Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 24, No. 3, pp.340-344 (2008)

전해부상을 고액분리 방법으로 적용한 SBR 공정의 운전 특성

박민정 · 최영균†

대구대학교

Operation Characteristics of the SBR Process with Electro-Flotation (EF) as Solids-liquid Separation Method

Minjeong Park · Younggyun Choi†

Department of Environmental Engineering, Daegu University

(Received 14 April 2008, Accepted 30 April 2008)

Abstract

Electro-flotation (EF) was applied to a sequencing batch reactor process (SBR) in order to enhance solids-liquid separation. Solids-liquid separation was good enough in the SBR coupled with EF (EF-SBR) and it was possible to maintain the concentration of mixed liquor suspended solids (MLSS) high in the EF-SBR. Under moderate organic loading condition (COD loading rate: 6 g/day), control SBR (C-SBR) showed similar treatment efficiencies with the EF-SBR. Under high organic loading condition (COD loading rate: 9.6 g/day), the solids-liquid separation in the C-SBR was deteriorated due to proliferation of filamentous bulking organisms at high F/M ratio. However, the EF-SBR was operated stably and with the high MLSS concentration (above 4,000 mg/L) regardless of the organic loading conditions during overall operating period leading to the satisfactory effluent quality. Gas production rate of the electrodes was gradually decreased because of anodic corrosion and scale build-up at the surface of cathode. However it could be partially overcome by use of corrosion-proof electrode material (SUS-316 L) and by periodic current switching between the electrodes.

keywords : Electro-flotation (EF), Organic loading, Sequencing batch reactor (SBR), Solids-liquid separation

1. 서 론

대부분의 생물학적 하수처리 공정에서 고액분리를 위한 방법으로 중력침전이 사용되고 있다. 중력 침전을 통한 고액분리는 시설과 운전은 간단하지만 긴 체류시간을 필요로 하며 슬러지 벌킹 현상이 나타날 경우 침전성이 저하되어 고액분리가 제대로 되지 않는다. 이러한 벌킹 현상을 극복할 수 있는 고액분리 방법의 대안으로 부상 고액분리 방법이 최근 들어 종종 소개되고 있다(박용효와 한무영, 2002; 이준 등, 2005; 최영균 등, 2005). 부상 고액분리 방법으로는 DAF(Dissolved Air Flotation)와 AF(Air Flotation), 그리고 EF(Electro-Flotation)를 이용한 방법 등이 있으나 하수 슬러지의 고액분리에 적용된 사례는 드물다. DAF의 경우, 정수처리 슬러지의 부상분리(이준 등, 2005; Manjunath et al., 2000)를 포함하여 비교적 그 적용사례가 많은 편이지만 EF는 음식점 폐수의 고액분리(Chen et al., 2000), oil-water emulsion에서의 oil 분리(Hosny, 1996) 등 비중이 낮은 물질의 고액분리에 국한되어 적용되어 왔다. 그러나 최근 들어서는 활성슬러지의 고액분리 및 농축에 EF를 적용한 방법이 보고되고 있다(조강우 등, 2006; 최영균 등, 2005). EF는 전기분해를 통해 전극판으로부터 발생하는 다량의 미세기포에 의해 고형물이 부상 분리되는 방법이다. EF는 미세 기포 발생에 의해 활성슬러지를 부상 농축시키는 효율이 높아 중력 침강식과 비교해 볼 때 동일 시간 동안 보다 높은 농도의 슬러지를 농축시킬 수 있다는 보고도 있다(조강우 등, 2006; 최영균 등, 2005, 2006).

본 연구에서는 EF를 실험실규모 SBR(Sequencing Batch Reactor) 공정의 고액분리 방법으로 적용하여(EF-SBR) 고농도 MLSS 운전을 가능하게 함과 동시에 고부하 유입하수 조건에도 유연한 대처가 가능한 SBR 공정을 개발하고자 하였다. 유입하수 부하변동에 따른 EF-SBR 공정의 처리 특성에 대한 비교 · 평가를 위해 중력 침전을 고액분리 방법으로 적용한 SBR 공정(C-SBR: Conventional SBR process)을 대조군으로 채택하여 운영하였다.

