



EC-MBR 공정의 MLSS, 전류밀도 및 접촉시간이 막 오염 감소에 미치는 영향 모델링

Modeling of the effect of current density and contact time on membrane fouling reduction in EC-MBR at different MLSS concentration

김완규¹·장인성^{2*}

Wan-Kyu Kim¹·In-Soung Chang^{2*}

¹호서대학교 안전환경기술융합학과, 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499

²호서대학교 환경공학과, 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499

¹Department of Convergence Technology for Safety and Environment, Hoseo University, Baebang, Asan, Chung-Nam, South Korea

²Department of Environmental Engineering, Hoseo University, Baebang, Asan, Chung-Nam, South Korea

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 111-119

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

ABSTRACT

Electro-coagulation process has been gained an attention recently because it could overcome the membrane fouling problems in MBR(Membrane bio-reactor). Effect of the key operational parameters in electro-coagulation, current density(ρ_i) and contact time(t) on membrane fouling reduction was investigated in this study. A kinetic model for ρ_i and t required to reduce the membrane fouling was suggested under different MLSS(mixed liquor suspended solids) concentration. Total 48 batch type experiments of electro-coagulations under different sets of current densities(2.5, 6, 12 and 24 A/m²), contact times(0, 2, 6 and 12 hr) and MLSS concentration(4500, 6500 and 8500mg/L) were carried out. After each electro-coagulation under different conditions, a series of membrane filtration was performed to get information on how much of membrane fouling was reduced. The membrane fouling decreased as the ρ_i and t increased but as MLSS decreased. Total fouling resistances, R_t ($=R_c+R_f$) were calculated and compared to those of the controls (R_o), which were obtained from the experiments without electro-coagulation. A kinetic approach for the fouling reduction rate (R_t/R_o) was carried out and three equations under different MLSS concentration were suggested: i) $\rho_i^{0.39}t = 3.5$ (MLSS=4500 mg/L), ii) $\rho_i^{0.46}t = 7.0$ (MLSS=6500 mg/L), iii) $\rho_i^{0.74}t = 10.5$ (MLSS=8500 mg/L). These equations state that the product of ρ_i and t needed to reduce the fouling in certain amounts (in this study, 10% of fouling reduction) is always constant.

Key words: Electro-coagulation, Kinetics, Membrane fouling, Modeling, Resistance

주제어: 전기응집, 속도론, 막 오염, 모델링, 저항

Received 7 December 2018, revised 16 January 2019, accepted 21 January 2019.

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

1. 서론

분리막 생물반응기(Membrane Bio-Reactor, 이하 MBR)는 전통적인 표준활성슬러지 공정보다 적은 부지면적 사용, 완벽한 고/액 분리 성능으로 인한 안정적 유출수질의 확보가 가능하여 그 활용이 점차 증가하고 있다 (Hua et al., 2015). 그러나 콜로이드 및 입자성 물질로 인한 케이크 층의 형성과 용존성 물질의 세공 내 흡착으로 인해 투과 플럭스가 감소하는 막 오염 현상이 필연적으로 발생하는 문제점이 있다.

저하된 막 여과 성능을 회복하기 위해 다양한 물리/화학/생물학적 막 오염 제어법이 연구 개발되고 있다 (Beyer et al., 2010; Mang et al., 2010; Park et al., 2015). 산, 염기 또는 산화제를 사용하는 화학적 세정은 막의 성능을 즉시 회복시킬 수 있지만, 약품 사용에 따른 2차 오염 발생 우려가 있으며 추가로 발생한 오염물질을 처리/처분하기 위한 별도의 공정이 필요할 수 있다. 역세척 또는 조대포기와 같은 물리적 세정법이 널리 활용되고 있으나 에너지 소비가 매우 높은 편이며, 빈번한 역세척은 분리막 구조에 손상을 일으켜 막의 수명을 단축시키는 단점이 있다. 최근 막 표면의 케이크 층 발달을 억제하는 정족수감지억제(Quorum Quenching) 기술이 연구되고 있으나 아직 실험실 수준의 기초 단계에 머물고 있어 실제 MBR에 적용되고 있지는 않다 (Nahm et al., 2017; Weerasekara et al., 2016).

최근 MBR의 막 오염을 감소시키기 위해 전기응집(Electro-Coagulation)을 도입한 연구들이 보고되고 있다 (Kobyas and Demibas, 2015; Al-Malack and Al-Nowaiser, 2018). 전기응집은 양극에서 금속이온이 용출되어 콜로이드성 물질이 응집되도록 유도하는 공정이다. 전기응집은 MBR 공정에서 막 오염에 중요한 역할을 하는 콜로이드성 물질을 응집하여 막 오염을 감소시킬

수 있으므로 MBR과 전기응집이 접목된 공정에 대한 연구가 최근 주목받고 있다.

