



# 막결합형 생물반응기(Membrane Bio-Reactor)의 막 오염 저감을 위한 고전압 펄스의 적용과 막 오염 저감 속도론적 해석

## Application of high voltage pulse for reduction of membrane fouling in membrane bio-reactor and kinetic approach to fouling rate reduction

김경래<sup>1</sup>·김완규<sup>2</sup>·장인성<sup>1,\*</sup>

Kyeong-Rae Kim<sup>1</sup>·Wan-Kyu Kim<sup>2</sup>·In-Soung Chang<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>호서대학교 환경공학과, <sup>2</sup>호서대학교 안전환경기술융합학과

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Hoseo University,

<sup>2</sup>Department of Convergence Technology for Safety and Environment, Hoseo University

pp. 169-182

pp. 183-190

pp. 191-200

pp. 201-210

pp. 211-220

pp. 221-230

### ABSTRACT

Although membrane bio-reactor (MBR) has been widely applied for wastewater treatment plants, the membrane fouling problems are still considered as an obstacle to overcome. Thus, many studies and commercial developments on mitigating membrane fouling in MBR have been carried out. Recently, high voltage impulse (HVI) has gained attention for a possible alternative technique for desalting, non-thermal sterilization, bromate-free disinfection and mitigation of membrane fouling. In this study, it was verified if the HVI could be used for mitigation of membrane fouling, particularly the internal pore fouling in MBR. The HVI was applied to the fouled membrane under different conditions of electric fields (E) and contact time (t) of HVI in order to investigate how much of internal pore fouling was reduced. The internal pore fouling resistance ( $R_f$ ) after HVI induction was reduced as both E and t increased. For example,  $R_f$  decreased by 19% when the applied E was 5 kV/cm and t was 80 min. However, the  $R_f$  decreased by 71% as the E increased to 15 kV/cm under the same contact time. The correlation between E and t that needed for 20% of  $R_f$  reduction was modeled based on kinetics. The

Received 3 April 2020, revised 5 May 2020, accepted 7 May 2020.

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

- 김경래 (석사과정) / Kyeong-Rae Kim (Master Student)  
충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499  
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea
- 김완규 (석사과정) / Wan-Kyu Kim (Master Student)  
충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499  
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea
- 장인성 (교수) / In-Soung Chang (Professor)  
충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499  
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

model equation,  $E^{1.54}t = 1.2 \times 10^3$  was obtained by the membrane filtration data that were obtained with and without HVI induction. The equation states the products of En and t is always constant, which means that the required contact time can be reduced in accordance with the increase of E.

**Key words:** Membrane Bio-Reactor(MBR), Membrane fouling, Modeling, Resistance, Activated sludge

**주제어:** 막결합형 생물반응기, 막 오염, 모델링, 저항, 활성슬러지

## 1. 서 론

표준활성슬러지 공정의 2차 침전조를 분리막으로 대체한 막 결합형 생물반응기(Membrane Bio-Reactor, 이하 MBR)는 완벽한 고/액 분리가 가능하여 높은 MLSS(Mixed Liquor of Suspended Solid) 농도를 유지할 수 있어서 안정적인 유출수질 확보가 가능하여 최근 들어 그 사용이 확대되고 있다. 그러나 MBR 공정은 다른 막 분리 공정과 마찬가지로 막 오염이 필연적으로 발생하는 문제점을 가지고 있다. 막 오염을 해소하기 위한 다양한 연구와 상업적 개발이 시도되었으나, 일반적으로는 막 표면에 공기를 불어 넣는 조대 포기(coarse aeration) 방법이 널리 사용되고 있으며, 주기적인 역세척이나 화학 세정을 병행하고 있다. 그러나 이러한 막 오염 제어방법들은 에너지가 소비가 크며, 화학약품에 의한 2차 오염 문제가 발생하는 문제점이 지적되고 있다 (Park et al., 2015).

최근 고전압 임펄스(High Voltage Impulse, 이하 HVI) 기술을 활용하여 막 오염을 제어하려는 연구가 시도되고 있다 (Akamatsu et al., 2010; Chen et al., 2007; Kim et al., 2011; Lee and Chang, 2014; Park et al., 2005). HVI는 짧은 시간(ns- $\mu$ s) 동안 수십 kV 단위의 고전압을 펄스 형태로 방출시키는 기술을 일컫는다. 고전압 임펄스는 미생물의 세포막 (또는 세포벽)을 부분적으로 파괴하는 능력으로 인해 식품산업의 비열살균(non-thermal sterilization) 분야에 응용되어왔다 (Somolinos et al., 2008; Takanori et al., 2015; Zhao et al., 2013). 또한, 고전압 임펄스는 수종의 탈염 및 먹는샘물의 대체소독기술로 활용하기 위한 기초 연구 (Chang et al., 2017; Cho et al., 2017)가 진행 중이며 다양한 분야에 적용할 수 있는 기초기술로 주목받고 있다.

