

전기응집 조건이 활성슬러지 막 여과 저항에 미치는 영향

홍성준¹, 장인성^{*}

¹호서대학교 나노바이오토닉스학과

Effect of operating condition of electro-coagulation on the membrane filtration resistances of activated sludge

Sung-Jun Hong¹, In-Soung Chang^{*}

¹Department of Nanobionics, Hoseo University

요 약 MBR (Membrane Bio-Reactor) 공정은 막 오염을 해결하기 위해 막대한 에너지 소비를 하는 공정으로 알려져 있다. 이를 해결하기 위한 일환으로 전기응집 기술을 MBR에 적용하는 시도가 보고되고 있다. 본 연구에서는 전류밀도를 변화시켜 가며 활성슬러지의 막 여과를 수행하여 전기응집이 막 오염 저감에 미치는 영향과 메커니즘을 파악하고자 하였다. 활성슬러지 혼합액을 전기응집한 후 회분식교반셀로 분리 막의 여과성능을 평가하였다. 전류밀도(A/m²)를 10에서 40으로 증가시켰을 때 총 오염 저항(R_c+R_f) 값이 18%에서 79%까지 감소하여 전기응집으로 인해 분리 막의 여과성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 전기응집 전후로 유기물 농도와 활성슬러지 입도분포 변화는 거의 일어나지 않았다. 여과 성능의 향상은 수산화알루미늄, Al(OH)₃이 생성되어 막 표면에 부착되면서 오염물질이 쌓이게 됨을 방지하는 역할, 즉 dynamic membrane 으로 작용하였기 때문인 것으로 판단되었다.

Abstract MBR (Membrane Bio-Reactor) process is known to consume enormous energy to control membrane fouling. To solve this problem, electro-coagulation technique has been applied to MBR. A series of electro-coagulation was applied to activated sludge suspension under different current density condition. After the electro-coagulations, membrane filtration of the activated sludge suspensions was conducted to investigate the effect of electro-coagulation on the fouling. As current density increased 10 to 40A/m², the total fouling resistance (R_c+R_f) decreased from 18 to 79%, showing that the electro-coagulation improved the membrane filtration efficiency. Both the organic concentration in bulk and the particles size distribution were not nearly changed before and after the electro-coagulation. The enhanced filtration efficiency might be due to the aluminum hydroxide generated from chemical precipitation, which can be acted as a dynamic membrane preventing a deposition of foulants on membrane surfaces.

Key Words : electro-coagulation, membrane bio-reactor (MBR), membrane fouling,

1. 서론

MBR (Membrane Bio-Reactor)은 막 분리 기술을 이용한 생물학적 폐수처리 기술로 기존의 활성슬러지 (Conventional Activated Sludge, CAS)보다 안정적인 유

출수 수질을 확보할 수 있는 장점으로 인해 그 활용이 차츰 증가하고 있다 [1-3]. MBR 공정은 2차침전지 대신 정밀여과 막 (MF, Microfiltration) 또는 한외여과 막 (Ultrafiltration, UF)을 생물반응조에 침지시켜 사용하기 때문에 막 오염 문제가 발생하게 되며 이는 투과 플럭스

이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 '산업융합 특성화 인재양성사업'의 지원을 받아 연구되었음.

*Corresponding Author : In-Soung Chang(Hoseo University)

Tel: +82-41-540-5744 email:cis@hoseo.edu

Received January 6, 2015

Revised (1st February 26, 2015 2nd March 9, 2015)

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

(flux)를 감소시키는 동시에 막간차압 (Trans-Membrane Pressure, TMP)을 증가시켜 에너지 및 운전비용 증가 등을 야기하여 MBR 활용에 중요한 장애물로 작용하고 있다 [2].

막 오염을 저감시키기 위해 공기를 이용한 조대폭기 (coarse aeration)를 수행하거나 화학약품을 이용하는 물리/화학적 방법을 통해 여과 성능을 개선시킬 수 있다. 그러나 조대 폭기는 막대한 에너지 비용이 수반되며, 화학약품의 사용은 슬러지 발생량을 증가시키거나 2차 오염물질을 유발시키는 원인이 될 수 있다 [4].