본 연구에서는 전기응집 공정의 중요한 운전 인자인 전류밀도, 접촉시간 및 막 오염에 직접적인 영향을 미치는 활성슬러지 현탁액의 농도(Mixed Liquid Suspended Solid, MLSS)가 막 오염에 미치는 영향을 탐색하고자 하였다. 또한, 반응속도론에 기초하여 막 오염이 진행되는 막 오염 속도를 전기응집의 운전변수인 전류밀도, 접촉시간의 함수로 표현하는 모델링을 수행하고자 하였다.

2. 재료 및 연구방법

2.1 활성슬러지 배양

연구에 사용된 활성슬러지 혼합액은 C시 환경 사업소 포기조의 혼합액을 채취하여 실험실로 운송한 후 정상상태에 도달할 때까지 합성폐수로 장기간 순용시켜 연속회분식반응기 형태로 운용하였다. 반응기 배양조건을 Table 1에 나타내었다. 서로 다른 MLSS 농도(4500, 6500, 8500 mg/L)를 갖는 활성슬러지 혼합액을 얻기 위해 생물반응기의 F/M(Food-to-Microorganism ratio)비, HRT(Hydraulic Retention Time) 및 SRT(Solids Retention Time)를 조절하며 배양하였다.

2.2 전기응집(Electro-coagulation)

전기응집 실험을 위해 아크릴 재질의 1 L 반응기(내경 110 mm, 외경 120 mm, 높이 155 mm) 크기로 제작되었으며, 반응기의 덮개는 전극을 고정할 수 있는 홈과 자테스터(Jar-tester)의 교반기 부분이 들어갈 수 있도록 제작되었다 (Fig. 1). 전기응집 실험에 사용된 전극은 50x130 mm 크기의 알루미늄 판으로 제작하였다.

Table 1. Operating conditions of sludge acclimation

Parameters	Values		
F/M ratio (kgCOD/kgMLSS)	0.35 - 0.85		
MLSS(mg/L)	4500 ± 300	6500 ± 300	8500 ± 300
HRT (Hydraulic Retention Time) (day)	12 - 12.8		
SRT (Sludge Retention Time) (day)	6	8	10
Working volume (L)	16		
pH	8 ± 0.5		
Temperature (°C)	20 ± 5		



Table 2. Operating conditions of the batch type electro-coagulation

Parameter	Value			
MLSS (mg/L)	4500, 6500, 8500			
Reactor working Volume (L)	1			
Distance between electrodes (cm)	5			
Submerged electrode area (cm ²)	33.5			
Current density (A/m ²)	2.5	6	12	24
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			

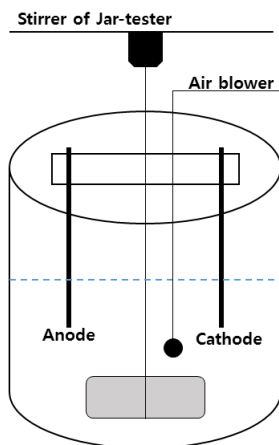


Fig. 1. Schematic of batch type electro-coagulation reactor.

전기응집 반응기에 활성슬러지를 넣고 전극 간 거리를 50 mm로 고정한 후 덮개를 닫은 후 활성슬러지 혼합액이 완전혼합될 수 있도록 자테스터로 교반하는 회분식 전기응집을 수행하였다. 전기응집에 적용하는 일반적인 전류밀도가 2~30 A/m² 임을 감안하여 인가하는 전류밀도를 2.5, 6, 12, 24 A/m²로 설정하였다. 각 전류밀도 조건에서 접촉시간을 0, 2, 6, 12시간 변화해 가며 전기응집을 수행하였다. 전류가 인가되지 않은 접촉시간 0시간을 대조군으로 하였다. 즉, 서로 다른 MLSS 농도(4500, 6500, 8500 mg/L)를 갖는 활성슬러지를 4개의 다른 전류밀도와 4개의 다른 접촉시간의 조합(16=4×4)으로 총 48번(=16×3개의 다른 MLSS)의 전기응집 회분식 실험을 수행하였다 (Table 2).

2.3 막 오염 정량화

활성슬러지의 막 여과 성능을 파악하기 위해 회분식여과셀(Amicon 8200, Amicon, USA)을 이용하여 막 여과를 수행하였다 (Fig. 2). 여과에 사용된 분리막은

디스크형 한외여과막 (UltraFiltration, PLTK06210, Millipore, USA)을 이용하였다. 셀 내부의 압력은 질소 실린더를 이용하여 조절하였다. 전자저울 상부에 위치한 용기에 막을 투과한 여과수를 수집하였다. 컴퓨터와 전자저울을 연결하여 투과수의 질량 변화를 단위 시간마다 측정하여 막 여과 자료를 수집하였다. 막 여과 운전 조건은 Table 3에 요약하였다.