MBR의 막 오염은 주로 활성슬러지 미생물 세포와 플록에 의해 발생하는 것이므로 HVI 기술을 MBR의 막 오염 제어법으로 활용할 수 있는 가능성이 있다. MBR

의 막 오염은 막 표면에 축적된 케이크 층에 의한 막 오염과 막 내부 세공에 축적된 내부 막 오염에 의한 것으로 구분될 수 있다 (Hwang et al., 2012). 케이크 층에 의한 막 오염은 분리막 모듈을 향하여 수행되는 조대 포기에 의해 오염물질의 물리적인 탈착을 유도할 수 있으나, 내부 막 오염은 주기적인 화학 세정법으로 제거하는 것이 일반적이다 (Wu et al., 2008; Xu et al., 2013). 그러나 화학 세정은 화학물질을 운송, 저장, 보관 및 사용에 소요되는 안전 비용이 크게 증가하고 있으며, 2차 오염물질이 발생하여 이를 처리해야 하는 부담이 있어 분리막의 대체 세정 방법에 관한 연구가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 HVI 기술을 이용하여 MBR의 분리막 공극 내 축적된 막 오염 물질의 분해 및 탈착을 유도하여 막 오염 저감 기술로 활용할 수 있는지 그 가능성을 평가하고자 하였다. 구체적으로는 고전압 임펄스 공정, 즉 HVI의 중요한 운전 인자인 전계(electric field)의 크기와 접촉시간(contact time)이 막 오염 저감에 미치는 영향을 파악하고 이를 정량화하고 수식화하여 모델링 하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 활성슬러지 배양

환경 사업소 포기조의 활성슬러지 혼합액을 채취하여 실험실로 운송한 후, 연속회분식반응기 형태로 운용하면서 정상상태에 도달할 때까지 합성폐수로 순응시킨 후 실험에 사용하였다. 합성폐수는 glucose 2,000 mg/L, peptone 300 mg/L, yeast extract 800 mg/L,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  200 mg/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  50 mg/L,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  70 mg/L,  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{--}5\text{H}_2\text{O}$  15 mg/L,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  120 mg/L,  $\text{NaHCO}_3$  1,000 mg/L로 조제되어 16 L의 원통형 아크릴 반응조에서 배양하였다. 세부적인 운전조건은 Table 1에 나타내었다 (Uhm and Chang, 2017).

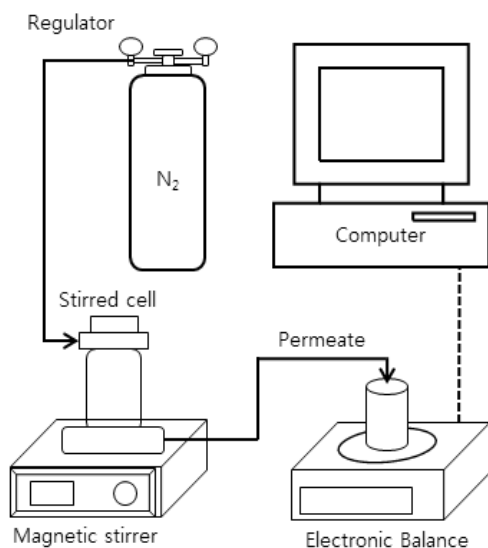
**Table 1.** Operating condition of sludge acclimation

Parameters	Values
Reactor Working Volume (L)	16
MLSS (mg/L)	4,500 ± 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 (°C)	15 ± 3

반응기에서 배양된 활성슬러지를 HVI 인가실험에 사용하였다. 이때의 MLSS 농도는 4,500 mg/L로 일정하였다.

## 2.2. 회분식 교반 셀

HVI 처리에 따른 막 여과 성능을 비교·분석하기 위해 회분식교반셀(Amicon 8200, USA)을 사용하여 활성슬러지 혼합액을 여과하는 막 분리를 수행하였다 (Fig. 1). 막 여과는 전량여과 방식이며 셀 내부 압력은 질소 실린더를 이용하여 조절하였다. 저울과 컴퓨터를 연결하여 단위 시간마다 투과수의 질량 변화 자료를 수집하여 투과 플럭스를 계산하였다. 여과에 사용된 분리막은 한외여과막(UF, PLTK06210, USA)을 사용하였으며, 세부 사양과 운전조건을 Table 2에 나타내었다.