최근 들어 전기응집 (electro-coagulation)을 이용한 MBR 공정의 여과성능 향상에 관한 연구 결과들이 보고되고 있다 [5]. 일반적으로 전기응집은 기름폐수, 염료폐수, 섬유폐수, 도시 및 산업폐수 뿐만 아니라 유기물, 중금속 등을 처리하는데 사용되어지며 MBR 공정에 적용하였을 때 막 오염의 감소뿐만 아니라 질소와 인을 포함한 유기물 제거에도 효과적이라는 것이 보고되었다 [5-9]. 그러나 MBR 공정에 적용한 전기응집 공정이 어떻게 여과성능을 향상시켰는지에 대한 메커니즘이나 막 오염 저감의 원인분석에 관한 연구는 아직 기초 단계에 머물러 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 전류밀도 하에서 활성슬러지 혼합액에 전기응집을 적용시켰을 때 유기물과 부유미생물 농도 및 입도분포 변화 등을 조사하여 따른 막 여과 성능의 변화를 관찰함과 동시에 막 오염 저감에 대한 근본적인 원인 분석을 시도하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 활성슬러지 배양

실험에 사용된 활성슬러지는 C시 환경 사업소에서 폭기조 혼합액을 채취한 후 정상상태 (steady state)에 도달할 때까지 합성폐수로 장기간 순용시킨 후 전기응집 실험에 사용하였다.

합성폐수의 조성은 Table 1에 나타내었으며 희석시켜 사용하였다. 합성폐수의 주요 탄소원과 질소원으로는 각각 글루코스와 황산암모늄을 사용하였으며 완충용액으로는 중탄산나트륨을 사용하였다. 또한 미생물 성장에 필요한 영양물질을 공급하기 위해 미량의 영양염류를 첨가하였다.

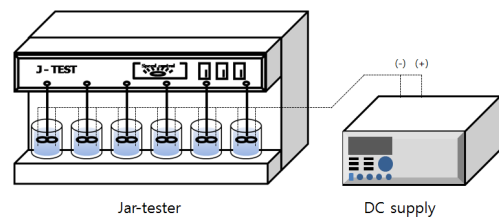
[Table 1] Compositions of synthetic wastewater

Composition	Concentration (mg/L)
Glucose	1,800
peptone	360
Yeast extract	1,200
(NH ₄) ₂ SO ₄	240
KH ₂ PO ₄	60
MgSO ₄ ·7H ₂ O	84
MnSO ₄ ·4~5H ₂ O	15
CaCl ₂ ·2H ₂ O	144
NaHCO ₃	1,440

2.2 전기응집 실험

본 연구에서는 연속식 생물반응기에서 전기응집을 수행하는 대신 연속식 생물반응조에서 배양된 활성슬러지를 채취하여 회분식 여과 실험을 수행하였다. 전기응집의 중요한 운전인자인 전류밀도와 접촉시간을 용이하게 쉽게 변화시켜가면서 여과 성능을 관찰하기에는 장기간의 연속식 실험보다는 회분식 여과 실험이 용이하다고 판단하였다.

전기응집 실험은 아크릴로 제작된 1L 반응기를 이용하여 회분식 (batch) 형태로 수행하였다. 알루미늄 전극간의 거리는 5cm, 침지면적은 37.5cm²로 하였다. 전류밀도 및 시간을 변화시켜 가며 실험을 진행하였다. 교반을 위해 자-테스터 (jar-tester)를 사용했으며 실험동안 공기를 공급하였다. 세부적인 운전조건은 Table. 2에 나타내었다. 실험 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.