2. 연구방법

EF-SBR과 C-SBR 반응조는 아크릴을 이용하여 원통형으로 제작하였으며 유효 운전 부피는 8 L, 일처리량은 24 L/d로 하였다. EF-SBR 및 C-SBR 모두 4 cycle/day로 운전하였으며 주기 당 운전 모드는 Table 1과 같다. 본 연구에서 간헐폭기방식의 운전을 택한 이유는 생물학적 질산화와

† To whom correspondence should be addressed.
choiyg@daegu.ac.kr

Table 1. Operation mode of the SBRs in a cycle

0hr	1hr	1.5	2hr	2.5	3hr	4hr	5hr	5.25	6hr
Fill			Reaction			EF / Settle	Decant		Idle
No Aeration		Aeration			No Aeration				Aeration
Mixing						No Mixing			Mixing

탈질을 고려했기 때문이지만, 본 논문에서는 반응조 및 처리수의 고형물 농도와 유기물 제거와 관련된 거동만을 우선 살펴보았다.

전해부상(EF)을 위해 SUS 304와 SUS 316L 두 종류의 극판을 사용하였다. 전극판은 높이 3 cm, 길이 5 cm, 두께 0.1 cm로 Fig. 1과 같이 3개를 1 set(음극-양극-음극), 극판 간격은 0.5 cm로 하여 반응조 하단에 2 set를 설치하였다. 전극판 1 set 당 유효표면적은 양극의 경우 30 cm^2였고 음극의 경우 좌우 각각 15 cm^2였으며 인가전류는 450 mA가 되도록 power supply를 이용하여 공급해 주었다. 따라서 각 전극판에서의 전류밀도는 15 mA/cm^2가 되었다. EF-SBR 공정의 한 주기 운전개략도는 Fig. 1과 같으며, 부상(Flotation)이 실시됨과 동시에 하단의 마그네틱바를 약 20~30초간 회전시켜 극판 아래 일부 침전된 슬러지의 부상분리를 용이하게 하도록 하였다.

C-SBR 공정은 고액분리 방법으로 중력침전을 사용한 것 이외에는 EF-SBR 공정과 모두 동일한 형태와 조건으로 운전되었다. 유입하수는 glucose와 yeast extract를 탄소원으로 하여 인공적으로 제조하여 사용하였고 조성은 Table 2와 같다. Table 2에 제시한 탄소원과 영양염류 외에 trace mineral을 미량으로 주입하였다.

실험 시작 후 50일 동안은 EF-SBR 및 C-SBR 모두 유입수 CODcr 농도를 250 mg/L로 하였으며, SRT는 두 반응조 모두 25일 내외가 되도록 운전하였다. 51~141일 동안은 유입 CODcr 농도를 400 mg/L가 되도록 하였다. 이 기간 동안 EF-SBR은 35일 내외로 SRT를 유지하였으나 C-SBR은 악화된 슬러지 침강성과 잦은 슬러지 유실로 인해 SRT가 20~28일까지 비교적 큰 폭으로 변하였다. SBR 공정의 슬러지 식종에는 표준활성슬러지 공법으로 운전되는 경북 K 하수처리장 반송슬러지가 사용되었다. 반송슬러지의 초기 MLSS 농도는 5,100 mg/L였으며, SVI_{30}은 80 mL/g으로 침전성은 매우 양호한 것으로 확인되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응조 고형물 농도 변화

EF-SBR 및 C-SBR 공정 모두 초기 반응조 MLSS농도를 2,300 mg/L 내외로 조절하여 실험을 시작하였다. 유입하수 COD 농도가 250 mg/L로 유지되었던 운전기간(0~50일) 동안에는 두 SBR 공정의 MLSS 농도 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 Fig. 2에 제시하였듯이 유입수 COD 농도가 400 mg/L로 증가한 이후 두 반응조 간의 MLSS 농도 차이가 확연히 나타남을 알 수 있었다. C-SBR 공정도 고농도의 유기물이 유입되기 시작한 이후 약 75일까지는 반응조 MLSS 농도가 점차 증가하였으나 상대적으로 높은 F/M비에 의한 것으로 추정되는 슬러지 벌킹현상에 의해 약 78일 경에 반응조 슬러지 농도가 큰 폭으로 감소하였다. 이와 같이 C-SBR 공정은 지속적인 슬러지 유실로 인해 정상적인 운영이 불가능하였기 때문에 미생물을 추가로 식종하였다. 그러나 미생물을 추가로 식종한 이후에도 반응조 MLSS 농도를 지속적으로 증가시키는 것은 불가능함을 알 수 있었다. C-SBR 공정의 경우, 78일 이외에도 벌킹에 의한 슬러지 유실로 인해 51, 97, 127일 경에 미생물 식종 및 슬러지 전면 교

