

# EC-MBR에서 전기응집이 슬러지 특성에 미치는 영향

엄세은<sup>1</sup>, 장인성<sup>2\*</sup>

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

## Effect of electrocoagulation on sludge characteristics in EC-MBR

Se-Eun Um<sup>1</sup>, In-Soung Chang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nanobionics, Hoseo University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Hoseo University

**요약** 전기응집 공정은 MBR (Membrane Bio-Reactor) 공정의 막 오염을 해결하기 위한 일환으로 응용되고 있다. 본 연구는 전기응집 공정의 중요한 운전변수인 전류밀도와 접촉시간에 따른 활성슬러지의 특성 변화에 관한 연구를 수행하였다. 전류밀도를 2.5, 12, 24 A/m<sup>2</sup>로, 접촉시간은 0, 2, 6 hr로 변화시켜 가며 활성슬러지의 특성 변화를 관찰하였다. 전류밀도 24 A/m<sup>2</sup> 조건에서 6시간 동안 MLSS는 6,800에서 7,000 mg/L로 3% 증가하였고, MLVSS는 6,280에서 6,300 mg/L로 큰 변화가 없었다. 다른 전류밀도 조건 하에서도 동일한 경향이 관찰되었다. COD는 전류밀도가 24 A/m<sup>2</sup>일 때 71에서 37 mg/L로 감소하였고, 12 A/m<sup>2</sup>일 때는 113에서 67 mg/L로, 2.5 A/m<sup>2</sup>일 때는 84에서 80 mg/L로 감소하였다. 반면 TN과 TP는 전반적으로 큰 변화를 보이지 않았다. Soluble-EPS와 Bound-EPS는 전류밀도가 증가할수록 약간 감소하는 경향을 보였다. 전기응집을 거친 활성슬러지로 막 여과를 수행하여 여과성능이 개선되는지 평가하였다. 전기응집을 수행하지 않은 대조군에 비해 총여과저항 (R<sub>t</sub>)이 6~61% 감소한 것으로 나타났다. 특히 전류밀도와 접촉시간이 증가할수록 막 여과 저항이 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 전기응집 공정이 MBR 공정의 막 여과 성능 개선에 사용될 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** The application of electro-coagulation has been attempted to control the membrane fouling problem in a MBR (Membrane Bio-Reactor). This study examined the effects of the operating parameters (current density and contact time) of the electro-coagulation process on the change in the characteristics of activated sludge. The current density changed from 2.5 to 12, 24 A/m<sup>2</sup>, and the contact time was varied from 0 to 2 and 6 hr, respectively. At a current density of 24 A/m<sup>2</sup> and 6 hr of operation, the MLSS changed from 6,800 to 7,000 mg/L (3% increase), but the MLVSS did not increase significantly. After 6 hr of operation, the soluble COD decreased from 71 to 37 mg/L under the 24 A/m<sup>2</sup> condition, from 113 to 67 mg/L under the 12 A/m<sup>2</sup> condition, and from 84 to 80 mg/L under the 2.5 A/m<sup>2</sup> condition. On the other hand, soluble-TN and -TP concentration showed slight changes. The soluble-EPS and Bound-EPS concentration decreased slightly with increasing current density. The membrane filtration performance of activated sludge before and after electro-coagulation was compared. The filtration resistances after electro-coagulation decreased from 6 to 61 %, particularly as the current density and contact time were increased. This indicates that electro-coagulation can be used to control membrane fouling in the MBR process.

**Keywords** : Electrocoagulation, Membrane bio-reactor (MBR), Membrane fouling, Resistance, Sludge

### 1. 서론

MBR (Membrane bio-reactor) 공정은 전통적인 표준

활성슬러지 공정보다 고농도의 MLSS로 운영이 가능하여 유출수질이 양호하며 잉여 슬러지를 적게 발생시키는 장점이 있다 [1]. 이 때문에 MBR은 고도처리를 요하는

본 논문은 교육부 연구재단 이공분야 기초연구사업 과제 (NRF-2010-0012295)로 수행되었음.

\*Corresponding Author : In-Soung Chang (Hoseo Univ.)

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

Received September 12, 2017

Revised (1st October 23, 2017, 2nd October 31, 2017)

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

곳이나 용수 재이용 공정에 빈번하게 사용되고 있다 [2, 3]. 이러한 장점에도 불구하고, MBR 공정은 막 분리 공정에서 필연적으로 발생하는 막 오염 때문에 그 사용이 상당히 제한 받고 있다. 막 오염을 해결하기 위해 사용되는 고에너지 비용이 MBR 공정에서 해결해야 할 가장 중요한 문제로 남아있다.