[Fig. 1] Schematic of jar-test for the electro-coagulation

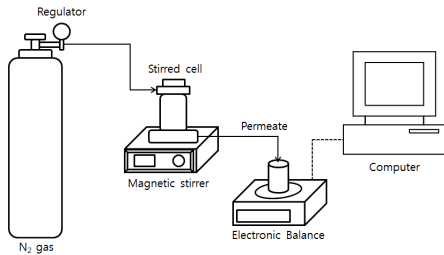
[Table 2] Operation condition for electro-coagulation

Parameter	Value	Unit
Sludge volume	1	L
Current	0~150	mA
Submerged electrode area	37.5	cm ²
Current density	0~40	A/m ²
Operation time	1	hour
Stirring speed	100	rpm
air blower	O	
Electrode type	mono	

2.3 회분식 교반 셀 여과실험

전기응집 이후에 활성슬러지 혼합액의 여과 성능을 확인하기 위해 회분식 교반 셀(Amicon 8200, USA)을 사용하였다. 연속식

실험은 전량 여과 방식 (dead-end filtration)이며 전자저울 (Satorious LP220s, Germany)과 단위시간마다 변하는 투과수의 질량변화를 자동 측정할 수 있는 프로그램이 탑재된 컴퓨터를 연결하여 측정하였다(Fig. 2). 실험에 사용된 분리 막은 분획분자량 (Molecular weight cut-off, MWCO)이 30kDa인 한외여과 막 (Amicon PLTK06210, USA)을 사용했으며 세부적인 여과조건은 Table. 3에 나타내었다.



[Fig. 2] Schematic of stirred batch filtration cell

[Table 3] Operating condition of the stirred batch cell filtration test

Parameter	Value	Unit
Working volume	180	ml
Filtration area	28.7	cm ²
Stirring speed	100	rpm
applied pressure (N ₂ gas)	2	atm
MWCO	30	kDa

2.4 입도분포

막 오염 현상을 설명하는 중요한 도구로 사용되는 입도크기분포 (particle size distribution, PSD)를 측정하였다. 활성슬러지 혼합액의 입도분포는 입도분석기 (Sympatec Helos, Germany)를 이용하여 측정하였으며 측정범위는 1.8~350 um의 영역을 가진다.

2.5 부유물질 및 휘발성 부유물질

부유 미생물의 농도는 MLSS (Mixed liquor suspended solids) 및 MLVSS (Mixed liquor volatile suspended solids)로 나타내었으며 시료 적당량을 GF/C로 여과시킨

후 110°C의 건조기에서 2시간 건조시켜 방냉시킨 후 여과지의 무게차를 이용하여 MLSS를 측정하였다. MLVSS는 건조시킨 여과지를 550°C 전기로에서 30분 동안 회화시킨 후 여과지 무게차를 이용하여 측정하였다.

2.6 용존성 COD

용존성 COD(Soluble COD)는 크롬산화법을 기반으로 COD 시약(HACH reactor digestion method, USA)을 이용하여 측정하였다. GF/C 여과액을 시료로 사용하였으며 2시간동안 150°C에서 가열시킨 후 실온에서 방랭, 이후에 분광광도계(HACH DR/4000U, USA)를 이용하여 350nm에서 흡광도를 측정하였다.

2.7 직렬여과저항모델 (RIS)

직렬여과저항모델(Resistance-in-series model)은 filter cake를 통한 1차원의 Darcian flow의 분석에서 유도되었고 막 오염 현상을 설명하는데 일반적으로 사용되고 있는 모델이다. 식 (1)은 RIS 모델의 기본식이며 일반적으로 세 가지 형태의 저항으로 구분되어 있다. 회분식 교반셀을 통한 여과실험 이후 각 식 (2), (3), (4)를 이용하여 각 저항 값을 계산할 수 있다 [10].

$$J = \frac{\text{driving force}}{\sum \text{resistances}} = \frac{TMP}{\mu \cdot R_t} \quad (1)$$

$$= \frac{TMP}{\mu \cdot (R_m + R_c + R_f)}$$

J: 활성슬러지의 투과 플럭스(L/m²·hr), TMP (transmembrane pressure): 막간 차압, μ: 활성슬러지의 점도, R_t: 총 저항(m⁻¹), R_m: 멤브레인이 가지는 고유의 저항(m⁻¹), R_c: 멤브레인 표면의 케이크 층의 저항(m⁻¹), R_f: 멤브레인 내 흡착되거나 공극의 막힘으로 발생하는 파울링 저항(m⁻¹)

$$R_t = R_m + R_c + R_f \quad (2)$$

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta \cdot J_{iw}} \quad (3)$$

