



전기응집-MBR 공정의 전류밀도와 접촉시간이 막 오염에 미치는 영향과 막 오염 저감 속도론적 고찰

Effect of current density and contact time on membrane fouling in electrocoagulation-MBR and their kinetic studies on fouling reduction rate

엄세은¹·장인성^{2*}

Se-Eun Um¹·In-Soung Chang^{2*}

¹호서대학교 나노바이오트로닉스학과, ²호서대학교 환경공학과

¹Department of Nanobionics, Hoseo University, ²Department of Environmental Engineering Hoseo, University

ABSTRACT

Recently EC-MBR (Electrocoagulation - Membrane Bio Reactor) has been suggested as one of alternative processes to overcome membrane fouling problems. Most important operational parameters in the EC-MBR are known to current density and contact time. Their effect on membrane filtration performances has been reported well, however, quantitative interrelationship between both parameters not been investigated yet. The purpose of this study is to give a kinetic model suggesting the current density and the contact time required to reduce the membrane fouling. The 4 different set of current densities (2.5, 6, 12 and 24 A/m²) and contact times (0, 2, 6 and 12 hr) were selected as operational parameters. After each electro-coagulation under the 16 different conditions, a series of membrane filtration was carried out. The membrane fouling decreased as the current density and contact time increased, Total fouling resistances under different conditions, $R_t (=R_c+R_f)$ were calculated and compared to those of the controls (R_0), which were calculated from the data of experiments without electro-coagulation. A kinetic approach for the fouling reduction rate (R_t/R_0) was carried out and the equation $\rho_i^{0.46}t=7.0$ was obtained, which means that the product of current density and the contact time needed to reduce the fouling in certain amounts (in this study, 10% of fouling reduction) is always constant.

Key words: Electrocoagulation, Kinetics, Membrane bio-reactor (MBR), Membrane fouling, Modeling

주제어: 전기응집, 속도론, MBR, 막 오염, 모델링

1. 서 론

MBR (Membrane bio-reactor)은 기존의 표준 활성 슬러지 공정에 비해 고액 분리가 완벽하여 안정적인 유출수질을 유지하고 2차침전조에 필요한 넓은 부지면적을 필요로 하지 않는 등 많은 장점을 가지고 있기

때문에 도시 및 산업폐수 처리에 널리 사용되고 있다 (Hua et al., 2015). 그러나 MBR 공정 중에 발생하는 막 오염 (Membrane fouling)을 해결하기 위한 운영 및 유지비용이 증가하여 문제점으로 지목되고 있다. 막 오염을 제어하기 위해 다양한 물리적 (역세척, 초음파 및 조대폭기 등), 화학적 (산, 염기 및 산화제 사용한 세정법 등) 및 생물학적 방법 (quorum quenching 등) 등 다양한 방법이 시도되고 있다 (Xu et al., 2013;

Received 5 July 2017, revised 2 August 2017, accepted 7 August 2017

*Corresponding author: In-Soung Chang(E-mail: cis@hoseo.edu)

pp. 273-279
pp. 281-287
pp. 289-296
pp. 297-301
pp. 303-310
pp. 311-319
pp. 321-328
pp. 329-338
pp. 339-346
pp. 347-356
pp. 357-362

Iorhemen et al., 2017; Siddiqui et al., 2015).

최근에 화학약품인 응집제를 사용하지 않으면서도 응집효과를 얻는 전기응집 (Electro-coagulation) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 수중에 침지된 전극에 전류를 흘려 양극에서 알루미늄 이온 (Al^{3+}) 과 같은 금속 양이온을 용출시켜 수중의 콜로이드성 물질을 응집하는 공정이다 (Tafti et al., 2015). 전기응집 기술은 수중의 중금속 처리에도 유용한 요소기술로 사용되고 있다 (Heidmann and Calmano, 2008; Meunier et al., 2009).