막 오염을 제어하기 위해 다양한 물리, 화학, 생물학적 방법이 시도되고 있다. 물리적 세정 법으로는 일정 시간 간격으로 막 여과를 시행/중지를 반복하는 막 이완법과 공기나 여과수를 여과의 반대 방향으로 수송하는 역세척방법이 있다 [4]. 비가역적 오염이 축적됨에 따라 물리적 세정으로는 한계가 있으므로 다양한 유형의 화학적 세정이 권장되기도 한다. 화학적 세정을 위해 산화력이 있는 차아염소산나트륨 (NaOCl)을 사용한다 [5, 6]. 한편, 세포간의 의사소통을 차단시켜 EPS (세포의 고분자 물질, Extra-cellular polymeric substances) 생성 등을 제어하는 생물학적 제어방법 등이 시도되고 있다 [7].

최근 연구에서는 화학약품인 응집제를 사용하지 않고 응집효과를 얻을 수 있는 전기응집 (Electro-coagulation) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 전기응집은 전극을 수중에 침지시켜 전류를 흘려보내어 양극에서 용출된 양이온 ( $Al^{+3}$  등)에 의해 수중의 콜로이드성 물질이 응집되는 공정이다 [8]. 전기응집 기술은 수중에 녹아있는 중금속을 처리하는데도 유용한 기술로 사용되고 있다 [9, 10].

이러한 전기응집 기술을 MBR에 접목시켜 막 오염 제어에 효과가 있음을 증명하는 연구들이 보고되고 있다 [11, 12]. 전기응집 기술이 MBR의 막 오염에 중요한 역할을 하는 콜로이드성 물질을 응집시켜 막 오염을 완화시킬 수 있기 때문이다. 또한 화학물질의 제조, 운송, 보관 및 사용에 있어 안전 기준이 차츰 강화되고 있는 현 시점에서 화학 응집제를 직접 투여하지 않고 전기응집만으로 MBR의 막 오염을 제어하는 것은 그 자체로 큰 장점이 될 수 있다.

MBR에 전기응집을 결합한 EC-MBR (Electro-coagulation MBR) 공정을 통해 막 오염을 제어했다는 연구 결과들이 꾸준히 보고되어 왔다 [13-15]. 그러나 EC-MBR의 최적 운전 조건을 탐색하거나 전기응집이 활성슬러지의 생물학적 특성을 어떻게 변화시키는지에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 막 오염에 관여하는 활성슬러지의 특성들은 매우 다양하고 복잡하기 때문에 이에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 EC-MBR이 효과적으로 막 오염을 제어하기 위한 사전 연구로, 전기응집이 활성 슬러지 특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고자 하였다. 아울러 전기응집 운전조건이 막 오염 저감에 미치는 영향도 확인하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 활성 슬러지 배양

전기응집 실험에 앞서, 본 연구에 사용된 슬러지 혼합액은 C시 환경 사업소의 포기조에서 채취한 활성슬러지를 실험실에서 수 개월간 합성폐수로 순응시킨 후 시료로 사용하였다. 합성폐수는 Glucose 2,000 mg/L, Peptone 300 mg/L, Yeast extract 800 mg/L,  $(NH_4)_2SO_4$  200 mg/L,  $KH_2PO_4$  50 mg/L,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  70 mg/L,  $MnSO_4 \cdot 4 \sim 5H_2O$  15 mg/L,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  120 mg/L,  $NaHCO_3$  1,000 mg/L로 조제되어 16 L의 원통형 아크릴 반응조에서 배양하였다. 세부적인 운전조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Operating condition of sludge acclimation

Parameters	Values
Reactor Working Volume (L)	16
MLSS (mg/L)	6,000 ± 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

### 2.2 전기응집 (Electro-coagulation)

전기응집 실험을 수행하기 위해 내경 110 mm, 외경 120 mm, 높이 155 mm의 1 L 용량의 원통형 아크릴 반응기를 제작하였다. 반응기 상부에는 전극을 고정시키기 위한 홈을 설치해 전극이 삽입되도록 하였다. 반응기 내부에 교반기를 연결하여 전기응집 도중 슬러지가 침강되는 것을 방지하였다. 아울러 회분식 전기응집 과정에 슬러지의 활성저하를 방지하고자 펌프를 이용하여 공기를 공급하였다. 알루미늄 판을 너비 50 mm, 높이 130 mm

으로 가공하여 전극으로 사용하였다. 본 연구에서는 전기응집 조건이 활성슬러지의 특성에 미치는 영향에 관한 것이어서 전극의 단위면적 (A)당 처리되는 부피 (V), 즉 V/A가 전기응집 효율에 미치는 영향은 수행하지 않았다.