**Fig. 1.** Schematic of stirred cell for the batch-type membrane filtration.**Table 2.** Operating condition of batch stirred filtration cell and specification of the membrane

Parameters	Value	Unit
Working volume	180	mL
Filtration area	30.2	cm <sup>2</sup>
Mixing speed	100	rpm
Applied pressure (N <sub>2</sub> gas)	2	atm.
Filtration temperature	22±3	°C
MWCO (Molecular Weight Cut-Off)	30	kDa

## 2.3 High Voltage Impulse 시스템

본 실험에 사용된 HVI 시스템은 반도체 스위치를 사용하여 고전압 임펄스를 발생시킬 수 있도록 설계되었다. Cho and Chang (2017)에서 제시된 고전압 및 펄스 발생장치의 등가회로대로 제작된 HVI 시스템은 최대 30 kV의 전압을 가진 펄스를 출력할 수 있다. 제작된 HVI 시스템에서 출력되는 펄스의 세부적인 제원을 Table 3에 요약하였다.

**Table 3.** Specification of high voltage impulse generator

Parameter	Unit	Values
Pulse voltage	kV	0 - 30
Pulse width	μs	4 - 40
Pulse frequency	Hz	100 - 300

## 2.4 HVI 반응기

활성슬러지로 오염된 분리막에 HVI를 인가하기 위한 반응기 (Fig. 2)를 제작하였다. 외부직경은 80 mm 이고 내부직경은 60 mm인 아크릴로 제작된 반응기 내부의 양 끝에 전극이 위치하게 하였다. 사용된 전극은 판(plate) 형태의 스테인레스로 제작된 후 에폭시를 이용하여 코팅하였다. HVI 시스템에 연결된 전극의 간격은 10 mm이다. HVI 시스템에서 전압의 세기를 조절하면서 전극에 펄스를 인가하였고 그 실험조건은 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서는 분리막의 내부 막 오염 저감을 유도하기 위해 HVI 장치를 이용하였으며, 그 효과를 검증하기 위한 실험법을 고안하여 Fig. 3에 요약하였다. 회분식 교반 셀로 순수를 여과하여 최초 물 플럭스 (initial water flux,  $J_{iw}$ )를 측정한다. 이후 활성슬러지 혼합액을 여과하여 플럭스  $J$ 를 측정한다. 이후 막 표면의

케이이크 층을 순수로 세정하여 제거한다. 케이이크 층이 제거된 분리막을 Fig. 2의 HVI 반응기 내부의 슬롯으로 위치시킨 후 반응기 내부에 순수를 채워 넣는다. 전계(E)의 크기와 접촉시간(t)을 변화시켜가며 내부 막 오염을 저감하기 위한 HVI 세정을 시도한다. HVI

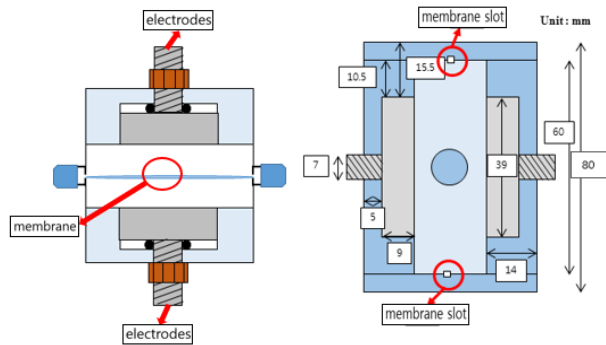


Fig. 2. Schematic of HVI reactor.

Table 4. Experimental condition for the HVI induction

Parameter	Unit	Values
Voltage	kV	5 / 10 / 15
Contact time	min	20 / 40 / 60 / 80
Electrode size	mm	39
Electrode gap	mm	10
MLSS	mg/L	4500 ± 300
Pulse width	μs	40
Pulse frequency	Hz	100