$$R_f = \frac{\Delta P}{\eta \cdot J_{fw}} - R_m \quad (4)$$

$$R_c = \frac{\Delta P}{\eta \cdot J_{fw}} - (R_m + R_f) \quad (5)$$

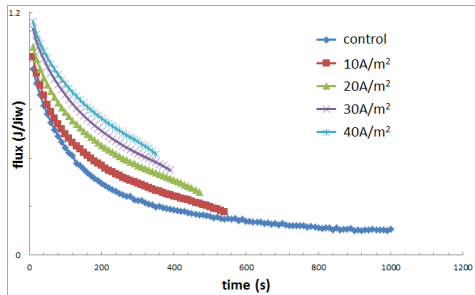
J_{iw} : initial water flux, 슬러지여과를 하기 전의 순수를 여과한 플럭스, J : flux, 슬러지를 여과한 플럭스, J_{fw} : final water flux, 멤브레인 표면에 있는 케이크 층을 세척한 이후의 순수를 여과한 플럭스

3. 결과 및 고찰

3.1 플럭스(flux) 변화

실험실의 연속 회분식 반응조에서 장기간 순용시킨 활성슬러지 혼합액을 전기응집조로 이송한 후 다양한 전류밀도를 인가하며 전기응집을 수행하였다. 이후 활성슬러지 혼합액의 여과성능을 알아보기 위해 회분식 교반셀로 이송한 후 플럭스를 측정하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3은 시간에 따른 상대플럭스 변화(J/J_{iw} , J : sludge flux, J_{iw} : initial water flux)를 나타낸 것이다. 약 2기압으로 여과실험을 수행한 결과, 대조군의 경우 약 17분의 여과시간이 필요했던 반면, 본 연구에서의 최대 전류밀도 값인 $40A/m^2$ 에서는 6분으로 여과 시간이 감소하였고 플럭스는 크게 향상한 것을 알 수 있었다. 즉, 전류밀도가 증가함에 따라 상대플럭스가 증가하였고, 결과적으로 여과시간이 감소하였다. 즉, 전기응집이 플럭스 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 3] Normalized flux variation over filtration time by current density

Fig. 3의 플럭스 데이터를 이용하여 각 활성슬러지 혼합액의 저항 값을 RIS 모델을 이용하여 계산하였고 이를 Table 4에 정리하였다.

[Table 4] Variation of the resistance value according to current density applied

Current Density (A/m^2)	Resistance ($\times 10^{12} m^{-1}$)				
	R_m	R_f	R_c	R_t	R_c+R_f (ratio of decrease)
0	0.92	0.2	6.02	7.14	6.22
10	0.83	0.01	5.11	5.95	5.12 (18%)
20	0.95	0.07	3.44	4.46	3.51 (44%)
30	0.88	0.07	1.43	2.38	1.50 (76%)
40	0.87	0.08	1.21	2.16	1.29 (79%)

막 오염의 변화는 Table 4에 나타낸 것처럼 전기응집으로 인한 저항 값의 변화를 통해 설명할 수 있다. 막 내부에 용존 물질의 흡착이나 내부 세공 막힘으로 인해 증가하는 R_f (fouling resistance)와 막 표면에 축적되는 케이크 층에 의한 R_c (cake resistance) 값이 전류밀도가 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 대조군의 경우 총 오염 저항 (R_c+R_f)이 $6.22 \times 10^{12} m^{-1}$ 이었으며 전류밀도가 증가함에 따라 총 오염 저항이 감소하여 전류밀도가 $40A/m^2$ 일 때 $1.29 \times 10^{12} m^{-1}$ 까지 약 79% 감소하였다. 특히 케이크 저항인 R_c 가 크게 감소하였다. 즉, 대조군에 비해 R_c+R_f 저항 값이 전류밀도의 크기에 따라 감소하고 여과 저항이 감소되었고, 대부분 케이크 저항에 의한 것으로 판명되었다.

3.2 입도분포

MBR 공정에서 활성슬러지의 입자크기와 막 오염은 밀접한 관계를 가지고 있다. 본 연구에서도 전기응집에 의한 입도 크기의 변화를 관찰함으로써 막오염 감소의 원인을 찾고자 하였다.

