된 기포의 크기는 압력이 증가

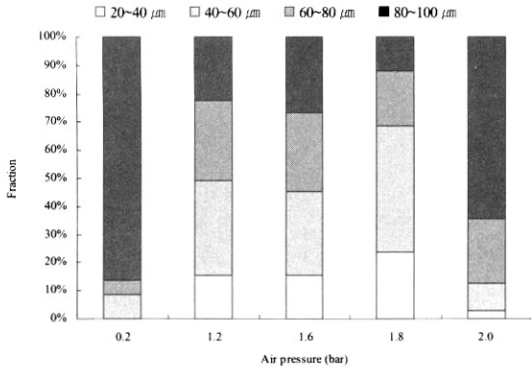


Fig. 3. Size distribution of air bubbles generated by ceramic membrane diffuser.

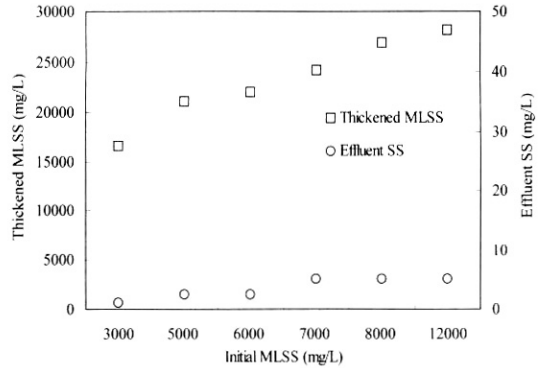


Fig. 4. Solid concentration of thickened sludge and effluent SS under various initial MLSS.

함에 따라 증가하며, 크기가 큰 기포의 양이 많아지는 경향을 나타냈다. 공기압이 0.2bar 이하에서는 산기관으로부터 기포가 발생되지 않으며, 2.0bar 이상에서는 기포의 크기가 너무 커져, 슬러지 부상에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 공기압이 1.2~1.8bar 사이에서는 기포의 평균 크기는 45.3~46.9 μm으로 큰 차이를 보이지 않았으나, 압력에 따라 기포 크기의 분포도가 다른 것을 확인하였다. 기존 연구에서의 결과와 마찬가지로 슬러지 부상에 적합한 기포 크기는 20~60μm로 판단되며, 이 범위의 기포가 가장 많이 생성되는 1.8bar를 선정하여 슬러지의 부상분리 효율을 평가하였다.

3.2. 유입 MLSS농도가 미치는 영향

활성슬러지의 부상분리 공정에서 농축된 슬러지의 농도는 부상분리 공정으로 유입되는 MLSS 농도에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 기존 활성슬러지 공정의 개량공법으로 호기조를 BNR 공정으로 retrofitting하여 사용하는 전제로 호기조에서 침전조로 유입되는 슬러지의 농도를 예상하여 실험을 수행하였다. 또한, BNR 공정내의 MLSS가 고농도로 유지될 경우를 가정하여 본 실험에서는 유입 MLSS 농도를 3,000~12,000mg/L 범위로 선정하였다. Fig. 4에서와 같이 부상분리 효율을 평가한 결과, 유입 MLSS 농도가 증가하면 상부에 농축된 슬러지의 농도가 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 대부분의 범위에서 15,000mg/L 이상의 MLSS를 얻을 수 있었다. 이를 BNR 공정으로 반송하면 일반 활성슬러지 공정

에서의 호기조 운영보다 고농도로 생물반응조를 운전할 수 있어 유기물 제거에 큰 효과가 있을 것으로 판단된다. 한편, 침전조 하단에서의 유출수는 SS가 5mg/L 이하로 유지 가능하였으며, DSVI₃₀가 120~150mL/g로 별킹 슬러지임에도 불구하고 기존 중력식 침전조보다 고효율의 고액분리 공정으로 운전이 가능하였다.