이러한 전기응집 기술을 MBR에 접목하여 막 오염을 제어할 수 있음이 최근 들어 보고되고 있다 (Sadeddin et al., 2011; Liu et al., 2012). MBR의 막 오염에 결정적인 역할을 하는 콜로이드성 물질이 응집되어 막 오염을 완화시킬 수 있기 때문이다. 또한, 화학물질의 제조, 보관, 운송 및 사용에 안전기준이 계속 강화되고 있는 현 시점에서 응집제를 직접 사용하지 않고 전기응집을 통해 MBR의 막오염을 제어할 수 있다면 큰 장점이 될 수 있다.

실제로 MBR에 전기응집을 결합한 EC-MBR (Electro-coagulation MBR) 공정을 통해 막 오염을 제어했다는 연구 결과들이 꾸준히 보고되고 있다 (Melhem and Elektorowicz, 2010; Sasson et al., 2011; Zhu et al., 2005). 특히 전기응집 공정에서 가장 중요한 두 가지 운전변수인 전류밀도 (current density)와 접촉시간 (contact time)이 증가하면 막 오염 제어 효과가 증대된다는 연구결과들이 보고되고 있다 (Ibeid et al., 2013; Tafti et al., 2015). 즉, 전류밀도와 접촉시간 각각이 막 오염에 미치는 영향은 비교적 소상히 밝혀져 왔다. 그러나 막오염 저감 속도에 관한 속도론적 접근 (kinetic approach)을 통해 두 가지 운전조건 (전류밀도와 접촉시간)과 막 오염의 정량적인 상관관계를 모델링하는 연구는 아직 시도되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 EC-MBR의 전류밀도와 접촉시간이 막 오염에 미치는 영향을 정량화한 후 속도론적 방법론을 통해 막 오염 저감에 필요한 전류밀도와 접촉시간을 수식화 하여 모델링 하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 활성슬러지 배양

본 연구에서 사용한 활성 슬러지 혼합액은 C시 환경

사업소의 포기조에서 채취해온 것으로, 실험실에서 수 개월간 합성폐수를 사용하여 순응시켰다. 제조한 합성폐수 원액의 성분과 농도를 Table 1에 나타내었고 이를 활성슬러지 배양에 적절한 f/m 비로 조정하여 희석하여 공급하였다. 활성 슬러지를 정상상태 (Steady state)로 만들기 위해 SRT (Solids retention time)를 조절하여 일정량의 잉여 슬러지를 배출시켰고, 세부적인 운전 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Synthetic wastewater composition

Composition	Concentration (mg/L)
Glucose	2,000
peptone	300
Yeast extract	800
$(NH_4)_2SO_4$	200
KH_2PO_4	50
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	70
$MnSO_4 \cdot 4 \sim 5H_2O$	15
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	120
$NaHCO_3$	1,000
COD	3,335
T-N	230
T-P	71.5

Table 2. Operating condition of sludge acclimation

Parameters	Values
Reactor Working Volume (L)	16
MLSS (mg/L)	$6,000 \pm 500$
F/M ratio (gCOD/gMLSS·day)	0.13 - 0.15
HRT (Hydraulic Retention Time) (hr)	12.8
SRT (Solids Retention Time) (day)	7.2
pH	8.3 ± 0.5
Temperature ($^{\circ}C$)	15 ± 3

2.2 전기응집 (Electro-coagulation)

전기응집 실험을 위해 사용한 반응조는 아크릴 재질의 원통형 반응기로 내경 110mm, 외경 120mm, 높이가 155mm의 크기로 제작되었다 (Fig. 1). 반응조의 덮개 역시 아크릴 재질로 제작되었으며, 전극을 고정시킬 수 있는 흡과 자테스터 (Jar-tester)의 교반기 부분이 들어갈 수 있는 공간이 뚫려있다. 50×130mm 크기로 자른 알루미늄판을 전기응집 전극으로 사용하였다.



Table 3. Operating condition of batch typed electro-coagulation reactor

Parameter	Value			
Run #	Run 1-4	Run 5-8	Run 9-12	Run 13-16
Reactor Working Volume (L)	1			
Distance between electrodes (cm)	5			
Submerged electrode area (cm ²)	33.5			
Current density (A/m²)	24	12	6	2.5
Operation time (hr)	0, 2, 6, 12	0, 2, 6, 12	0, 2, 6, 12	0, 2, 6, 12
Stirring speed (rpm)	100			
Air supply (L/min)	0.5			

반응기에 1L의 활성 슬러지를 담고, 전극 간 거리를 50mm로 고정시킨 후 덮개를 닫는다. 실험 중 활성 슬러지가 완전혼합이 될 수 있도록 자테스터 (SF-6, MTOPS, Republic of Korea)로 교반시켜 주었고, 반응기 외부에서 공기펌프를 사용하여 공기를 공급해 주었다.