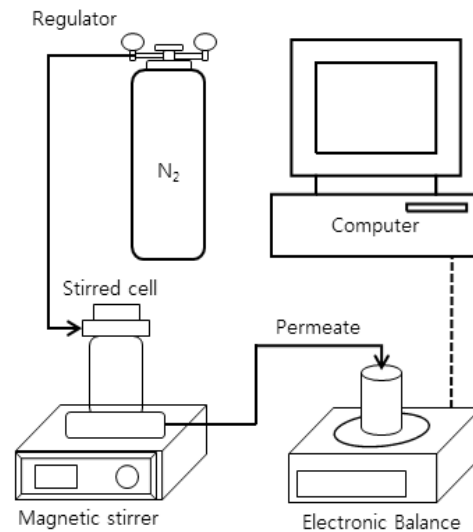


Fig. 2. Schematic of the membrane filtration system using the batch filtration stirred cell.

Table 3. Operating conditions for the filtration test with the batch stirred cell

Parameters	Value	Unit
Working volume	180	mL
Filtration area	30.2	cm ²
Mixing speed	100	rpm
Applied pressure (N ₂ gas)	2	atm

막 여과 실험은 i) 순수여과, ii) 활성슬러지 여과, iii) 분리막 세척 후 순수여과 순으로 진행되었다. 순수여과를 통해 J_{iw} (초기 물 플럭스)를 구한 후, 슬러지 여과를 수행하여 J (활성슬러지 플럭스) 자료를 얻는다. 이후 분리막을 여과셀로부터 분리하여 세척한 후 순수여과를 다시 수행하여 J_{iw} (최종 물 플럭스)를 구한다.

다음 식과 같은 직렬저항(Resistance-In-Series) 모델(Han, S., Chang, I. S., 2014)을 적용하여 R_m (Intrinsic Membrane Resistance), R_f (Internal Pore Fouling Resistance), R_c (Cake Layer Resistance)를 각각 계산하였다.

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

- J = Flux
- μ = Viscosity of Activated Sludge Suspension
- R_m = Intrinsic Membrane Resistance
- R_f = Internal Pore Fouling Resistance
- R_c = Cake Layer Resistance

3. 결과 및 고찰

3.1 전기응집 조건에 따른 여과 성능 비교

MLSS가 다른 세 가지 활성슬러지 현탁액을 서로 다른 전류밀도(2.5, 6, 12, 24 A/m²)를 인가하는 전기응집을 수행한 후 회분식여과셀을 이용하여 막 여과를 수행하였다. 일련의 전기응집 실험에서 전류밀도 조건이 24 A/m²일 때 얻어낸 플럭스 자료를 Fig. 3에 나타내었다. 그래프의 y축은 초기순수 플럭스 (J_{iw})에 대비한 활성슬러지 플럭스 (J)의 비 (J/J_{iw})로 표시하였다.

전기응집 접촉시간이 0에서 12시간으로 증가할수록 플럭스가 감소하는 정도가 완화되고 있음을 알 수 있다. 즉, 전기응집 시간이 증가할수록 막 오염이 감소하는 효과가 있음을 시사하고 있다. MLSS 농도가 4500에서 6500, 8500 mg/L로 증가하여도 동일한 현상을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 전류밀도 값이 24 A/m² 보다 적은 다른 경우에도 모두 동일한 경향을 보였다.

전기응집을 수행한 후 막 여과를 수행하였을 경우 막 여과 성능이 증가하는 원인은 여러 문헌에서 보고되고 있다. 전기응집으로 발생한 수산화알루미늄(또는 인산알루미늄)과 같은 불용성염이 막 여과 성능에

부정적인 영향을 주는 콜로이드성 물질 및 용존성 유기물질을 응집하였기 때문에 막 오염이 감소하는 것으로 보고하고 있다 (Moussa et al., 2017). 발생한 불용성염이 막 표면에서 동적 막(Dynamic Membrane) 역할을 하여 막 오염물질을 배제하는 역할을 하는 것으로도 알려졌다 (Kim and Chang, 2018).