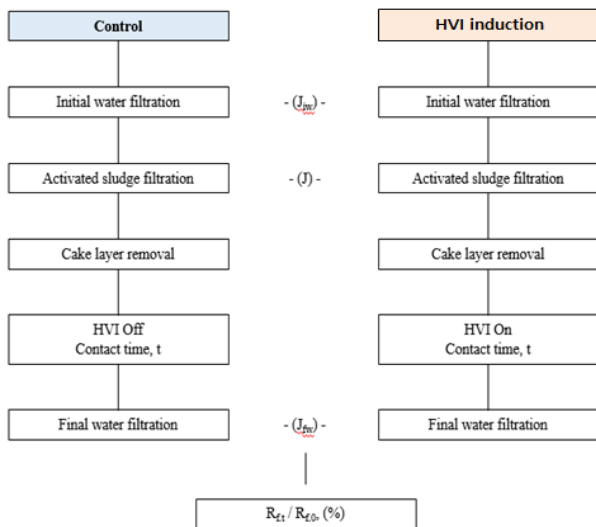


Fig. 3. Proposed protocol for determination of internal fouling resistance ( $R_f$ ) with and without HVI induction.

반응기에 인가한 전계(E) 하에 접촉시간, t가 지난 후 반응기에서 분리막을 제거하고 다시 회분식 교반 셀을 이용하여 최종 물 플럭스(final water flux,  $J_{fw}$ )를 측정한다. HVI를 인가하지 않고 동일 접촉시간 동안 순수에 담가놓은 분리막(대조군)의 최종 물 플럭스도 같이 측정한다.

측정된 세 가지 플럭스,  $J_{iw}$ ,  $J$ 와  $J_{fw}$  값을 직렬여과 저항(resistance in series) 모델 (Han and Chang, 2014)을 이용하여, HVI를 인가한 분리막의 내부 막 오염저항 ( $R_{fi}$ )과 대조군 분리막의 내부 막 오염저항( $R_{f0}$ )를 각각 계산한다. 각 저항의 비율 ( $R_{fi}/R_{f0}$ )을 비교하여, 이를 HVI에 의해 저감된 내부 막 오염의 기초 지표로 삼는다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전계 (E) 및 접촉시간 (t)에 따른 $R_f$ 변화

HVI의 운전 인자인 전계, E = 0, 5, 10, 15 kV로, 접촉시간 t = 20, 40, 60, 80분으로 변화시켜가며 Fig. 3과 같은 순서로 실험을 수행하여 얻은 여과자료를 이용하여  $R_m$ (분리막 자체 저항, intrinsic membrane resistance),  $R_c$ (케이이크 층 저항, cake layer resistance),  $R_f$ (내부 막 오염저항, internal pore fouling resistance)를 계산하여 Table 5에 요약하였다.

HVI를 인가하여 얻은 저항과 인가하지 않은 대조군의 저항을 비교하여 막 오염 저감이 어느 정도 달성되었는지를 비교하고자 하였다.  $R_m$ 은 분리막 자체의 저항값이므로 모든 실험과정에서 동종의 막을 사용하였기에 유사한 값( $0.96 \sim 1.08 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ )을 보인다. 케이이크 층을 제거한 후에 HVI를 인가하였기 때문에 케이이크 층에 의한 저항( $R_c$ )도 대조군과 큰 차이를 보이지 않는 것은 당연하다. 본 연구에서는 HVI를 인가하여 얻을 수 있는 막 오염 감소 효과는  $R_f$ 의 감소에 있으며 대조군과 비교하여 얼마나 감소하였는지를 주목할 필요가 있다.

예상한 대로 전계(E)와 접촉시간(t)이 증가할수록  $R_f$ 는 감소하였다. 이는 HVI 인가로 인해 막 공극 내 잔류하던 용존성 물질 및 콜로이드성 물질이 제거되었거나 막으로부터 이탈되었음을 시사한다. 전계와 접촉시간이 증가할수록  $R_f$ 는 더욱 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 예를 들면, 전계 15 kV/cm에서 80분



의 접촉시간 동안 HVI를 인가하면  $R_f$ 는  $0.035 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 에서  $0.010 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 71% 감소하였다. HVI 인가로 인해 분리막 세공 내부에 흡착된 미생물 세포와 유/무기물질들이 분해 및 탈착되어  $R_f$ 가 감소한

**Table 5.** Comparison of each resistance obtained from the controls and the HVI induction according to the applied electric field and contact time

(a) Electric field : 5 kV/cm

Contact time (min)	Resistance ( $\times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ )		
	$R_m$	$R_c$	$R_f$
control	0.97	22.71	0.268
20	0.97	22.72	0.262
control	0.97	22.71	0.267
40	0.97	22.72	0.252
control	0.97	22.72	0.261
60	0.97	22.73	0.228
control	0.97	22.74	0.241
80	0.97	22.78	0.195