전기응집에 적용하는 일반적인 전류밀도값, 2~30 A/m²를 감안하여 본 연구에서는 전류밀도를 2.5~24 A/m²를 적용하였다. 즉, 전류밀도는 2.5, 6, 12, 24 A/m²로 변화시켰으며, 각각의 전류밀도 하에서 접촉시간을 0, 2, 6, 12시간으로 달리 하였다. 접촉시간 0시간은 전기응집을 인가하지 않은 대조군 (control)으로 하였다. 따라서 전류밀도와 접촉시간이 각각 다른 16번의 전기응집 실험을 수행하였다. 전기응집 실험 (run 1 to 16)의 세부적인 전기응집 운전조건을 Table 3에 요약하였다.

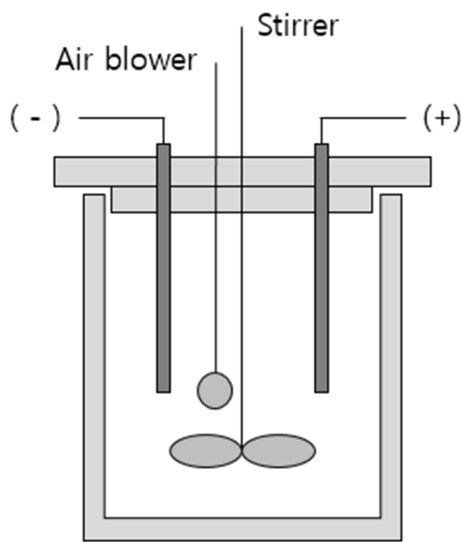


Fig. 1. Schematic of batch type electro-coagulation reactor.

2.3 막 오염 정량화

활성 슬러지의 막 여과 성능을 확인하기 위하여 Fig. 2와 같은 회분식 교반 셀 (Amicon 8200, Amicon, USA)을 이용하였다. 막을 통과한 투과수는 컴퓨터에 연결된 전자저울 (LP220s, Satorious, Germany)을 통해 일정 간격으로 기록되었다. 자세한 실험 조건은 Table 4와 같다. 실험에 사용한 분리막은 디스크형 한외여과막 (UF)이다. 막의 세부 특징은 Table 5에 요약하였다.

일련의 여과실험 즉, i) 순수 여과, ii) 슬러지 여과, iii) 분리막 세척 후 순수 여과를 통해 J_{iw} (초기 물 플럭스), J (활성 슬러지 플럭스), J_{fw} (최종 물 플럭스)를 구하였다. 이후 식 (1)과 같은 직렬여과저항 모델

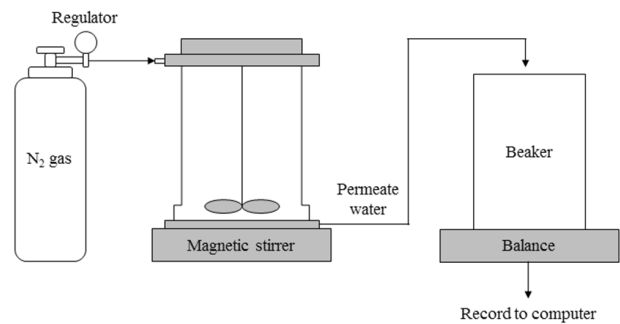


Fig. 2. Schematic diagram of stirred cell filtration system.