3.3. 표면부하율이 미치는 영향

표면부하율은 유입되는 고형물 부하량과 공기가 발생되고 있는 침전조 표면적과의 관련 인자로서, 부상분리공정에서 고려해야 할 중요한 인자이다. 침전조의 표면으로 유입되는 MLSS 농도를 3,000, 5,000, 8,000, 12,000mg/L로 고정하고, 유량을 조절하여 표면부하율 증가에 따른 부상분리 효율을 평가하였다. Fig. 5에서와 같이 표면부하율이 증가함에 따라 농축 슬러지의 MLSS도 증가하다가 0.25g/hr·cm² 이상에서는 감소하는 현상을 나타냈다. 기존 중력식 침전조의 농축 슬러지보다 고농도로 농축되어 있긴 하지만, 유출수의 SS 농도는 방류수 수질기준을 만족하지 못하는 결과를 나타냈으며, 유량이 250ml/min으로 공기의 부상력보다 큰 부하량을 가져 침전조내 고형물의 일부가 부상되지 않은 것으로 사료된다. 따라서, AF 침전조에서 표면부하율을 0.13~0.21g/hr·cm² 범위내로 운전하면, 농축 슬러지의 MLSS 농도는 14,700~28,100mg/L를 얻을 수 있었으며, 유출수의 SS는 5mg/L 이하로 유지할 수 있음을 확인하였다.

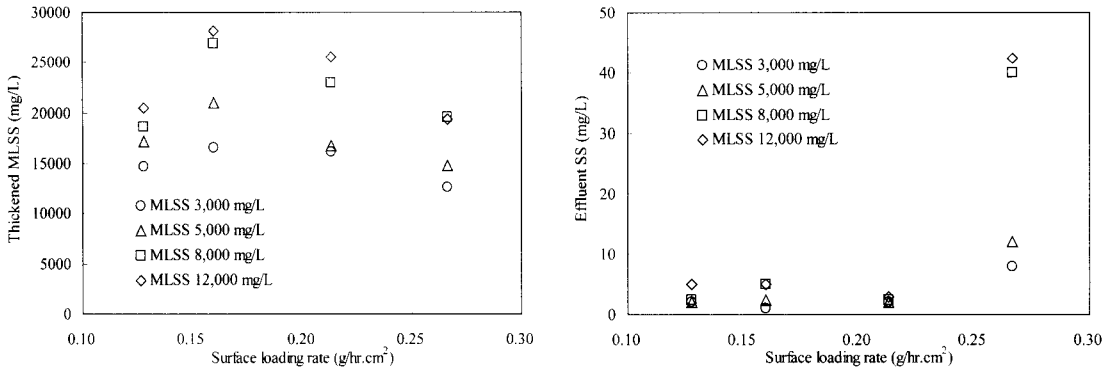


Fig. 5. Solid concentration of thickened sludge(left) and effluent SS(right) under various surface loading rate.

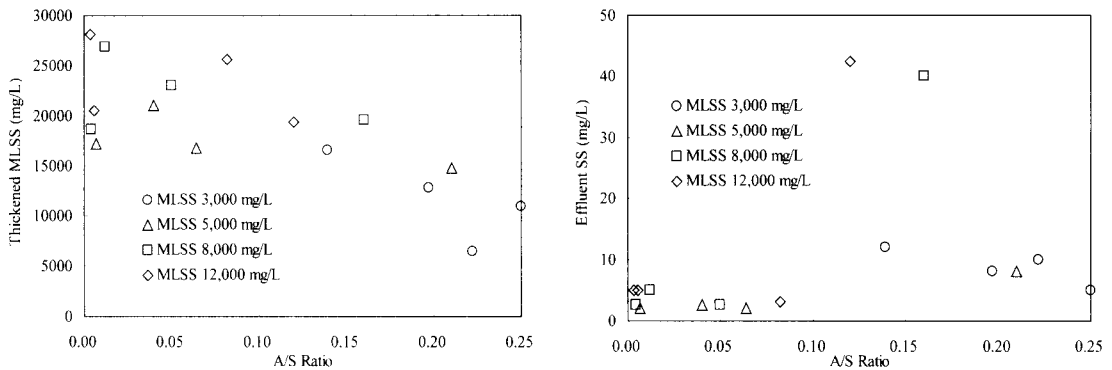


Fig. 6. Solid concentration of thickened sludge(left) and effluent SS(right) under various A/S ratio.