(b) Electric field : 10 kV/cm

Contact time (min)	Resistance ( $\times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ )		
	$R_m$	$R_c$	$R_f$
control	0.98	25.34	0.294
20	0.98	25.36	0.277
control	0.98	26.37	0.287
40	0.98	26.43	0.240
control	0.98	26.38	0.282
60	0.98	26.45	0.181
control	0.98	25.36	0.272
80	0.98	25.47	0.145

(c) Electric field : 15 kV/cm

Contact time (min)	Resistance ( $\times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ )		
	$R_m$	$R_c$	$R_f$
control	1.08	12.68	0.058
20	1.07	11.96	0.045
control	1.02	13.28	0.065
40	1.01	12.78	0.036
control	0.93	12.65	0.228
60	0.96	12.76	0.090
control	1.02	13.61	0.035
80	1.02	13.06	0.010

것으로 추정된다. HVI는 미생물 세포막 내/외부의 전위차를 발생시켜 세포막을 천공시키는 것으로 알려졌다 (Kim et al., 2011). HVI의 이런 세포막 천공 메커니즘을 이용해 소독공정으로 사용하기도 한다. 따라서 분리막 세공 내부에 오염을 일으킨 미생물 세포의 파괴로 인해  $R_f$ 가 감소한 것이 아닌가 추정한다.

### 3.2 HVI 처리에 따른 $R_f$ 저감 모델링

HVI를 인가함에 따라 막 오염이 감소하는 속도, 즉  $R_f$  감소속도를 모델링 하였다. 이를 위하여 대조군 (HVI 인가하지 않은 경우)의  $R_f$ 값을  $R_{f0}$ , HVI를 인가한 실험군의  $R_f$ 값을  $R_{ft}$ 로 지칭하였다.  $R_{f0}$  대비 차지하는  $R_{ft}$ 의 비율을 계산하여  $R_d (=R_{ft}/R_{f0})$ 로 표시하였다. Table 4의 자료를 이용하여 계산된  $R_d$ 값을 정리하여 Table 5에 나타내었다. 예를 들면, Table 4(a)에서 인가전압이 5 kV이고, 접촉시간 20분에서의  $R_{f0} = 0.268$ 이고,  $R_{ft} = 0.262$ 이므로,  $R_d = R_{ft}/R_{f0} = 0.262/0.268 = 0.98$ 이다. 같은 방법으로 계산을 반복하여 Table 6를 완성하였다.

Table 6의 자료를 이용하여 x축은 접촉시간 t로 놓고, y축은  $-\ln(R_{d,t}/R_{d,0})$ 로 계산된 값을 이용하여 그래프를 그린다 (Fig. 4). y축에서  $R_{d,0}$ 는 접촉시간이 0일 때의  $R_{ft}/R_{f0}$  값을 의미하며(즉, HVI 인가하지 않은 대조군),  $R_f$ 가 감소하지 않았으므로 그 값은 항상 1이다. 즉,  $R_{ft} = R_{f0}$ 이므로  $R_{ft}/R_{f0} = 1$ 이다. 반면,  $R_{d,t}$ 는 HVI의 접촉시간이 t일 때의  $R_{ft}/R_{f0}$  값을 의미한다. 예를 들면, 인가전압이 5 kV이고, 접촉시간 20분에서의 y축 값을 계산하면  $-\ln(R_{d,t}/R_{d,0}) = -\ln(0.98/1) = 0.02$ 이다. 또한, 인가전압이 15 kV이고, 접촉시간 80분에서의 y 값은  $-\ln(R_{d,t}/R_{d,0}) = -\ln(0.29/1) = 1.24$ 이다.

**Table 6.** Ratio of the internal pore fouling resistance between the control ( $R_{f,0}$ ) and the reduced fouling resistance by HVI induction ( $R_{f,t}$ )

Electric field (kV/cm)	$R_d = R_{f,t}/R_{f,0}$				
	Contact time, min				
	0	20	40	60	80
5	-	0.98	0.94	0.87	0.81
10	-	0.94	0.84	0.64	0.53
15	-	0.78	0.55	0.40	0.29

pp. 169-182

pp. 183-190

pp. 191-200

pp. 201-210

pp. 211-220

pp. 221-230

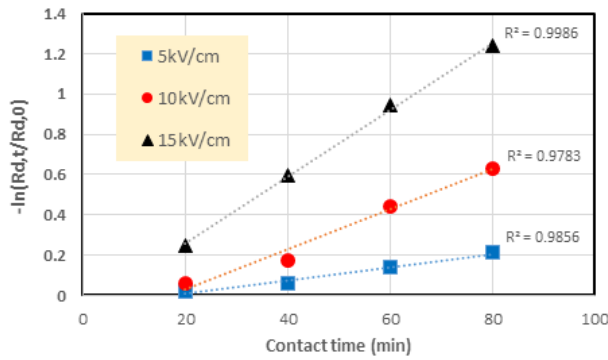


Fig. 4. Plot of  $-\ln(R_{d,t}/R_{d,0})$  vs. contact time (t) as a function of the applied E.