Table 4. Operating condition of membrane filtration using the batch stirred cell

Parameter	Value
Working volume (mL)	180
Filtration area (cm ²)	28.7
stirring speed (rpm)	100
applied pressure (N ₂ gas) (atm)	2

pp. 273-279
pp. 281-287
pp. 289-296
pp. 297-301
pp. 303-310
pp. 311-319
pp. 321-328
pp. 329-338
pp. 339-346
pp. 347-356
pp. 357-362

Table 5. Characteristics of the membranes used for the membrane separation

Filtration discs	
Marker	Amicon PLTK06210 (USA)
Membrane and configuration	Ultrafiltration Discs
MWCO (Molecular weigh cut-off)	30,000 Da
Active membrane material	Regenerated Cellulose

(Resistance in series model) (Park et al., 2015)에 적용시켜 R_m (분리막 저항), R_f (분리막 공극 내부 오염 저항), R_c (케이크층 저항)를 각각 구하였다.

$$J = \frac{TMP}{\mu(R_m + R_c + R_f)} \quad (1)$$

J : Flux

μ : viscosity of permeate

R_m : intrinsic membrane resistance

R_c : cake layer resistance

R_f : internal pore fouling resistance

3. 결과 및 고찰

3.1 전기응집 조건에 따른 플럭스 변화

전류밀도값을 2.5, 6, 12, 24 A/m²으로 변화시켜가며 전기응집을 수행한 후 활성슬러지의 여과성능의 변화를 확인하기 위해 회분식여과셀을 이용하여 플럭스를 측정하였다. Fig. 3에 전류밀도값이 24 A/m²인 경우의 여과시간에 따른 상대플럭스 (normalized flux, J/J_{iw}) 즉, 순수플럭스 (J_{iw})에 대한 활성슬러지의 여과플럭스 (J)를 상대적으로 표시한 것)를 나타내었다. 예상한대로 접촉시간이 0, 2, 6, 12시간으로 증가할수록 상대플럭스 (J/J_{iw}) 값이 크게 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 전류밀도값이 24 A/m²보다 적은 다른 경우에도 모두 동일한 경향을 보이고 있었다.

이와 같이 전기응집을 수행하였을 때 여과성능이 향상되는 이유로는 입도분포 변화, 슬러지 탈수성 증가, EPS (Extra-cellular Polymeric Substances)의 감소 (Melhem and Edward, 2012) 등으로 설명되어진다. 전기응집이 수행되면 활성 슬러지 입자의 제타전위가 감소

되어 입자간의 반발력을 감소시키므로 작은 크기의 콜로이드성 입자들이 응집되어 입자의 평균크기가 증가하게 된다. 그러나 접촉시간이 증가하면 입자의 평균크기가 다시 줄어드는 현상이 발생하는데, 이는 전기침투현상으로 인해 플록에서 결합수가 제거되어 수축되기 때문이 것으로 설명한다 (Ibeid et al., 2015). 이렇게 전기응집은 작은 입자들이 응집되어 큰 플록을 형성하고, 플록의 결합수를 제거하는 메커니즘을 통해 슬러지 여과성을 개선시키는 것으로 알려져 있다. 또한 유출수질이 기존의 MBR 공정보다 향상된다고 알려져 있다. 예를 들면 접촉시간이 600분일 때 COD 제거율은 전류밀도가 200 A/m²일 때 약 40%이나, 400 A/m²으로 증가되면 약 45%, 600 A/m²에서는 약 50%, 800 A/m²에서는 50% 이상으로 증가하는 것으로 보고되었다 (Ivonne et al., 2010). NH₃-N과 T-P 또한 기존의 MBR 공정에서 보다 전기응집을 수행했을 때 제거효율이 더 뛰어난 것으로 보고되고 있다 (Liu et al., 2013). 이는 적당한 전류밀도 하에서는 미생물이 전기적 자극을 받아 슬러지 활성이 향상되어 유기물 제거에 효율적이라고 설명하고 있다 (Liu et al., 2012). 이와 같이 EC-MBR의 여과성능 및 여과수질 향상 메커니즘에 관한 연구들은 이미 여러 문헌에서 정립되어 있으므로 본 연구에서는 이에 관한 설명은 상세히 하지 않기로 한다.