또한, 전기응집에 의해 현탁액 중의 세포외고분자 물질(Extracellular Polymeric Substances), 용존성-COD (Chemical Oxygen Demand), -TN(Total Nitrogen), -TP (Total Phosphorus)의 감소, 슬러지 탈수성의 감소 등 원인에 의해 막 여과 성능이 증가하는 것을 설명하고 있다

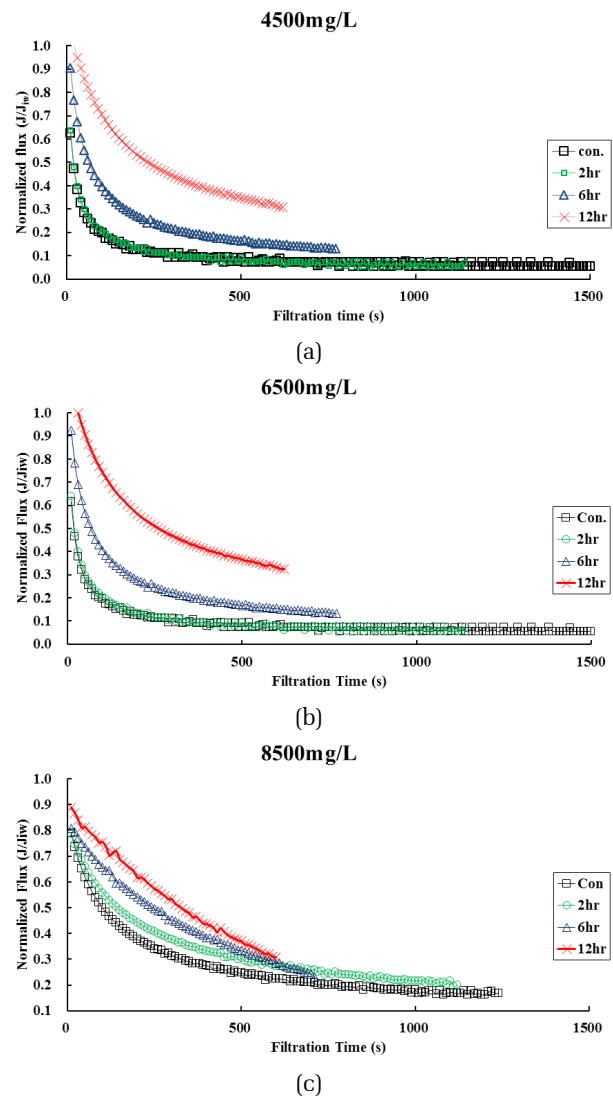


Fig. 3. Flux variation over filtration time as a function of the contact time under the current density of 24 A/m². (a) 4500 mg/L (b) 6500 mg/L (c) 8500 mg/L



(Bani-Melhem and Elektorowicz, 2011; Bani-Melhem and Smith, 2012). 또한, 적당한 전류밀도 하에서는 미생물 자극으로 인해 유기물 제거 및 슬러지 활성도에 긍정적인 영향을 미치기 때문에 막 오염이 감소하는 것으로 보고되고 있다 (Ibeid et al., 2012).

3.2 활성슬러지 MLSS 농도에 따른 총오염저항 (R_t)의 변화

전류밀도와 접촉시간을 달리하여 전기응집 수행 후 막 여과 실험으로 얻은 여과자료를 직렬여과저항 모델을

이용하여 R_c 과 R_f 를 각각 구하였다. 막 오염으로 인해 발생하는 R_c 와 R_f 를 더하여 총오염저항, $R_t(=R_c+R_f)$, Total Fouling Resistance)로 표시하였다 (Table 4). 본 연구에서 막 자체저항(R_m)은 막 오염과 관련하여 특별히 주목할 필요가 없어서 계산된 값을 제시하지 않았다.

MLSS가 4500 mg/L일 때 전기응집을 수행하지 않은 대조군의 R_t 는 $18.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 이었지만 24 A/m²의 전류밀도로 12시간 전기응집을 수행하여 얻은 R_t 는 $1.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 감소하였다. 동일 전류밀도와 접촉시간에서 MLSS가 6500 mg/L일 때는 $19.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 에서

Table 4. Comparison of the total fouling resistance (R_c+R_f) calculated under different MLSS and contact time and current density

MLSS (mg/L)	Current Density (A/m ²)	Total fouling resistances, R_t ($\times 10^{12} \text{ m}^{-1}$)			
		Contact time (hr)			
		0	2	6	12
4500	2.5	22.6	22.0	19.4	19.0
	6	20.2	18.5	16.2	14.0
	12	19.6	16.7	14.4	10.0
	24	18.3	15.1	7.0	1.4
6500	2.5	24.3	23.0	21.4	20.5
	6	21.4	19.6	18.0	16.2
	12	20.6	18.6	16.2	14.8
	24	19.5	17.5	8.32	3.0
8500	2.5	27.3	24.3	23.9	21.9
	6	25.3	23.5	21.0	19.6
	12	24.4	22.7	20.4	19.1
	24	21.9	18.0	8.9	4.0