전기응집 실험은 전류밀도와 접촉시간을 달리하여 진행되었다. 전류밀도의 세기는 각각 2.5, 12, 24 A/m<sup>2</sup>로 변화시켰고, 접촉시간은 0, 2, 6시간으로 변화시켜 가며 진행하였다. 각각의 전류밀도의 세기에서 접촉시간이 0시간인 조건은 전기응집을 하지 않은 대조군 (Control)으로 사용하였다. 전기응집 실험의 세부적인 운전조건은 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Operating condition of batch typed electrocoagulation reactor

Parameter	Value		
	1-3	4-6	7-9
Run #			
Reactor Working Volume (L)	1		
Electrodes gap (cm)	5		
Submerged electrode area (cm <sup>2</sup> )	33.5		
Current density (A/m <sup>2</sup> )	24	12	2.5
Operation time (hr)	0, 2, 6	0, 2, 6	0, 2, 6
Stirring speed (rpm)	100		
Air supply (L/min)	0.5		

### 2.3 분석방법

전기응집 수행 전·후의 활성슬러지의 특성 변화를 파악하기 위한 분석을 수행하였다. 시료의 MLSS, MLVSS, COD, TN, TP, EPS를 측정하였다. MLSS와 MLVSS는 Standard methods [16]에 준하여 분석하였다. EPS는 열처리법 [17]을 통하여 Soluble EPS와 Bound EPS를 추출하여 분석하였다. EPS의 주성분인 단백질과 다당류를 분석하였다. 단백질 성분은 Lowry 법 [18]으로, 다당류 성분은 Phenol-sulfuric acid 법 [19]으로 분석하였다. COD, TN, TP 분석에 사용된 시료는 여과지 (GF/C, Whatman)로 여과한 여액을 사용하여 모두 용존성 성분을 분광광도계 (DR/4000 U, HACH, USA)로 측정하였다. 분석방법과 장치를 Table 3에 요약하였다.

Table 3. Analysis methods and apparatus

Item	Methods and Apparatus
MLSS & MLVSS	Gravimetric method, Standard Method
COD	Reactor digestion method, Method 8000, DR4000, HACH
TN	Persulfate digestion method, Method 10129, DR4000, HACH
TP	PhosVer3 with acid persulfate digestion, Method 8190, DR4000, HACH
Protein	Lowry method
Polysaccharide	Phenol-sulfuric acid method

### 2.4 회분식 교반 셀 실험

전기응집 수행 전·후의 막 여과 성능을 확인하기 위해 회분식 교반 셀 실험을 진행하였다 (Fig. 1). 여과 장치는 유효부피가 180 mL이고, 유효면적이 28.7 cm<sup>2</sup>인 회분식교반셀 (Amicon 8200, Amicon, USA)에 분획분자량 (MWCO)이 30,000 Dalton인 한외여과막 (UF)을 장착하여 시료를 여과시키고, 막을 통과한 투과수를 컴퓨터에 연결되어있는 전자저울 (LP220s, Satorious, Germany)로 측정된 자료를 컴퓨터로 이송하여 기록하였다. 여과 셀의 교반 속도는 100 rpm으로 조절하였다. 막 여과를 위해 질소가스 실린더를 연결하여 2 기압 (atm)의 압력을 유지하였다.

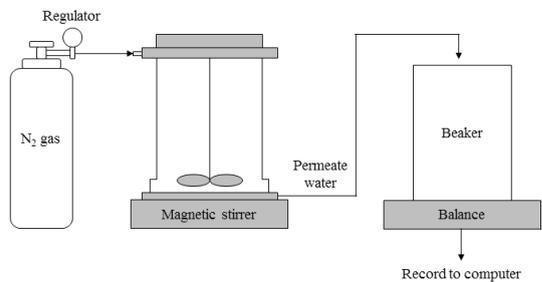


Fig. 1. Schematic diagram of stirred cell filtration system.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 부유 미생물 농도