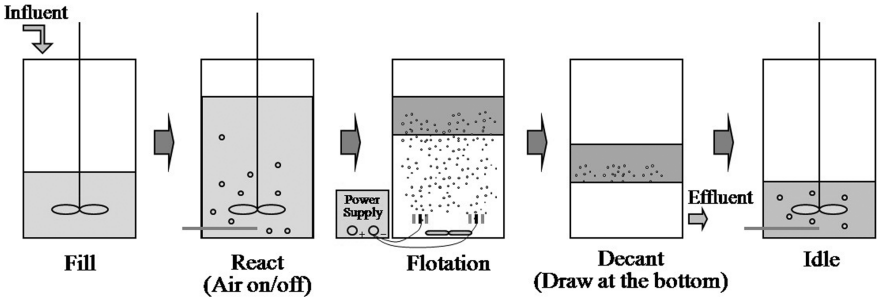


Fig. 1. Schematic diagram of the EF-SBR process.

Table 2. Composition of the synthetic wastewater

Influent constituent	Influent concentration	
	(0~50 days)	(51~141 days)
Carbon source : Glucose, Yeast extract	250 mgCOD/L	400 mgCOD/L
Nitrogen source : NH_4Cl	40 mgN/L	64 mgN/L
Phosphorus source : KH_2PO_4	5 mgP/L	8 mgP/L
pH buffer : $NaHCO_3$	250 $mgCaCO_3/L$	400 $mgCaCO_3/L$

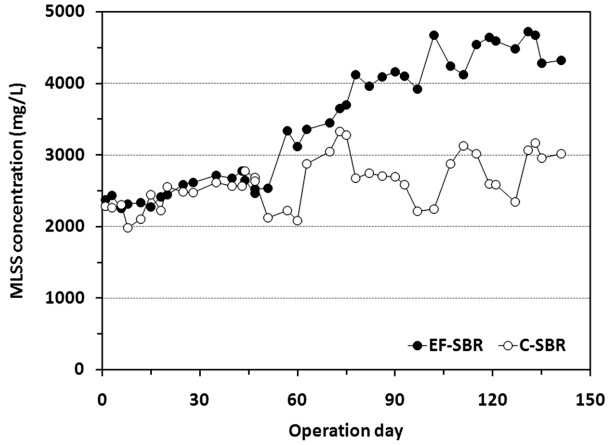


Fig. 2. MLSS concentration in the SBR processes.

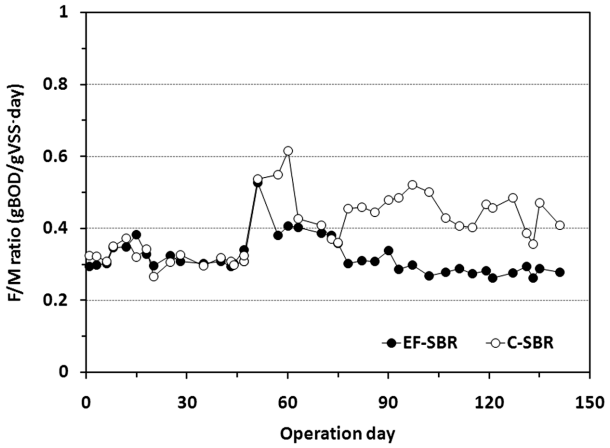


Fig. 3. Variation of F/M ratio in the SBR processes.