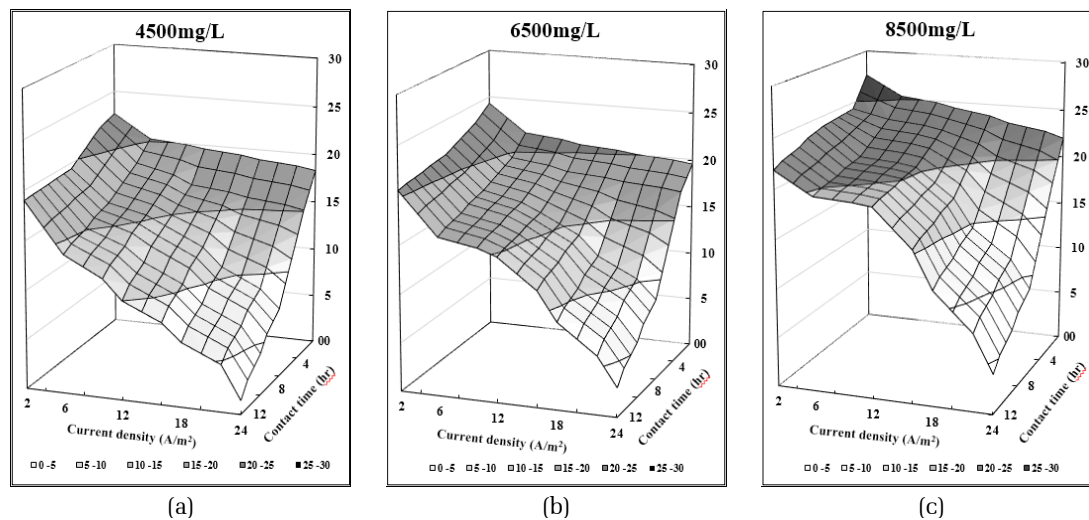


Fig. 4. Comparison of R_c+R_f under different contact time and current density. (a) 4500 mg/L (b) 6500 mg/L (c) 8500 mg/L

$3.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 감소하였고, 8500 mg/L일 경우에는 $21.9 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 에서 $4.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 감소하였다. 활성슬러지의 MLSS가 증가할수록 막 오염이 심화되는 것은 자연스러운 현상이기 때문에 MLSS가 증가하면 대조군의 총오염저항(R_t)이 약간씩 증가한다. MLSS에 관계없이 전기응집을 수행한 활성슬러지는 대조군에 비해 막 오염이 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다. 전류밀도와 접촉시간이 증가할수록 총오염저항은 더욱 크게 감소하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 4에 전류밀도와 접촉시간이 총오염저항(R_t)에 미치는 영향을 MLSS 농도별로 나타내었다. x축은 접촉시간, y축은 전류밀도이고 z축은 총오염저항, R_t 로 나타내었다. 전류밀도와 접촉시간이 증가할수록 R_t 는 감소하고 있다. 투과 플럭스가 가장 낮았던 8500 mg/L MLSS 농도에서의 총오염저항이 다른 경우보다 높았지만, 전류밀도와 접촉시간에 의한 R_t 가 받는 영향은 MLSS가 바뀌어도 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다.

3.3 접촉시간 및 전류밀도에 따른 막 오염 저감 속도 모델링

본 연구에서는 막 오염 저감 속도를 모델링 하기 위해 대조군의 총오염저항(R_0)에 대비한 실험군의 총오염저항(R_t), 즉, 총오염저항감소율(R_t/R_0)을 계산하여 Table 5에 정리하였다. 접촉시간(t)에 따른 총오염저항

(R_t)이 감소하는 속도의 반응차수는 1차 반응으로 알려져 있다 (Um and Chang, 2017). 이를 확인하기 위해 Table 5의 자료를 이용하여 x축에는 접촉시간 t를, y축에는 $-\ln(R_t/R_0)$ 로 하여 자료정리를 하여 그래프를 작성하였다 (Fig. 5).

Fig. 5를 통해 세 가지 MLSS 농도에서 접촉시간(t)에 따른 $-\ln(R_t/R_0)$ 이 선형적으로 증가하고 있으므로 총오염저항감소(R_t/R_0)가 1차반응을 따름을 확인할 수 있다. 따라서 총오염저항 감소속도, dR_t/dt 는 식 (2)와 같다.

$$\frac{dR_t}{dt} = -k'R_t \tag{2}$$

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_i) 또한 막 오염 저감에 영향을 미치는 요소이기 때문에 임시반응속도상수 k' 은 전류밀도의 n승에 비례한다고 보고 식 (3)으로 나타났다. 식 (2)와 (3)을 정리하면 식 (4)와 같다. 식 (4)을 변수분리한 후 접촉시간은 0에서 t까지, 총오염저항 (R_t)은 R_0 부터 R_t 까지 적분하여 정리하면 식 (5)로 나타낼 수 있다. R_0 는 접촉시간이 0 hr, 즉, 대조군의 총오염저항을 의미한다.