전기 응집이 부유 미생물 농도에 미치는 영향을 알아보기 위해 MLSS와 MLVSS를 측정하였다 (Fig. 2). MLSS는 전류밀도가 24 A/m<sup>2</sup>일 때 6,800 mg/L에서 7,000 mg/L까지 약 3% 가량 증가하였으나 MLVSS는

6,280 mg/L에서 6,300 mg/L로 큰 변화가 없었다. 나머지 전류밀도 (2.5 A/m<sup>2</sup>, 12 A/m<sup>2</sup>) 조건에서의 MLSS와 MLVSS는 큰 변화가 없었다. 즉, 6시간 정도의 비교적 짧은 시간의 접촉시간에서는 유의할만한 수준의 MLSS 증가는 없는 것으로 판단된다.

전류밀도가 가장 높은 조건인 24 A/m<sup>2</sup> 에서 MLSS의 농도가 약간이나마 증가한 원인은 무기물의 생성으로 인한 것으로 판단된다. 즉 전기응집이 진행되는 동안 전극으로 사용된 알루미늄 판에서 용출된 알루미늄 이온 (Al<sup>3+</sup>)이 수용액 내의 수산화이온, 인 등과 반응하여 Al(OH)<sub>3</sub>, AlPO<sub>4</sub>와 같은 불용성 알루미늄염이 생성된 것으로 해석할 수 있다 [20, 21].

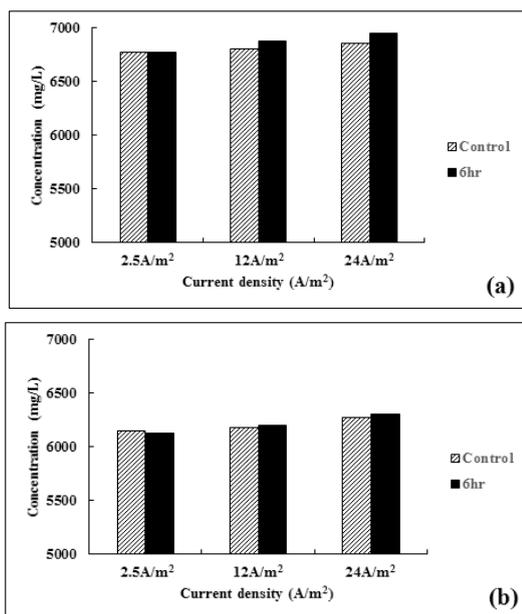
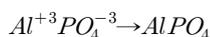
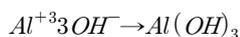


Fig. 2. Variation of MLSS (a) and MLVSS (b) concentration as a function of current density

### 3.2 Soluble COD, TN, TP 농도

전기응집에 의한 Soluble COD, TN, TP 농도 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 전류밀도가 24 A/m<sup>2</sup>일 때 71 mg/L에서 37 mg/L까지 COD가 감소하였다. 전류밀도가 12 A/m<sup>2</sup>일 때는 113 mg/L에서 67 mg/L로, 2.5 A/m<sup>2</sup>일 때는 84 mg/L에서 80 mg/L로 감소하였다. COD 농

도가 감소한 이유는 Al(OH)<sub>3</sub>와 같은 불용성 염이 생성되는 과정에서 입자간 가교현상과 침전물의 거름작용 (sweep flocc) 메커니즘에 의해 모 용액 중의 유기물 성분이 응집되었을 가능성이 높다. 또한 미생물이 전기적 자극을 받아 슬러지의 활성도가 향상되어 유기물 제거가 전기응집을 하지 않았을 때보다 더 좋아진 것으로 설명할 수도 있다 [21]. 만약 높은 전류 밀도가 가해지게 된다면 오히려 유기물 제거효율이 감소할 수 있는데, 이는 강한 전기 자극 또는 미생물에 악영향을 미치는 금속이온이 과도하게 발생하여 미생물을 사멸시킬 수 있기 때문으로 알려져 있다 [8]. 반면 Soluble TN과 TP의 농도는 전반적으로 큰 변화를 보이고 있지는 않은 것으로 나타났다.