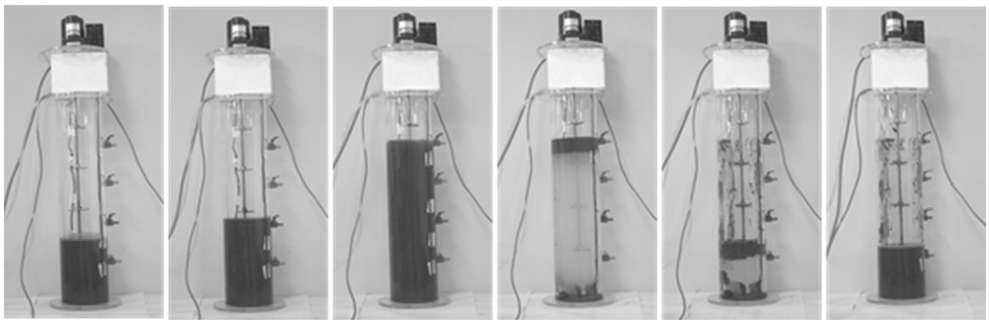
체 작업이 실시되었다. C-SBR 공정에서 주기적으로 발생한 슬러지 벌킹현상은 상대적으로 높았던 F/M비와 실제하수가 아닌 인공하수를 기질로 사용한 데 따른 영양 불균형 때문이라 추측된다.

C-SBR 공정과는 달리 EF-SBR의 경우에는 고농도 유기물이 유입되는 조건에서도 매우 안정적인 운전이 가능하였다. 반응조의 MLSS 농도를 4,500 mg/L 내외로 유지하는 것이 가능하였기 때문에(Fig. 2) 고농도 유기물 유입 기간 동안 C-SBR 공정과의 MLVSS 농도 차이가 1,300~2,000 mg/L로 크게 조사되었다. MLVSS 농도 차이에 의해 두 SBR 공정 간의 F/M 비도 이 기간 동안 비교적 큰 차이를 나타내었다(Fig. 3). 문헌에서 보고되는 전형적인 SBR 공정의 F/M 비인 0.1~0.2 gBOD/gVSS·d (Metcalf & Eddy, 2003)에 비해서는 다소 높은 수준이었으나 EF-SBR의 경우 약 0.25 정도의 F/M비를 유지하고 있는 반면 C-SBR의 경우에는 0.4 이상으로 비교적 높은 F/M비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 높은 미생물 농도와 비교적 낮게 유지되었던 F/M비가 EF-SBR 공정이 안정적으로 운전될 수 있었던 직접적인 이유라 할 수 있으며, EF에 의한 활성슬러지의 부상분리가 이 과정에서 가장 핵심적인 역할을 수행하였다고 할 수 있다. Fig. 4에 이러한 EF에 의한 고액분리 과정을 포함하는 EF-SBR 공정의 한 주기 운전과정을 제시하였다.

3.2. 고액분리 특성

C-SBR 공정은 Fig. 5에 제시한 바와 같이 슬러지 벌킹 현상이 4차례 나타나 매번 다량의 슬러지 유출과 함께 유출수의 SS농도가 급격히 증가하였다(Fig. 6). 슬러지의 침전성 지표인 SVI_{30} 역시 고부하 운전기간 내내 매우 불안정한 모습을 보이고 있다. C-SBR에서 벌킹 발생 이후 슬러지의 침전성이 급격히 향상된 것은 새로운 식종 슬러지로 전면 교체하였기 때문이다. C-SBR과 달리 EF-SBR 공정에서는 고농도 유기물이 유입되는 기간 동안 SVI_{30}이 75~120 mL/g 범위에서 매우 안정적으로 유지되었다. EF-SBR 공정 슬러지에 대한 SVI_{30} 측정은 1회/3~7일 주기로 반응기간 직후(부상 분리 직전) 슬러지를 인발하여 수행하였다.

EF-SBR 공정의 유출수 SS 농도 또한 C-SBR에 비해 항상 양호한 것으로 확인되었다. 전기분해에 의해 발생되는 미세기포의 크기는 95% 이상이 50 ㎛ 이하인 것으로 보고되고 있다(Chen et al., 2002). 또한 일반적인 활성슬러지에서 직경 16~256 ㎛의 크기를 갖는 플록이 부피와 질량 기준으로 각각 70~80%, 50~80%를 차지한다는 점(Li and Ganczarczyk, 1991)과 활성슬러지의 비중이 1.01~1.09 g/cm^3 (Vanderhasselt and Verstraete, 1999)로 물과 비슷하다는 점은 활성슬러지의 고액분리에 EF가 큰 장점을 가질 수 있음을 암시한다. 실제로 본 연구에서 EF에 의한 고액분리



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Fig. 4. Consecutive photos of the EF-SBR operation in a cycle. (a) fill & mixing, (b) fill & mixing & aeration, (c) reaction, (d) EF, (e) decant, (f) idle & aeration