일련의 실험에서 얻은 여과 자료를 정량적으로 해석하기 위해 직렬여과저항 모델을 이용하여 각 저항값들을 계산한 후 Table 6에 정리하였다. 이 때 막 오염의 주된 원인인 R_c 과 R_f 을 합한 값 ($=R_c+R_f$)을 총오염저항 (R_t , total fouling resistance)으로 정의하고, 막 오염을 정량하는 지표로 사용하였다. 즉, 이 값을 전기응집을 수행하지 않은 대조군의 값과 비교하여 막 오염이 얼마나

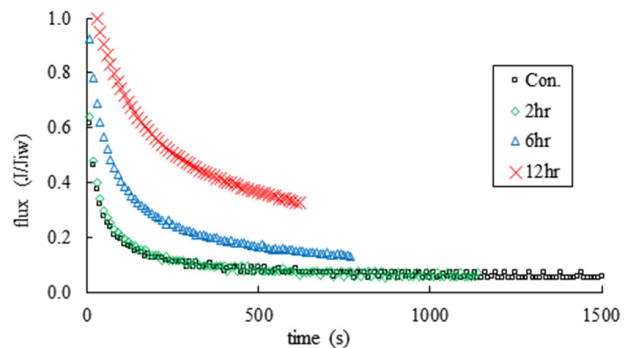


Fig. 3. Flux variation over filtration time according to contact time under the current density of 24A/m².



Table 6. Variation of the resistance values according to the applied current density and the contact time
 (a) Current density : 24A/m²

Contact time (hr)	Resistance (x10 ¹² m ⁻¹)					
	R _m	R _f	R _c	R _T	R _c + R _f	
					-	% reduction
0	1.21	0.323	21.1	22.6	21.4	-
2	1.42	0.323	18.2	20.0	18.5	13 %
6	1.39	0.306	8.01	9.71	8.32	61 %
12	1.48	0.167	2.79	4.44	2.95	86 %

(b) Current density : 12A/m²

Contact time (hr)	Resistance (x10 ¹² m ⁻¹)					
	R _m	R _f	R _c	R _T	R _c + R _f	
					-	% reduction
0	1.33	0.288	24.01	25.66	24.33	-
2	1.32	0.288	22.34	23.95	22.63	7 %
6	1.36	0.242	17.82	19.42	18.06	26 %
12	1.34	0.243	15.94	17.53	16.18	33 %

(c) Current density : 6A/m²

Contact time (hr)	Resistance (x10 ¹² m ⁻¹)					
	R _m	R _f	R _c	R _T	R _c + R _f	
					-	% reduction
0	1.26	0.259	24.1	25.7	24.4	-
2	1.25	0.259	22.5	24.0	22.7	7 %
6	1.26	0.340	18.9	20.5	19.3	21 %
12	1.22	0.248	18.5	20.0	18.7	23 %

(d) Current density : 2.5A/m²

Contact time (hr)	Resistance (x10 ¹² m ⁻¹)					
	R _m	R _f	R _c	R _T	R _c + R _f	
					-	% reduction
0	1.32	0.137	18.3	20.0	18.6	-
2	1.31	0.137	17.5	18.9	17.6	6 %
6	1.31	0.114	16.1	17.5	16.2	13 %
12	1.29	0.133	15.7	17.1	15.8	15 %

감소하였는지를 백분율 (%)로 표시하였다. 이렇게 얻은 총오염저항값의 감소비를 기준으로 하여 다음 절에서 막 오염 감소 속도에 관한 모델링 작업을 수행하였다.

3.2 전류밀도 및 접촉시간에 따른 막오염 저감 속도 모델링

전기응집에 의하여 막 오염이 저감되는 속도를 모

델링하기 위해, Table 6의 자료 중에서 총오염저항감소율 (R_t / R_0), 즉, 대조군의 총오염저항 (R_0) 대비 전기응집 실험군의 총오염저항 (R_t)의 감소율만 정리하여 Table 7에 요약하였다.