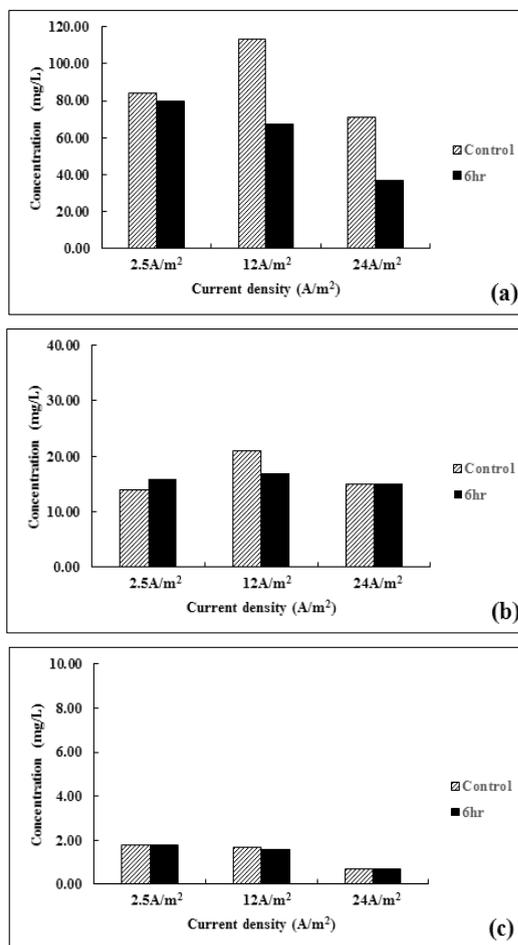


Fig. 3. Variation of Soluble COD, TN and TP concentration by current density; (a) Soluble COD, (b) Soluble TN (c) Soluble TP

### 3.3 세포 외 고분자 물질 (EPS)

전기응집이 EPS 농도에 미치는 영향을 Fig. 4와 5에 제시하였다. EPS는 활성슬러지 혼합액에 존재하는 Soluble EPS와 플록 내·외부에 존재하여 미생물 세포를 연결하는 역할을 하는 Bound EPS로 구분되며 주성분은 단백질과 다당류로 알려져 있다. EPS는 겔과 같은 고수화물 형태로 이루어져있고 표면적이 크기 때문에 높은 접착력으로 막의 기공을 막거나 표면에 달라붙어 겔과 케이크층을 형성하여 막 오염에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [23, 24]. 막 오염이 발생하는 기본적인 메커니즘으로는 플록과 콜로이드 등의 오염물질에 의해 분리막의 기공이 막히기 시작하면서 케이크층을 형성하여 여과 효율이 감소하는 것이다. 이 때 EPS가 케이크층 내부에서 투과수의 장벽으로 작용할 수 있기 때문에 전기응집을 통해 EPS를 저감시킬 수 있다면 막 오염 제어에 긍정적인 효과를 줄 수 있을 것으로 보인다.

Soluble EPS는 전류밀도가 24 A/m<sup>2</sup>, 12 A/m<sup>2</sup>일 때 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있고, 2.5 A/m<sup>2</sup>에서는 다소 증가한 것을 볼 수 있다. 전기응집이 soluble EPS를 감소시키는 현상은 다른 연구자들에 의해서도 보고되고 있다. Liu et. al. (2012)은 전류의 세기가 1, 3, 5 mA일 때 soluble EPS가 약 10, 15, 5 mg/L 감소되었다고 보고하였다. Ibeid et al. (2015)은 전류밀도의 세기가 15~35 A/m<sup>2</sup>일 때 soluble EPS 중 protein은 50%, polysaccharide는 90%까지 제거한 결과를 보여주었다 [12, 25]. 본 연구에서는 전류밀도가 비교적 낮은 조건, 2.5 A/m<sup>2</sup>일 때는 전기응집 효과가 미미한 것으로 나타났다. Soluble EPS의 감소는 수산화알루미늄이 응집되면서 흡착을 통해 Soluble EPS를 제거시키는 sweep floc 메커니즘이 작동한 것으로 보인다. 또한 EPS의 표면은 음전하를 띄고 있기 때문에 알루미늄 양이온에 이끌려 제거될 수도 있다 [26].