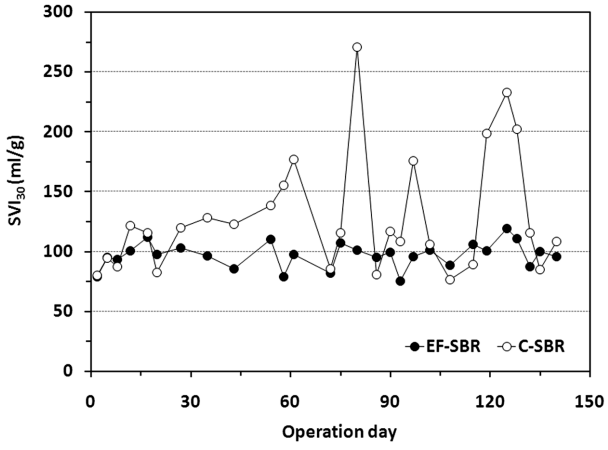


Fig. 5. Effluent SS concentration of the SBR processes.

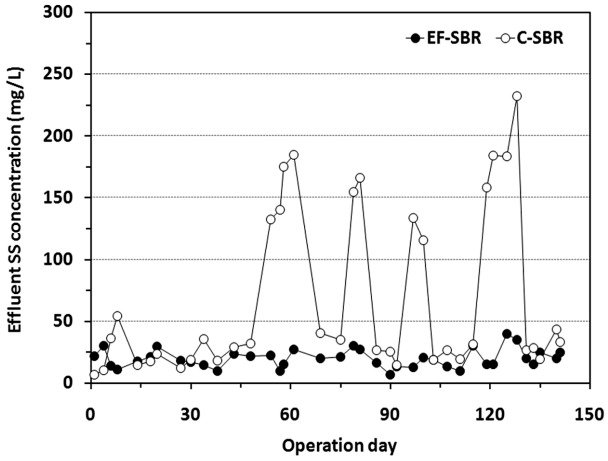


Fig. 6. Effluent SS concentration of the SBR processes

실시 결과, 중력침전에 비해 고액분리 시간을 크게 단축할 수 있었을 뿐만 아니라 처리수의 SS 농도도 비교적 낮게 유지할 수 있었다(Fig. 6). 다만 EF에 의해 고액분리가 시작될 때, 전극판 하단에 침전되어 있는 슬러지는 미세기포와 접촉할 수가 없었기 때문에 부상분리에 어려움이 있었다(Fig. 4(d)). 그러나 이러한 문제는 EF-SBR 반응조 하단에 마그네틱바를 위치시켜 EF가 시작됨과 동시에 약 20~30초간 회전시킴으로써 해결할 수 있었다.

EF-SBR 공정은 C-SBR 공정에 비해 반응조의 MLSS 농도가 상당히 높았음에도 불구하고 원활한 고액분리가 가능하였다. 이는 EF-SBR 공정이 기존 SBR 공정의 최대 단점인 낮은 처리수량을 고농도 미생물 유지와 안정적인 처리수질 확보를 통해 어느 정도 극복할 수 있다는 것을 의미한다.

3.3. 유입 유기물 농도 변화에 따른 유기물 제거 특성

유입 유기물 농도변화가 각 SBR 공정의 운전성능 및 처리효율에 미치는 영향을 파악하기 위해 운전시작 후 51일부터 유입수 COD 농도를 250에서 400 mg/L로 급격히 증가시켰다. 유입 COD 변화에 따라 모든 영양염류 및 미네랄 주입농도도 비례하여 증가시켰다.

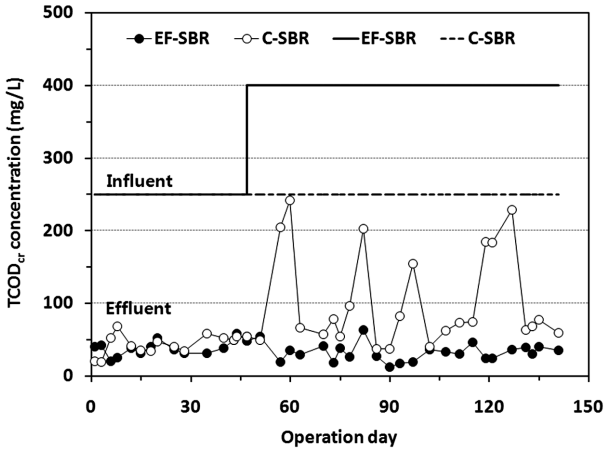


Fig. 7. Variation of TCOD concentration.