접촉시간에 따라 총오염저항값 (R_t)이 감소되는 현상이 몇 차 반응인지 알아보기 위하여, Table 7에 주어진 제거율 자료를 ln값으로 전환하고, x축에는 접촉

pp. 273-279
 pp. 281-287
 pp. 289-296
 pp. 297-301
 pp. 303-310
 pp. 311-319
 pp. 321-328
 pp. 329-338
 pp. 339-346
 pp. 347-356
 pp. 357-362

Table 7. Reduction of the total fouling resistance over the control (R_t/R_0)

Current Density (A/m ²)	Reduction of total fouling resistance over the control (R_t/R_0), %			
	Contact time (hr)			
	0	2	6	12
2.5	-	6	13	15
6	-	7	21	23
12	-	7	26	33
24	-	13	61	86

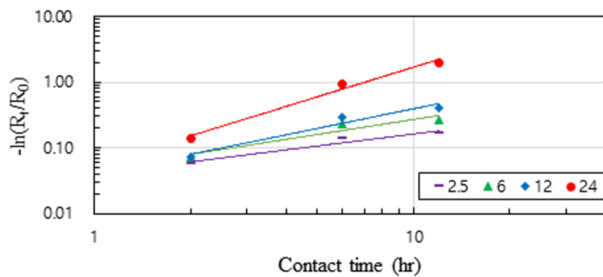


Fig. 4. Plot of the fouling reduction rate, $-\ln(R_t/R_0)$ vs. the contact time, t as a function the applied current density.

시간을, y축에는 총오염저항감소율 (R_t/R_0)을 대입한 그래프를 그렸다 (Fig. 4).

Fig. 4를 통해 접촉시간에 따라 총오염저항감소율 (R_t/R_0)의 변화가 선형적으로 나타나기 때문에 접촉시간에 따라 총오염저항값 (R_t)이 감소되는 현상을 1차 반응으로 해석할 수 있음을 확인하였다. 따라서 총오염저항감소율을 식 (2)와 같은 1차반응식으로 세울 수 있다.

$$\frac{dR_t}{dt} = -k'R_t \quad (2)$$

R_t : total fouling resistance ($= R_c + R_f$) at time t [m⁻¹]

t : contact time [hr]

k' : temporary rate constant [hr⁻¹]

전류밀도 (ρ)가 막 오염 저감에 영향을 미치기 때문에 임시반응속도상수 k' 는 전류밀도의 n 승에 비례한다고 가정하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)와 (3)을 합하여 정리하면 식 (4)로 표현된다. 식 (4)를 변수분리한 후, 접촉시간을 0부터 임의시간 t 까지, 총오염저항은 R_0 부터 R_t 까지 적분하여 정리하면 식 (5)를

얻는다. 여기서 R_0 는 접촉시간이 0 hr인 즉, 대조군의 총오염저항이다.

$$k' = k\rho_i^n \quad (3)$$

$$\frac{dR_t}{dt} = -k\rho_i^n R_t \quad (4)$$

$$\ln \frac{R_t}{R_0} = -k\rho_i^n t \quad (5)$$

k : rate constant [hr⁻¹]

R_0 : total fouling resistance ($=R_c+R_f$) at time 0 (=control) [m⁻¹]

ρ_i : Current density [A/m²]

n : Constant involving with the current density [m²/A]

식 (5)를 전류밀도 (ρ)에 관한 식으로 정리한 후, 양변에 자연로그를 취하면 식 (6)을 얻는다. 식 (6)을 이용하여 y축을 전류밀도로 놓고, x축은 접촉시간으로 놓고, 즉 $\ln \rho_i$ vs. t 의 그래프를 그리면 직선이 얻어진다. 직선의 기울기와 y 절편 값을 이용하여 상수, n 과 k 를 얻을 수 있다.

$$\ln \rho_i = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[\frac{1}{k} (-\ln \frac{R_t}{R_0}) \right] \quad (6)$$

Fig. 4로부터 총오염저항 감소율 (R_t/R_0)이 10%에 해당되는 접촉시간 ($[-\ln(R_t/R_0) = -\ln(90/100) = 0.105]$)을 읽어내고, 해당되는 값들을 정리하여 각 전류밀도 별로 나타낸다 (Table 8). 총오염저항감소율이 10%가 되는 부분을 선택한 이유는 y축의 10% 인근 (0 -15% 사이)에서 x축과 평행한 직선을 그었을 때 네 종류의 전류밀도 곡선을 모두 만나는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 10% 되는 부분을 임의로 선정하여 총오염저항감소율의 기준으로 삼았다.