3.4. A/S비가 미치는 영향

A/S비에 의한 활성슬러지 부상분리 효율을 평가하기 위해 다양한 유입 MLSS와 표면부하율 조건에서 실험을 수행하였다. Fig. 6에서는 농축된 슬러지의 MLSS 농도와 유출수의 SS농도를 A/S비 변화에 따라 나타내었다. 그 결과, 농축 슬러지의 MLSS 농도는 A/S비의 변화에 의한 유입 MLSS 및 표면부하율 변동에 따라 큰 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 한편, 농축된 슬러지의 MLSS 농도는 A/S비가 0.2 이상인 경우에 있어서는 낮은 값을 나타내었으며, 이는 공기량이 많은 것보다는 고형물양이 적어, 농축되는 슬러지의 MLSS 농도가 낮아지는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 즉, 슬러지를 부상시킬 수 있는 정도의 공기량을 압력 조절을 통해 확보한 다음, 고형물 농도의 조절을 통해 A/S비를 0.2 이하로 유지하면, 공기 부상법에 의한 활성슬러지 부상이 가능하여 고농도

슬러지를 확보할 수 있음을 확인하였다. 반면, 유출수의 SS농도는 A/S비가 0.12 이상에서 방류수 수질 기준을 준수하지 못하는 것으로 나타나 유출수 SS 기준을 고려하면, A/S비를 그 이하로 낮춰 운전하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

3.5. 부상시간이 미치는 영향

활성슬러지의 공기 부상분리는 같은 조건에서 부상시켜도 농축된 슬러지의 MLSS 농도는 부상하는 공기와 침전조 내의 고형물과 충돌하여 부상하는 부상시간이 길어질수록 높아짐을 확인하였다. Fig. 7에서와 같이 부상시간이 1시간까지는 농축 슬러지의 MLSS 농도가 일정하게 증가하다가 1시간이 지나면서는 감소하는 경향을 보였다. 이는 약 1시간 이후부터는 농축 슬러지 하부층에서 상승하는 공기 부상력에 의해 층이 탈리되는 현상이 일어나며, 이로 인해 농축정도가 감소하는 것으로 사료된다. 특히, 농축

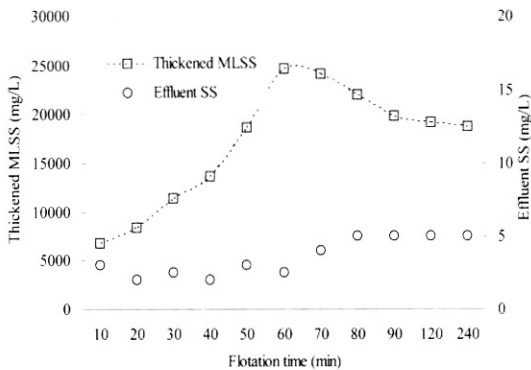


Fig. 7. Variation of thickened sludge concentration with time.

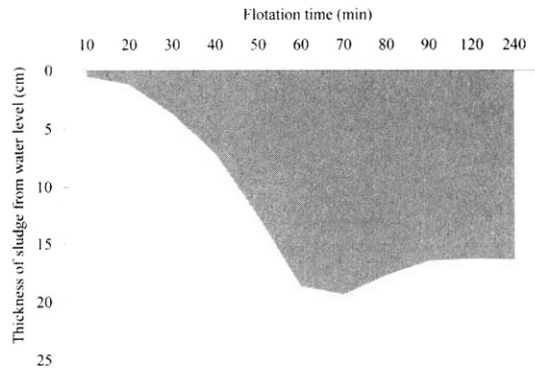


Fig. 8. Variation of sludge thickness from water level with time.

슬러지층의 두께가 지속적으로 증가하지 않았으며 (Fig. 8), 기포가 농축 슬러지층의 하단부에서 크게 뭉쳐 슬러지층을 통과하여 층의 상부까지 도달하는 현상으로 인해 농축 정도가 감소하였다. 따라서, 부상분리공정을 사용하는 데 있어서 부상분리 시간의 설정도 중요한 고려인자이며, 본 실험에서의 결과, 공기 부상이 시작된 약 1시간 후에는 스크래퍼 장치 등을 이용하여 생성된 슬러지층을 이동시켜 반송을 시키는 것이 합리적일 것으로 평가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기부상법을 이용한 활성슬러지의 부상분리에 있어서 영향을 미치는 인자들에 따라 농축 효율을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 공기부상법에서 미세기포의 크기는 중요한 인자 중의 하나로 부상 효율을 변화하는 요인이며, 평균 미세기포가 같다고 하여도 부상분리 공정에 적합한 20~60 μ m 크기의 기포량이 많이 존재해야 한다. 이는 세라믹 멤브레인 산기관에 가해지는 공기압에 의해 결정되며, 활성슬러지 부상에는 1.8bar 내외의 압력에서 위 기포 크기가 가장 많이 생성되었다.