Fig. 7에 제시한 바와 같이 각 SBR 공정에서의 유기물 제거 성능은 Fig. 6에 제시한 유출수 SS 농도 변화와 매우 흡사하게 나타났다. 그러나 슬러지 벌킹에 의해 유출수 유기물 농도가 급격히 증가했던 시점(운전 시작 후, 51, 78, 97, 127일 전후)을 제외하더라도 C-SBR에 비해 EF-SBR의 유기물 제거효율이 전반적으로 높게 나타난 점은 주목할 만하였다. 이는 Fig. 2와 Fig. 3에 제시한 바와 같이 EF-SBR 공정에서 고농도 유기물 유입시 상대적으로 높게 유지할 수 있었던 미생물 농도와 이에 따라 낮게 유지되었던 F/M 비에 의한 결과라고 보여진다.

3.4. 전극의 미세기포 발생량 변화

전기분해를 적용한 실험에서 빈번히 지적되는 사항으로 전극판의 유지관리 문제가 있다. 즉, 용해에 따른 양극판의 마모와 스케일 생성에 따른 음극판의 수명 단축이 대표적인 문제라 할 수 있다. 양극의 경우, 불용성 재질인 티타늄 극판 등을 사용하여 극복할 수 있으나(최영균 등, 2006; Chen et al., 2000, 2002) 음극에서의 스케일 발생에 대한 뚜렷한 대책은 현재까지 발표된 사례가 거의 없다. 본 연구에서는 음극에서의 스케일 발생과 양극의 마모 정도를 감소시키기 위해 전극의 +와 -극을 30분 간격으로 연속 변환할 수 있는 장치를 직류전원공급장치에 부착하여 운영하였다. 전극의 재질은 양극과 음극 모두 시중에서 쉽게 구할 수 있는 SUS 304를 사용하였으며, 실험 후반부에는 SUS 316L 재질을 사용하여 극판의 마모를 감소시키고자 하였다.

전극판의 마모 및 스케일 발생 정도는 전극판으로부터 발생되는 미세기포 발생량의 변화를 통해 간접적으로 확인할 수 있었다. 운전 시작 후, 약 4~7일 간격으로 전극판을 EF-SBR 반응조로부터 꺼내어 회분식 방법으로 미세기포 발생량을 측정한 결과를 Fig. 8에 제시하였다. SUS 304 재질의 극판을 사용한 결과 약 50일이 경과한 시점에서 기포발생율이 1,154 mL/hr에서 641 mL/hr로 40% 이상 감소하였다. 이러한 현상은 극판의 재질이 같을 경우, 동일하게 반복되는 것으로 조사되었다. 그러나 극판을 내부식성이 보다 강화된 SUS 316L로 교체하였을 경우에는 기포발생율 감소가 상당히 둔화되는 것을 확인하였다(Fig. 8). 직류전원

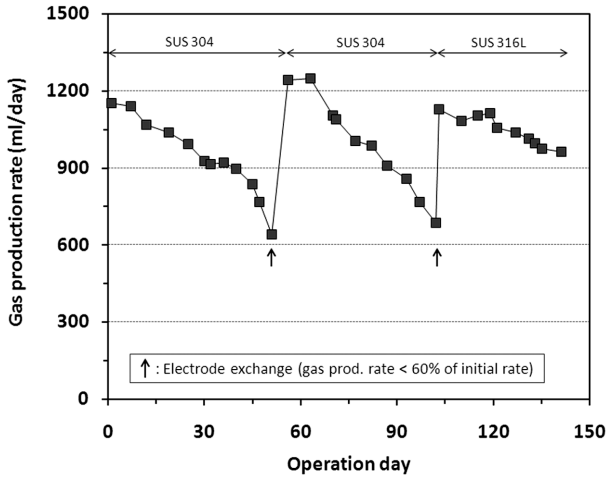


Fig. 8. Effects of electrode materials and long-term electrolysis on the gas production rate.