Table 5. Reduction of the total fouling resistance over the control (R_t/R_0)

MLSS (mg/L)	Current Density (A/m^2)	Reduction of total fouling resistance over the control (R_t/R_0), %		
		Contact time (hr)		
		2	6	12
4500	2.5	8	15	17
	6	9	25	29
	12	10	29	38
	24	14	68	89
6500	2.5	6	13	15
	6	7	21	23
	12	7	26	23
	24	7	26	33
8500	2.5	3	10	13
	6	6	14	20
	12	7	25	30
	24	11	59	81

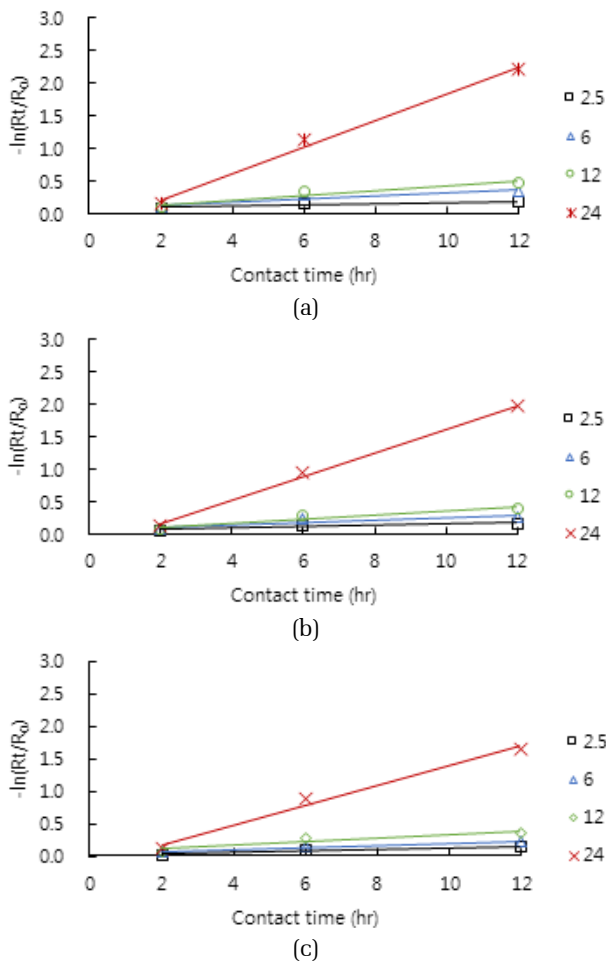


Fig. 5. Plots of the fouling reduction rate under different MLSS, $-\ln(R_t/R_0)$ vs. the contact time t as a function the applied current density. (a) 4500 mg/L (b) 6500 mg/L (c) 8500 mg/L

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

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

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

ρ_i : Current Density [A/m^2]

n : Constant Involving with the Current Density [A/m^2]

k : Rate Constant [hr^{-1}]

R_0 : Total Fouling Resistance (R_c+R_f) at Time 0(=control) [m^{-1}]

식 (5)를 전류밀도(ρ_i)에 대해 정리한 후, 양변에 로그를 취하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

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

식 (6)에서 x축을 접촉시간 (t)으로 하고, y축은 전류밀도 $\ln(\rho_i)$ 로 하여 자료를 플롯하면 직선을 얻을 수 있다. 직선의 기울기와 y절편 값을 구하면 상수 n 과 k 를 얻을 수 있다.

Fig. 5에서 총오염저항감소율 (R_t/R_0)이 10%가 되는 지점에서 x축과 평행한 선을 그으면 네 가지 다른 전류밀도 선들과 만난다. 만난 지점의 접촉시간 (t)을 읽으면, 총오염저항(R_t)이 대조군의 총오염저항(R_0)에 비해 10% 감소하는데 필요한 접촉시간을 구할 수 있다. 따라서 Fig. 5로부터 $-\ln(90/100) = 0.105$ 일 때 필요로 하는 접촉시간을 읽은 후, 해당 값을 전류밀도와 MLSS별로 분류하여 Table 6에 정리하였다.