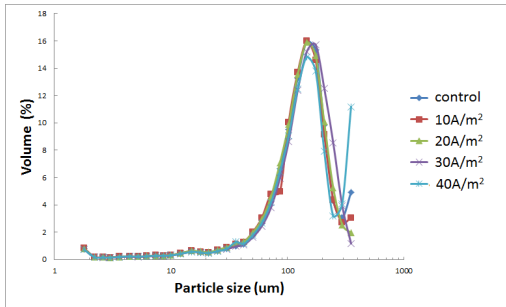
Kozeny-Carman 식을 통해 분리막 표면에 형성된 케이크 층의 저항을 계산할 수 있으며 아래 식 (6)에서처럼 입자크기 (d)의 증가는 케이크층 저항 (R_c)의 감소를 유발함을 알 수 있다. 즉 입자크기 증가가 위에서 지목된 케이크층 저항, R_c 의 감소로 이어짐을 예상할 수 있기 때문에 전기응집 전/후의 입자크기를 확인하면 막오염 저감의 원인을 찾을 수 있을 것으로 판단되었다.

$$R_c = \frac{M \cdot \alpha}{A_m} = \frac{M}{A_m} \times \frac{180(1-\epsilon)}{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \epsilon^3} \quad (6)$$

α : 케이크비저항 (m/kg), A_m : 멤브레인 표면(m^2), M : MLSS 무게 (kg), ρ_p : 입자 밀도(kg/m^3), d_p : 입자 직경(m), ϵ : 공극률 (dimensionless)

Fig. 4는 전류밀도 변화에 따른 활성슬러지의 입도분포도를 나타낸 것이다. Table 5는 평균입도크기 (average particles size)와 중간입도크기 값 (median size)을 정리한 것이다. 기존 문헌에서는 전기응집이 부유물질들을 효과적으로 응집시킬 수 있다고 보고하고 있다 [9, 11]. 그러나 본 실험에서의 낮은 전류밀도 하에서는 전기응집에 의한 응집 효과가 두드러지게 나타나지 않았다. 1시간의 짧은 전기응집 시간동안 활성슬러지 입자 크기 변화에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 판단된다. 이상의 고

찰을 통해 전류밀도가 증가함에 비해 입자 크기가 대조군과 유사한 결과를 보였기 때문에, 전기응집 후 막 여과 성능이 증가한 것의 주요한 원인으로 입자크기 증가에 의한 것으로 보기는 어렵다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 다른 요인에 의해 막 여과 성능이 증가한 것으로 예상되며, 전기응집이 수행된 기간 동안 활성슬러지의 생리학적 변화를 살펴보아야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.



[Fig. 4] Comparison of the particle size distribution by current density

[Table 5] Comparison of the average & median size by current density

Particle size	current density (A/m ²)				
	0	10	20	30	40
median (um)	109	116	107	100	98
average (um)	124	134	117	109	107

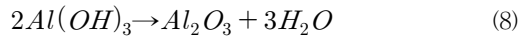
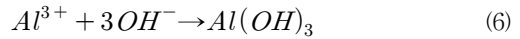
3.3 부유 미생물 농도 & 용존성 COD

전기응집이 미생물 군집과 용존 유기물에 미치는 영향을 알아보기 위해 MLSS, MLVSS 및 용존성 COD (soluble COD)를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

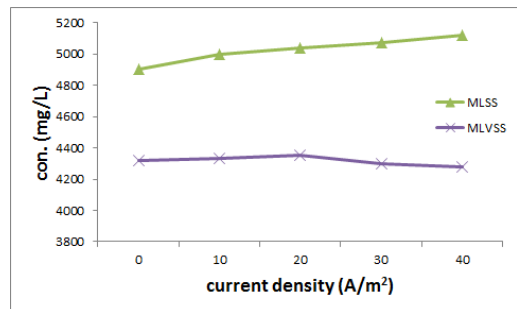
MBR 공정에서 높은 MLSS 농도는 유기물 제거에는 유리하지만 높은 점도로 인해 막 오염을 유발하는 원인으로 지목된다. 따라서 MLSS 농도의 증가는 막 여과 성능이 감소하는 개연성을 가지고 있다.