Fig. 4에서 접촉시간 (t)에 따른  $-\ln(R_{d,t}/R_{d,0})$ 의 변화가 선형적으로 나타났다. 반응속도론(kinetics)에 의하면  $-\ln(C_t/C_0)$  vs. t 그래프를 플롯하여 선형적인 관계를 보인다면 1차 반응(1st order reaction)으로 간주한다. 따라서 Fig. 4는 공극내저항감소율 ( $R_{f,t}/R_{f,0}$ )이 1차 반응을 따르고 있음을 확인해주고 있다. 따라서 공극 내 오염저항 감소속도,  $R_{f,t}/dt$ 는 식(1)과 같이 1차 반응식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dR_{f,t}}{dt} = -k' R_{f,t} \quad (1)$$

$R_{f,t}$  : internal pore fouling resistance over the control at time t [ $m^{-1}$ ]

t : contact time [min]

$k'$  : temporary rate constant [ $min^{-1}$ ]

위의 실험결과에서처럼 전계 (E)가  $R_f$  저감에 영향을 미치기 때문에 임시 반응속도상수  $k'$ 은 E의 n승에 비례한다고 놓으면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)과 (2)를 합하여 식 (3)으로 표현하고 이를 변수 분리 후, 접촉시간은 0에서 t까지,  $R_f$ 는  $R_{f,0}$ 에서  $R_{f,t}$ 까지 적분하여 정리하면 식 (4)를 얻는다.

$$k' = kE^n \quad (2)$$

$$\frac{dR_{f,t}}{dt} = -kE^n R_{f,t} \quad (3)$$

$$\ln \frac{R_{f,t}}{R_{f,0}} = -kE^n t \quad (4)$$

$k$  : 1st order reaction rate constant [ $min^{-1}$ ]

$R_{f,0}$  : internal pore fouling resistance at time = 0 ( $m^{-1}$ )

E : Electric field [kV/cm]

n : constant involving with the electric field

식 (4)의 양변에 로그를 취하고  $\ln(E)$ 에 관해 정리하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\ln E = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{R_{f,t}}{R_{f,0}} \right) \right] \quad (5)$$

식 (5)에서 x축은 접촉시간  $\ln(t)$ 로 놓고, y축은  $\ln(E)$ 로 하여 그래프를 그리면 Fig. 5와 같은 직선을 얻을 수 있다. 직선의 기울기와 y 절편값을 이용하면 상수 n과 k를 구할 수 있다.

실제로 Table 6의  $R_d$ 값들을 x축은 접촉시간 t로 놓고, y축은  $R_d$ 로 하여 그래프에 전개하면 Fig. 6을 얻는다. y축이 0.8인 지점, 즉, 공극 내 오염저항 감소율  $R_d$ 가 0.8이 되는 지점(HVI에 의해  $R_f$ 가 대조군에 비해

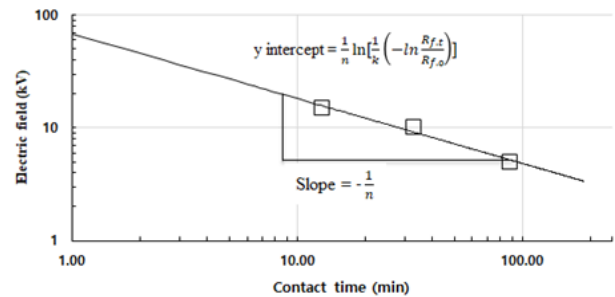


Fig. 5. Example of  $\ln(E)$  vs.  $\ln(t)$  plot.