Table 6의 자료를 이용하여 전기응집을 수행하였을 때 총오염저항 (R_t)이 대조군에 비해 10% 감소하는데 필요로 하는 접촉시간을 x축으로, y축은 전류밀도(ρ_i)로 하여 그래프를 작성한다 (Fig. 6). 각 MLSS 농도별로 나타내었으며 MLSS 농도가 증가할수록 총오염저항 (R_t)이 대조군에 비해 10% 감소하는데 필요로 하는 접촉시간과 전류밀도가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

식 (6)을 플롯한 Fig. 6에서 직선의 기울기를 구하면 n 을 구할 수 있다. 예를 들어 MLSS가 4500 mg/L인 경우, 직선의 추세선은 $\ln \rho_i = \ln 39.233 - 2.52 \ln t$ 와 같다. 따라서 기울기는 식 (7)과 같다.

$$-\frac{1}{n} = -2.52, \therefore n = 0.39 \quad (7)$$

또한, 다음처럼 y 절편값을 취하여 계산하면 k 를 얻을 수 있다.

$$y \text{ intercept} = \ln 39.233 = \frac{1}{n} \ln \frac{1}{k} (-\ln \frac{R_t}{R_0}) \quad (8)$$

$$0.39(\ln 39.233) = \ln \frac{1}{k} (-\ln \frac{90}{100}) \quad (9)$$

$$\therefore k = 0.03 [hr^{-1}] \quad (10)$$

위의 식을 통해 구한 상수 n 과 k 를 식 (5)에 대입하여 식 (12)를 완성한다.

Table 6. Current densities and contact times under different MLSS concentration when the total fouling resistance (R_t) reduced to 10% over the control

MLSS (mg/L)	Current Density (A/m^2)	Contact Time (hr)
4500	2.5	2.9
	6	2.2
	12	1.6
	24	1.2
6500	2.5	4.3
	6	2.9
	12	2.6
	24	1.5
8500	2.5	5.4
	6	3.5
	12	2.6
	24	2.0

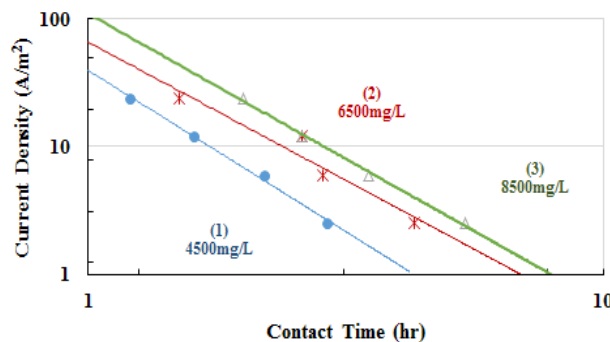


Fig. 6. Plot of $\ln(\rho_i)$ vs. $\ln(t)$ when the total fouling resistance (R_t) reduced to 10% of the control.

$$-\ln \frac{90}{100} = 0.105 = 0.03 \rho_i^{0.39} t \quad (11)$$

$$\rho_i^{0.39} t = 3.5 \quad (12)$$

MLSS 농도가 6500 mg/L, 8500 mg/L인 경우에도 동일한 방법으로 계산하여 전류밀도와 접촉시간의 상관관계 식 (13)과 (14)를 유도할 수 있다.

$$\text{MLSS} = 6500 \text{ mg/L인 경우: } \rho_i^{0.46} t = 7.0 \quad (13)$$

$$\text{MLSS} = 8500 \text{ mg/L인 경우: } \rho_i^{0.74} t = 10.5 \quad (14)$$

식(12~14)의 의미는 전기응집 수행으로 인해 막의 총오염저항 (R_t)이 10% 감소할 때 필요로 하는 접촉

시간(t)과 전류밀도(ρ_i)의 상관관계이다. 즉, 전류밀도의 n 승과 접촉시간의 곱은 항상 일정(Constant)함을 표현하고 있다. 총오염저항(R_t)을 10% 감소시키기 위해 필요로 하는 전기응집의 접촉시간이 증가하면 전류밀도가 그만큼 감소하고, 반대로 접촉시간이 감소하면 전류밀도의 세기가 감소하는 것을 정량적으로 표현하고 있다. 또한, 활성슬러지의 MLSS가 증가할수록 총오염저항(R_t)을 감소시키기 위해 필요로 하는 접촉시간과 전류밀도의 곱이 증가하고 있음을 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구는 전기응집의 중요 운전 인자인 전류밀도, 접촉시간 및 활성슬러지의 MLSS 농도가 막 오염에 미치는 영향을 알아보기 위해 회분식 교반 셀 실험을 통해 얻은 여과자료를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 전기응집을 수행하지 않은 대조군의 총오염저항 (R_0)과 전기응집 수행으로 감소된 총오염저항(R_t)의 비율, R_t/R_0 을 계산하였다. 전류밀도와 접촉시간이 증가할수록 총오염저항감소비(R_t/R_0)는 증가하였다. MLSS가 4500 mg/L일 때 전기응집을 수행하지 않은 대조군의 R_t 는 $18.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 이었지만 24 A/m^2 의 전류밀도로 12시간 전기응집을 수행하여 얻은 R_t 는 $1.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 감소하였다. 동일 전류밀도와 접촉시간에서 MLSS가 6500 mg/L일 때는 $19.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 에서 $3.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 감소하였고, 8500 mg/L일 경우에는 $21.9 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 에서 $4.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 감소하였다. 이는 활성슬러지의 MLSS 농도가 높을수록 전기응집에 의한 영향으로 막 오염 개선 효과가 감소하고 있음을 시사한다.