전류밀도가 증가함에 따라 MLSS 농도는 4,900mg/L에서 최대 5,120mg/L까지 증가한 반면에 MLVSS 농도는 약 4,300mg/L로 거의 변화가 일어나지 않았다 (Fig. 5). MLSS 농도의 증가는 유기물이 아닌 무기물의 생성으로 인한 것으로 판단된다. 즉, 전기응집으로 인해 실험에 사용된 알루미늄 전극판 표면에서 알루미늄 이온이

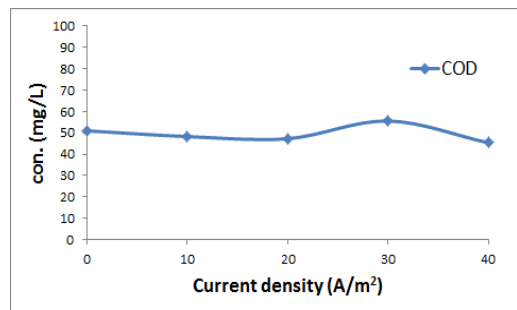
용출되고 용출된 알루미늄이 수산화알루미늄 (식 6), 수용액 내의 인과 반응하여 발생하는 인산알루미늄 (식 7) 및 수산화알루미늄으로 생성되는 산화알루미늄 (식 8) 등이 생성될 수 있다. 이렇게 생성된 불용성 무기물이 MLSS 농도의 증가 요인으로 작용하였다 [11-13].



유기물의 양을 간접적으로 알 수 있는 용존성 COD의 경우 농도가 약 50mg/L로 큰 변화 없이 유지되었다 (Fig. 6). 이를 통해 용존성 유기물질은 전기응집에 의해 플러크로 흡착되어 감소한다고 볼 수 없다. 즉 본 연구에서의 전기응집 짧은 시간 동안에는 용존성 유기물질의 농도가 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었다.



[Fig. 5] Variation of MLSS and MLVSS concentration by current density



[Fig. 6] Variation of Soluble COD concentration by current density

3.4 다이내믹 막 dynamic membrane)

전기응집시 알루미늄 전극판 표면에서 용출되는 알루미늄

미늄 이온 (Al^{3+})이 불용성 수산화알루미늄, $Al(OH)_3$ 로 침전되면서 막 표면 위에 또 다른 형태의 막을 형성하는 다이나믹막 (dynamic membrane) 역할을 하는 것으로 추정된다. 여과 공정에서 구조토를 이용하여 여재를 미리 코팅 (pre-coating)하여 여과하면 오염물질이 구조토 층에 침적되어 본 여재가 심각히 오염되는 것을 방지하여 여과효율을 보장하는 여과보조재 (filter aid)의 역할을 하는 것과 마찬가지로 기능을 한 것으로 추정된다. 즉, 다이나믹막이 여과보조재의 영향을 하여 분리막의 오염을 방지한 것으로 판단되어진다. 전기응집 이전의 케이크 층은 여과가 진행되면서 구동압력에 의해 압축되어 점차 기공크기가 감소하게 되면서 막 오염이 심해지지는 반면에, 전기응집 이후에는 생성되는 불용성의 수산화알루미늄, 인산알루미늄 및 수산화알루미늄으로 인해 분리막 표면에 침착되어 분리막 표면에 막오염 물질들이 직접적으로 쌓이는 것을 방지하는 역할, 즉 다이나믹막의 기능을 하였기 때문에 케이크층 저항이 감소한 것으로 판단되어진다 [4,14].

4. 결론

본 연구에서는 전기응집을 활성슬러지 혼합액에 적용한 후 분리막으로 여과하여 전기응집이 막 오염에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 전류밀도가 증가함에 따라 막 여과 성능이 크게 향상되었다. 즉, 전기응집에서 전류밀도는 막 오염 제어의 중요한 인자로 볼 수 있다.
- 2) 전류밀도가 증가함에 따라 활성슬러지의 입도분포는 큰 차이를 나타내지 않았다. 즉, 본 연구에서의 전류밀도 크기와 접촉시간 하에서는 전류밀도는 활성슬러지의 입자크기 변화에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.
- 3) 전기응집 후 MLSS 농도가 증가하였으나 MLVSS는 증가하지 않았다. 이는 전기응집에 의해 생성된 알루미늄계 불용성 염에 의한 무기성분이 증가한 것으로 추정된다.
- 4) 이렇게 생성된 불용성 알루미늄 염은 다이나믹 막 역할을 수행한 것으로 보이며, 이로 인해 전기응집이 막 오염을 저감시킨 것으로 추정되어진다. 추후 다이나믹 막에 의한 막 오염 감소현상의 메커니즘