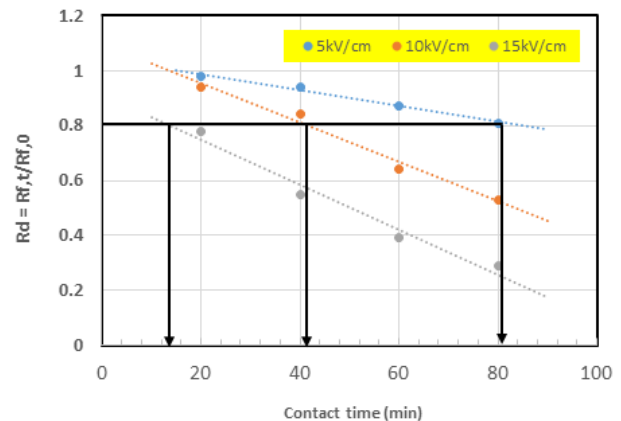


Fig. 6. Plot of  $R_d (=R_{f,t}/R_{f,0})$  along with contact time as a function of the applied E.



pp. 169-182

pp. 183-190

pp. 191-200

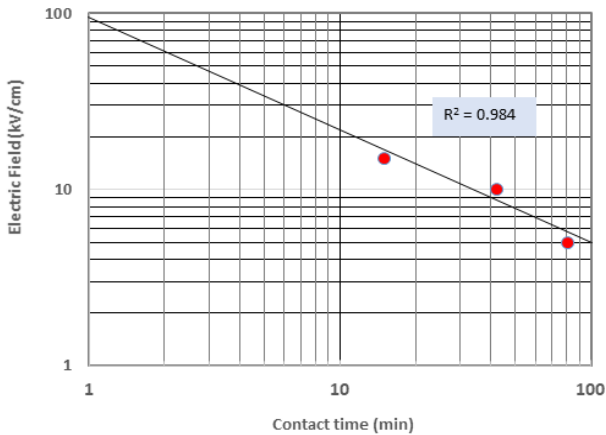
pp. 201-210

pp. 211-220

pp. 221-230

**Table 7.** Electric field and contact time when the internal pore resistance was reduced to 20% of the control

Electric field (kV/cm)	Contact time (min)
5	81
10	42
15	15



**Fig. 7.** Plot of ln(E) vs. ln(t) to acquire 20% reduction of the internal pore resistance ( $R_f$ ) over the control.

20% 감소하는 지점에서 x축과 평행한 직선을 그으면 세 개의 전계 (E) 직선들과 세 곳에서 만나게 된다. 만난 지점의 x값, 즉, 접촉시간을 확인하여 Table 7에 정리하였다.

Table 7의 자료를 이용하여  $R_f$ 가 대조군에 비해 20% 감소할 때 요구되는 접촉시간을 x축으로, 전계 (E)를 y축으로 하여 ln(E) vs. ln(t) 그래프를 그린다 (Fig. 7).

위 그래프에서 얻은 직선의 기울기와 y 절편값을 이용하여 상수 n과 k를 얻는다. 직선의 기울기는 식 (5)에서 보듯이  $-1/n$ 이다.

$$-\frac{1}{n} = -0.65, \therefore n = 1.54 \quad (6)$$

반응속도 상수 k는 식 (7)와 같이 y 절편값을 정리하여 구할 수 있다.

$$Y \text{ intercept} = \ln(98) = \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{R_{d,t}}{R_{d,0}} \right) \right] \quad (7)$$

$$n(\ln 98) = \ln \left[ \frac{1}{k} (-\ln 0.8) \right] \quad (8)$$

$$e^{7.06} = \left[ \frac{1}{k} (0.223) \right] \quad (9)$$

$$\therefore k = 1.9 \times 10^{-4} [\text{min}^{-1}] \quad (10)$$

최종적으로 구한 n과 k값을 식 (4)에 대입하여 정리하면 최종 식 (12)가 결정된다.

$$\ln \frac{R_{f,t}}{R_{f,0}} = \ln \frac{80}{100} = -0.223 = -1.9 \times 10^{-4} E^{1.54} t \quad (11)$$

$$E^{1.54} \cdot t = 1.2 \times 10^3 \quad (12)$$

E: Electric field [kV/cm], t: Contact time [min]

최종 식 (13)이 의미하는 바는 공극 내 저항 감소율,  $R_d$ 가 20% 감소할 때 요구되는 전계의 세기 E와 접촉 시간 t를 의미한다. 즉,  $E^n$ 과 접촉시간 t의 곱이 항상 일정( $E^n \cdot t = \text{constant}$ )함을 의미한다. 이는 분리막의  $R_f$  값이 20% 감소할 때 필요한 전계의 세기(E)와 접촉시간(t)과의 상관관계를 나타내는 것이다. 즉, HVI를 이용하여 분리막의  $R_f$  값을 20% 감소시킬 때 필요로 하는 접촉시간이 증가하면 전계의 세기는 감소하고, 반대로 접촉시간이 감소하면 전계의 세기가 증가하는 정도를 정량적으로 예측하고 있다.