2) 이상의 결과를 바탕으로 전기응집의 중요 운전 인자인 전류밀도와 접촉시간이 총오염저항감소 (R_t/R_0)에 미치는 영향을 모델링 하였다. 반응속도론에 기초하여 총오염저항감소가 10%에 도달할 때 필요로 하는 전류밀도(ρ_i)와 접촉시간(t) 간의 상관관계를 표현하는 수식을 도출하였다. 각 MLSS 농도별 모델 식은 다음과 같다.

$$\text{MLSS} = 4500 \text{ mg/L인 경우, } \rho_i^{0.39} t = 3.5$$

$$\text{MLSS} = 6500 \text{ mg/L인 경우, } \rho_i^{0.46} t = 7.0$$

$$\text{MLSS} = 8500 \text{ mg/L인 경우, } \rho_i^{0.74} t = 10.5$$



사 사

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기본연구사업(NRF2016R1D1A1B03930377)의 지원에 의해 수행된 연구로 관계부처에 감사드립니다.

References

- AI-Malack, M.H. and Al-Nowaiser, W.K. (2018). Treatment of synthetic hypersaline produced water employing electrocoagulation-membrane bioreactor (EC-MBR) process and halophilic bacteria, *J. Environ. Chem. Eng.*, 6(2), 2442-2453.
- Bani-Melhem, K.B. and Smith, E. (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.
- Bani-Melhem, K. and Elektorowicz, M. (2011). Performance of the submerged membrane eletro-bioreactor(SMEBR) with iron electrodes for wastewater treatment and fouling reduction, *J. Membr. Sci.*, 379(1-2), 434-439.
- Beyer, M., Lohregel, B. and Nghiem, L.D. (2010). Membrane fouling and chemical cleaning in water recycling applications, *Desalination*, 250(3), 911-981.
- Han, S. and Chang, I.S. (2014). Comparison of the cake layer removal options during determination of cake layer resistance (R_c) in the resistance-in-series model, *Sep. Sci. Technol.*, 49(16), 2459-2465.
- Hua, L.C., Huang, C., Su, Y.C., Nguten, T.N.P. and 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.
- Ibedi, S., Elektorowicz M. and 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(15), 136-142.
- Kim, W.K. and Chang, I.S. (2018). Membrane fouling reduction using electro-coagulation aided membrane bio-reactor, *J. Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, 19(8), 105-114.
- Kobyas, M. and Demibas, E. (2015). Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electro-coagulation, *J. Water Proc. Eng.*, 8, 64-74.
- Mang, F., Liao, B., Liang, S., Yang, F., Zhang, H. and Song, L. (2010). Morphological visualization, componential characterization and microbiological identification of membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs), *J. Membr. Sci.*, 361(1-2), 1-14.
- Moussa, D.T., El-Nass, M.H., Nasser, M. and Al-Marri, M.J. (2017). A comprehensive review of electro-coagulation for water treatment: Potentials and challenges, *J. Environ. Manag.*, 186(1), 24-41.
- Nahm, C.H., Choi, D.C., Kwon, H., Lee, S., Lee, S.H., Lee, K., Choo, K.H., Lee, J.K., Lee, C.H. and Park, P.K. (2017). Application of quorum quenching bacteria entrapping sheets to enhance biofouling control in a membrane bioreactor with a hollow fiber module, *J. Membr. Sci.*, 526, 264-271.
- Park, H.D., Chang, I.S. and Lee, K.J. (2015). Principles of membrane bioreactor for wastewater treatment, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 242-245.
- Um, S.E. and Chang, I.S. (2017). Effect of current density and contact time on membrane fouling in electrocoagulation-MBR and their kinetic studies on fouling reduction rate, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 31(4), 321-328.
- Weerasekara, N.A., Choo, K.H. and Lee, C.H. (2016). Bio-fouling control: bacterial quorum quenching versus chlorination in membrane bioreactors, *Water Res.*, 103, 293-301.

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 111-119

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016