Table 8. Current densities and contact times when the total fouling resistance (R_t) reduced to 10 % of the control

Current density (A/m ²)	Contact time (hr)
2.5	4.30
6	2.85
12	2.60
24	1.50

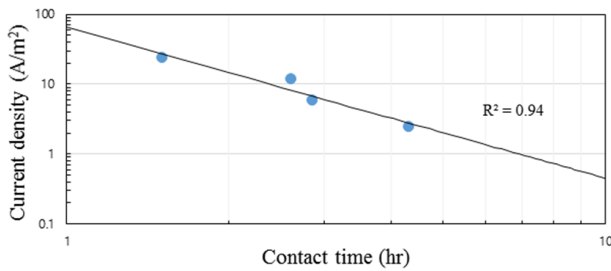


Fig. 5. Plot of $\ln(\rho_i)$ vs. $\ln(t)$ when the total fouling resistance (R_t) reduced to 10% of the control.

Table 8에 정리된 자료를 이용하여 $\ln \rho_i$ vs. $\ln t$ 그래프를 그리면 Fig. 5가 된다.

위 그래프의 기울기를 통해 n 값이 결정되었고,

$$\text{Slope} = -\frac{1}{n} = -\frac{\ln 65.326 - \ln 0.454}{\ln 10 - \ln 1} = -2.158$$

$$\therefore n = 0.46 \quad (7)$$

그래프와 모델 식에서의 Y 절편을 계산하여 정리하면, $\therefore k = 0.015$ 이 된다.

$$Y \text{ intercept} = \ln 65.326 = \frac{1}{n} \ln \left[\frac{1}{k} \left(-\ln \frac{R_t}{R_0} \right) \right] \quad (8)$$

$$n(\ln 65.326) = \ln \left[\frac{1}{k} \left(-\ln \frac{90}{100} \right) \right] \quad (9)$$

$$e^{1.923} = \left[\frac{1}{k} (0.105) \right] \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{6.8} (0.105) = 0.015 \quad (11)$$

$$\therefore k = 0.015 \text{ [hr}^{-1}\text{]} \quad (12)$$

앞에서 구한 상수 n 과 k 를 식 (5)에 대입하여 정리하면 최종적으로 식 (14)가 결정된다.

$$\ln \frac{R_t}{R_0} = \ln \frac{90}{100} = -0.105 = -0.015 \rho_i^{0.46} t \quad (13)$$

$$\rho_i^{0.46} t = 7.0 \quad (14)$$

ρ_i : Current density [A/m²]

t : Contact time [hr]

최종 식 (14)가 의미하는 바는 활성슬러지에 전기응

집을 수행하여 총오염저항, R_t 이 10% 감소될 때까지 필요한 전류밀도 (ρ_i)값과 접촉시간 (t)의 상관관계이다. 즉, 전류밀도의 n 승과 접촉시간의 곱은 항상 일정함을 표현하고 있다. 이는 총오염저항, R_t 이 10% 감소될 때까지 필요한 전류밀도의 세기가 증가하면 접촉시간이 그만큼 감소하고, 반대로 접촉시간이 증가하면 비례하여 전류밀도의 세기가 감소함을 정량적으로 표현하고 있는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 MBR 공정의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 막 오염을 제어하기 위한 방법으로 전기응집 기술을 이용할 때, 가장 중요한 운전인자인 전류밀도와 접촉시간이 막 오염 저감 속도에 미치는 영향에 관한 모델식을 정립하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 전류밀도의 세기와 접촉시간이 막 오염에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 회분식 교반 셀 실험을 진행하여 여과 플럭스 자료를 얻었다. 이를 직렬여과저항 모델을 이용하여 저항값 감소율, 즉 전기응집을 수행하지 않았을 때의 총오염저항 (R_0)에 대한 전기응집 시 감소된 총오염저항 (R_t)의 비율 (R_t/R_0)을 계산하였다. 예상한대로 전류밀도와 접촉시간이 증가할수록 저항값 감소율이 증가함을 확인하였다.