## 4. 결론

본 연구에서 분리막 공극 내 오염저항( $R_f$ ) 값을 저감하기 위해 고전압 임펄스 기술을 활용하였다. 인가하는 HVI의 접촉시간과 전계를 변화시키며  $R_f$  저감 효율을 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 활성슬러지 여과 후 오염된 분리막에 HVI를 인가 후 공극 내 오염 저항( $R_f$ ) 감소를 관찰하였다. 전계 (E)가 5 kV/cm일 때 접촉시간이 20분에서 80분으로 증가할수록 최대 19%, 10 kV/cm일 때는 47%, 15 kV/cm일 때는 71%까지 감소하였다. 이를 통해 HVI의 전계와 접촉시간이  $R_f$  저감에 미치는 중요한 운전 인자임을 확인하였다.

2) 접촉시간과 전계가 공극 내 막 오염 저항( $R_f$ )의 저감에 미치는 영향을 탐색하고자 반응속도론에 기초하여,  $R_f$  값이 20% 감소할 때 요구되는 전계와 접촉시

간의 모델식,  $E^{1.54} \cdot t = 1.2 \times 10^3$ 을 도출하였다. 분석이 의미하는 바는 공극 내 막 오염 저항값이 20% 감소할 때 요구되는 HVI의 접촉시간(t)과 전계(E)의 상관관계이며 E와 t의 곱은 항상 일정함을 의미한다.

## 사 사

이 논문은 2019년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구입니다(20190430).

## References

- Akamatsu, K., Lu, W., Sugawara, T. and Nakao, S.H. (2010). Development of a novel fouling suppression system in membrane bioreactors using an intermittent electric field, *Water Res.*, 44, 825-830.
- Chang, I.S., Lee, J.H. and Cho, C.H. (2017). Water treatment system using high voltage impulse, Korean Patent, 10-1731856.
- Chen, J.P., Yang, C.Z., Zhou, J.H. and Wang, X.Y. (2007). Study of the influence of the electric field on membrane flux of a new type of membrane bioreactor, *J. Chem. Eng.*, 128, 177-180.
- Cho, S.Y. and Chang, I.S. (2017). Effect of operating conditions of high voltage impulse on generation of hydroxyl radical, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 31(6), 611-618.
- Han, S.H. 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.
- Hwang, B.K., Lee C.H., Chang, I.S., Drews A. and Field, R. (2012). Membrane bioreactor: TMP rise and characterization of bio-cake structure using CLSM-image analysis, *J. Membrane Sci.*, 419, 33-41.
- Kim, J.Y., Lee, J.H., Chang, I.S., Lee, J.H. and Yi, J.W. (2011). High voltage impulse electric fields: disinfection kinetics and its effect on membrane bio-fouling, *Desalination*, 283, 111-116.
- Lee, J.S. and Chang, I.S. (2014). Membrane fouling control and sludge solubilization using high voltage impulse (HVI) electric fields, *Process Biochem.*, 49, 858-862.
- 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.
- Park, S.J., Lee, J.H., Chang, I.S., Kang, S.M. and Lee, J.H. (2005). "Membrane fouling control using the high voltage impulse system", *Proceedings of Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, Seoul, Korea.
- Somolinos, M., Manas, P., Condon, S., Pagan, R. and Garcia, D. (2008). Recovery of *Saccharomyces cerevisiae* sublethally injured cells after Pulsed Electric Fields, *Int. J. Food Microbiol.*, 125(3), 352-356.
- Takanori, T., Tomoki, Y., Kazukr, S., Sun, B. and Takayuki, O. (2015). Inactivation of escherichia coli phages by PEF treatment and analysis of inactivation mechanism, *J. Electrostat.*, 73, 151-155.
- 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.
- Wu, J., Le-Clech, P., Stuetz, R., Fane, A. and Chen, V. (2008). Effects of relaxation and backwashing conditions on fouling in membrane bioreactor, *J. Membrane Sci.*, 324, 26-32.
- Xu, M., Wen, X., Huang, X., Yu, Z. and Zhu, M. (2013). Mechanisms of membrane fouling controlled by online ultrasound in an anaerobic membrane bioreactor for digesting of waste activated sludge, *J. Membrane Sci.*, 445, 119-126.
- Zhao, W., Yang, R., Shen, X., Chen, S. and Chen, X. (2013). Lethal and sublethal injury and kinetics of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in milk by pulsed electric fields, *Food Control*, 32(1), 6-12.