을 밝힐 수 있는 추가연구 및 해석이 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] Simon Judd, "The status of membrane bioreactor technology", *Trends in Biotechnology* 26, pp.109-116, 2008
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.11.005>
- [2] Fangang Meng, So-Ryong Chae, Anja Drews, Matthias Kraume, Hang-Sik Shin, Fenglin Yang, "Recent advances in membrane bioreactors(MBRs): Membrane fouling and membrane material", *Water Research* 43, pp.1489-1512, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- [3] Anja Drews, "Membrane fouling in membrane bioreactors-Characterisation contradictions, cause and cures", *Journal of Membrane Science* 363, pp.1-28, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2010.06.046>
- [4] Jun-Young Kim, "Application of in-situ electro-coagulation (EC) for control of the membrane fouling in MBR(Membrane Bio-Reactor): Correlation between membrane fouling and microbial characteristics of activated sludge, Hoseo University Ph.D thesis, 2011
- [5] Khalid bani-melhem, Maria Elektorowicz, "Development of novel submerged membrane electro-bioreactor(SMBR): Performance for fouling reduction", *Environ. Sci. Technol* 44, pp.3298-3304, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es902145g>
- [6] Mohammad. M. Emamjomeh, Muttucumar. Sivakumar, "Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes", *Journal of Environmental Management* 90, pp.1663-1679, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011>
- [7] Yunny Meas, Jose A. Ramirez, Mario A. Villalon, Thomas W. Chapman, "Industrial wastewaters treated by electrocoagulation", *Electrochimica Acta* 55, pp.8165-8171, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2010.05.018>
- [8] Alaadin A. Bukhari, "Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater", *Bioresource Technology* 99, pp.914-921, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.015>
- [9] Inoussa Zongo, Amadou Hama Maiga, Joseph Wethe, Gerard Valentin, Jean-Pierre Leclerc, Gerard Paternotte, Francois Lapique, "Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes:

Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance”, Journal of Hazardous Materials 169, pp.70-76, 2009

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.072>

[10] In-Soung chang, Robert Field, Zhanfeng Cui, “Limitations of resistance-in-series model for fouling analysis in membrane bioreactors: A cautionary note”, Desalination and Water Treatment 8, pp.31-36, 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2009.687>

[11] Peter K. Holt, Geoffrey W. Barton, Cynthia A. Mitchell, “The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology”, Chemosphere 59, pp.355-367, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>

[12] Guohua Chen, “Electrochemical technologies in wastewater treatment”, Separation and Purification Technology 38, pp.11-41, 2004.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>

[13] Engracia Lacasa, Pablo Canizares, Cristina Saez, Francisco J. Fernandez, Manuel A. Rodrigo, “Electrochemical phosphates removal using iron and aluminium electrodes”, Chemical Engineering Journal 172, pp.137-143, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.080>

[14] Jung-Kyoon Chon, Younkyoo Kim, “Investigation of the Growth Kinetics of Al Oxide Film in Sulfuric Acid Solution”, Journal of the Korean Chemical Society 54, pp.380-386, 2010.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5012/jkcs.2010.54.4.380>

[15] S. Ibeid, M. Elktorowicz, J.A. Oleszkiewicz, “Modification of activated sludge properties caused by application of continuous and intermittent current”, Water Research 47, pp.903-910, 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.020>

홍성준(Sun-Jun Hongg)

[정회원]



- 2014년 2월 : 호서대학교 환경공학과 (환경공학 학사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 나노바이오트로닉스학과 재학 중 (환경공학 석사)

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도

장인성(In-Soung Chang)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공업과학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공업과학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 공업과학과 (공학박사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도, 청정기술, 반도체 공정기술, 반도체산업 폐수처리