2) 이상의 자료를 이용하여 총저항값 감소율이 10%에 도달할 때 필요로 하는 전류밀도의 세기와 접촉시간에 대한 속도론적 고찰을 통하여 모델식, $\rho_i^{0.46} t = 7.0$ 을 완성하였다. 모델식의 의미는 전기응집을 통하여 총오염저항이 10% 감소될 때까지 필요로 하는 전류밀도와 접촉시간과의 상관관계이다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업 (NRF-2012R1A2A2A04045299)의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

References

Heidmann, I., Calmano, W., 2008, Removal of Cr(VI) from

pp. 273-279

pp. 281-287

pp. 289-296

pp. 297-301

pp. 303-310

pp. 311-319

pp. 321-328

pp. 329-338

pp. 339-346

pp. 347-356

pp. 357-362

- model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes, *Sep. Purif. Technol.* 61, 15-21
- Hua, L.C., Huang, C., Su, Y.C., Nguyen, T.N.P., Chen, P.C. (2015). Effects of electro-coagulation on fouling mitigation and sludge characteristics in a coagulation-assisted membrane bioreactor, *J. Membr. Sci.* 495, 29-36
- Ibeid, S., Elektorowicz, M., Oleszkiewicz, J.A. (2013), Novel electrokinetic approach reduces membrane fouling, *Water Res.* 47, 6358-6366
- Ibeid, S., Elektorowicz, M., Oleszkiewicz, J.A. (2015), Electro-conditioning of activated sludge in a membrane electro-bioreactor for improved dewatering and reduced membrane fouling, *J. Membr. Sci.* 494, 136-142
- Iorhemen, O.T., Hamza, R.A., Tay, J.H. (2017), Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials, *Biores. Technol.*, 240, 9-24
- Ivonne, L.H., Carlos B.D., Bryan B., Pablo J.G, Eduardo C.M. (2010) A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for industrial wastewater, *J. Hazard. Mater.* 175, 688-694
- Liu, J., Liu, L., Gao, B., Yang, F. (2012). Cathode membrane fouling reduction and sludge property in membrane bioreactor integrating electrocoagulation and electrostatic repulsion, *Sep. Purif. Technol.* 100, 44-50
- Liu, J., Liu, L., Gao, B., Yang, F. (2013), Integration of bio-electrochemical cell in membrane bioreactor for membrane cathode fouling reduction through electricity generation, *J. Membr. Sci.* 450, 196-202
- Melhem, K., Elektorowicz, M. (2010), Development of a Novel Submerged Membrane Electro-Bioreactor (SMEBR): Performance for Fouling Reduction, *Environ. Sci. Technol.* 44, 3298-3304
- Melhem, K., Edward S., (2012), Grey water treatment by a continuous process of an electrocoagulation unit and a submerged membrane bioreactor system, *Chem. Eng. J.* 198-199, 201-210
- Meunier, N., Drogui, P., Mercier, G., Blais, J.F., (2009), Treatment of metal-loaded soil leachates by electrocoagulation, *Sep. Purif. Technol.* 67, 110-116
- Park, H.D., Chang, I.S., Lee, K.J. (2015). Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, CRC Press, New York. pp.199-203
- Sadeddin, K., Naser, A., Firas, A. (2011), Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant, *Desalination*, 268, 204-207
- Siddiqui, M.F., Rzechowicz, M., Winters, H., Zularisam, A.W., Fane, A.G. (2015), Quorum sensing based membrane biofouling control for water treatment: A review, *J. of W. Proc. Eng.*, 7, 112-122
- Sasson, M., Lin, Y.M., Adin, A., (2011), Electrocoagulation-membrane filtration hybrid system for colloidal fouling mitigation of secondary-effluent, *Sep. Purif. Technol.* 82, 63-70
- Tafti, A.D., Morteza, S., Mirzaii, S., Andalibi, M.R. (2015), Optimized coupling of an intermittent DC electric field with a membrane bioreactor for enhanced effluent quality and hindered membrane fouling, *Sep. Purif. Technol.* 152, 7-13
- Xu, M., Wen, X., Huang, X., Yu, Z., Zhu, M. (2013), Mechanisms of membrane fouling controlled by online ultrasound in an anaerobic membrane bioreactor for digestion of waste activated sludge, *J. Membr. Sci.* 445, 119-126
- Zhu, B., Clifford, D.A., Chellam, S. (2005). Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes, *Water Res.* 39, 3098-3108