2. 유입 MLSS 농도는 유출수의 SS 농도에는 영향을 미치지 않으나, 침전조 상부에 농축되는 슬러지의 MLSS 농도를 결정하는 중요 인자임을 확인하였다. 한편, 표면부하율은 0.21g/hr·cm² 이하의 범위에서는 활성슬러지 부상에 영향을 미치지 않았으며, 유입 MLSS 농도에 따라 다르지만, 농축된 슬러지의

MLSS 농도는 14,700~28,100mg/L를 얻을 수 있었다.

3. A/S비가 높을수록 부상 효율이 좋을 것이라는 예측과는 달리, 0.2 이상에서는 오히려 농축 슬러지의 MLSS 농도가 낮게 형성되었다. 이는 부상에 필요한 공기량보다 고형물의 농도가 현저히 낮아 고농도 농축이 불가능한 결과이지만, 목표로 하는 기존 중력식 침전조에서의 농축 MLSS 농도보다는 고농도로 얻을 수 있었다. 하지만, 이 경우 유출수의 SS 농도는 방류수 수질기준을 준수할 수 없어 공기부상법에는 A/S비를 0.12 이하로 적용하는 것이 바람직하다.

4. 동일한 조건의 부상분리 공정에서도 부상시간에 의해 농축된 슬러지의 MLSS 농도는 큰 차이를 보였다. 1시간 이내에는 부상시간에 비례하여 농축이 진행되다가 그 후에는 슬러지 층 하단부의 탈리현상 및 침전조 상부로 부상할수록 기포 크기가 증가하여 고농도의 슬러지 농축 효율을 얻을 수 없었다. 한편, 농축 슬러지층의 두께도 1시간 이후에는 감소하는 경향을 확인하였다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”으로 지원받은 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. American Water Works Association (1999) Water quality

- and treatment 5th edition, McGraw-Hill, pp.7.47-7.61.
2. Burns S. E., Yiacoumi S. and Tsouris C. (1997) Microbubble generation for environmental and industrial separations, *Separation and Purification Technology*, **11**, pp.221-232.
 3. Chen G. (2004) Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, **38**, pp.11-41.
 4. Daigger G.T. and Roper R.E. (1985) The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics, *Journal Water Pollution Control Federation*, **57**(8), pp.859-866.
 5. Dockko S. and Han M.Y. (2004) Fundamental characteristics of bubbles and ramifications for the flotation process, *Water Science and Technology*, **50**(12), pp.207-214.
 6. Edzwald J.K. (1995) Principles and applications of dissolved air flotation, *Water Science and Technology*, **31**(3-4), pp.1-23.
 7. Elimelech M., Gregory J., Jia X. and Williams R.A. (1995) Particle deposition and aggregation: measurement, modeling and simulation, Butterworth-Heinemann Ltd., pp.347-360.
 8. Han M.Y. (2001) Modeling of DAF: the effect of particle and bubble characteristics, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **51**(1), pp.27-34.
 9. 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.
 10. Omata F., Dimian A.C. and Blik A. (2006) Adhesion of solid particles to gas bubbles. Part 1: Modeling, *Chemical Engineering Science*, **61**, pp.823-834.
 11. Omata F., Dimian A.C. and Blik A. (2006) Adhesion of solid particles to gas bubbles, Part 2: Experimental, *Chemical Engineering Science*, **61**, pp.835-844.
 12. Schers G.J. and Dijk J.C. (1992) Chemical Water and Treatment II, *Journal of Water Supply*, **2**(5-6), pp.465-473.
 13. Valade M.T., Edzwald J.K., Tobiason J.E., Dahlquist, J., Hedberg, T. and Amato, T. (1996) Pretreatment effects on particle removal by flotation and filtration, *Journal of American Water Works Association*, **88**(12), pp.35-47.