공급장치에 +극과 -극의 주기 변환장치를 부착하지 않고 운영하였을 경우, 전극판으로부터의 미세기포 발생량은 약 7~8일 경과 후 초기 발생율의 60% 이하로 급감하는 것으로 조사되었다. 따라서 전기분해시 전원 극변환장치를 부착한다면 극판의 마모 및 스케일생성 속도를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

극판의 유지관리 측면에서 수행된 기포발생율 조사가 EF-SBR 공정의 경제성을 판단하는 직접적인 지표가 될 수는 없지만 향후 EF를 SBR 공정에 적용하는 추가 연구나 실증 실험이 수행될 경우, 전극판의 scale-up 및 유지관리 측면에서 참고자료로 활용할만한 가치가 높다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전해부상을 SBR 공정의 고액분리 방법으로 적용하였을 경우의 생물반응조 고형물 농도 변화와 유기물 제거특성을 살펴보았으며, 대조군으로 중력침전을 고액분리 방법으로 적용한 SBR 공정과의 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 부상 고액분리 방법을 적용한 EF-SBR 공정에서는 슬러지 벌킹현상이 전혀 관찰되지 않았으며, 반응조의 MLSS 농도는 4,500 mg/L 수준으로 높게 증가시킬 수 있었다. 반면 대조군에서는 잦은 벌킹 발생으로 인해 정상적인 운전이 불가능하였다.
2) 고농도 유기물 유입시 EF-SBR 공정에서는 반응조 내 VSS 농도를 높게 유지할 수 있었기 때문에 F/M 비를 0.25 gBOD/gVSS·d 수준으로 운영할 수 있었다. 그러나 C-SBR 공정에서는 F/M 비가 0.4~0.5 gBOD/gVSS·d인 것으로 나타나 상대적으로 높은 유기물 부하 운전 상태가 지속되었다.
3) 처리수의 SS와 TCOD 제거율은 C-SBR 공정의 슬러지 벌킹 기간을 제외하더라도 EF-SBR 공정에서 뚜렷이 높게 나타났다. 이는 전기분해시 발생되는 미세기포가 슬러지의 고액분리 뿐만 아니라 처리수의 입자제거에도 유리함을 의미한다.
4) 전기분해를 위한 직류전원공급장치의 극성을 주기적으로 변환시킬 경우, 전극판의 마모 및 스케일생성 속도를 크게 완화시킬 수 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 2005학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

박용효, 한무영(2002). 전해부상에서 전압과 극판 재질에 따른 미세기포의 크기 특성. *상하수도학회지*, **16**(6), pp. 663-669.

이준, 한무영, 독고석, 박용효, 김충일, 김미경(2005). 전해부상에 의한 상수 슬러지 농축 효율. *상하수도학회지*, **19**(2), pp. 155-160.

조강우, 김윤중, 정태학(2006). 전해부상을 이용한 활성슬러지의 부상특성에 관한 연구. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 173-180.

최영균, 박병주, 박민정, 김윤중, 정태학(2006). 전해부상을 이용한 활성슬러지의 탈수성 향상. *상하수도학회지*, **20**(5), pp. 677-684.

최영균, 정태학, 염익태(2005). 전해부상을 이용한 활성슬러지의 농축효율 향상. *상하수도학회지*, **19**(3), pp. 295-300.

Chen, G., Chen, X. and Yue, P. L. (2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. *Environ. Eng.*, **126**(9), pp. 858-863.

Chen, X., Chen, G. and Yue, P. I. (2002). Novel electrode system for electroflotation of wastewater. *Environ. Sci. Tech.*, **36**, pp. 778-783.

Hosny, A. Y. (1996). Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. *Sep. Tech.*, **6**, pp. 9-17.

Li, D. and Ganczarczyk, J. (1991). Size distribution of activated sludge flocs. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **63**(5), pp. 806-814.

Manjunath, N. T., Mehrotra, I. and Mathur, R. P. (2000). Treatment of wastewater from slaughterhouse by DAF-UASB system. *Wat. Res.*, **34**(6), pp. 1930-1936.

Metcalf and Eddy Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th Edn., McGraw-Hill.

Vanderhasselt, A. and Verstraete, W. (1999). Short-term effects of additives on sludge sedimentation characteristics. *Wat. Res.*, **33**(2), pp. 381-390.