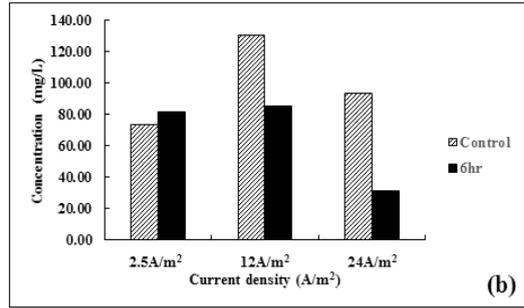
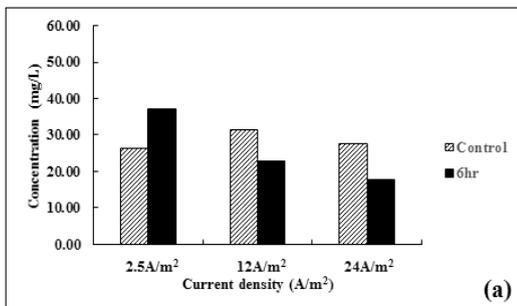


Fig. 4. Variation of Soluble EPS concentration by current density; (a) Protein, (b) Polysaccharide

Bound EPS의 경우에도 전류밀도가 2.5 A/m<sup>2</sup>인 경우를 제외하고는 최종적으로 감소하는 경향을 보였다. 단백질과 다당류 성분 모두 동일한 경향을 보였다. 이 결과 역시 2.5 A/m<sup>2</sup>의 낮은 전류밀도에서는 전기응집에 의한 효과가 미미했기 때문으로 추정된다. Bound EPS가 감소한 원인으로 전기화학적 산화반응에 의해 플록 내부 EPS가 분해 가능한 화합물로 전환되었을 것으로 추정하는 연구 [27]에 의해 제안된 것처럼 플록 내부의 EPS가 일부 분해되었을 것으로 판단된다. 또는 활성슬러지에 가해진 전류로 인해 플록 주변을 둘러싸고 있던 Bound EPS가 일부 탈착되어 감소한 것으로 추정할 수 있다.

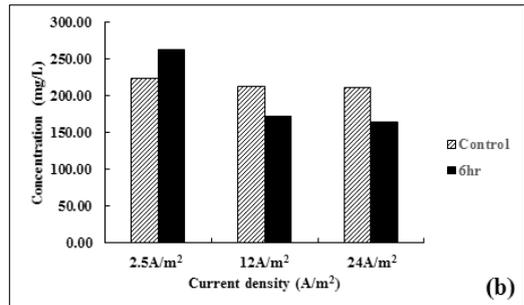
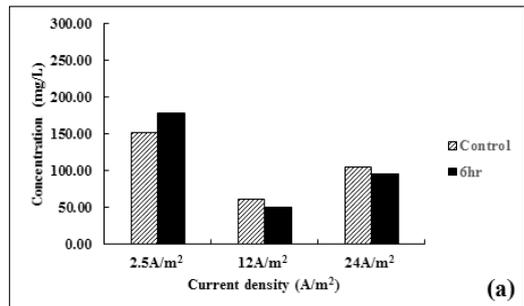


Fig. 5. Variation of Bound EPS concentration by current density; (a) Protein, (b) Polysaccharide

### 3.4 막 여과 플럭스 (Flux) 변화

EC-MBR의 막 여과 성능 가능성을 판단하기 위해 회분식 교반 셀 실험을 통하여 전기응집을 수행한 활성슬러지의 막 여과 플럭스 (flux)를 측정하였다. 전류밀도 조건이 24 A/m<sup>2</sup>인 조건에서 전기응집 후 활성슬러지를 막 여과한 플럭스 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6은 x축을 부피농축도 (Volume concentration ratio, 이하 VCR)로 놓고, y축은 상대플럭스변화율 (normalized flux,  $J/J_{iw}$ ,  $J$  : Sludge flux,  $J_{iw}$  : Initial water flux)로 나타냈다. VCR은 다음 식과 같이 계산된다.

$$VCR = \frac{V_{feed}}{V_{feed} - V_{permeate}}$$

$$V_{feed} = \text{feed volume}$$

$$V_{permeate} = \text{permeate volume}$$

접촉시간이 0 에서 2, 6시간으로 증가할수록 상대플럭스변화율이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 측정 한 플럭스를 직렬여과저항 모델 [28]을 이용하여 여과저항 (Resistance)을 계산할 수 있다. Table 4에 각 전류밀도와 접촉시간에 따른 여과저항 감소율을 정리하였다. 전기응집 접촉시간이 6시간인 경우, 전류밀도가 24 A/m<sup>2</sup>이면 대조군에 비해 여과저항이 61% 감소하였다. 전류밀도 12 A/m<sup>2</sup>에서는 26%, 2.5 A/m<sup>2</sup>에서는 13%가 감소하였다. 접촉시간이 6시간이 아닌 다른 경우에도 전류밀도가 증가하면 여과저항이 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 전기응집의 중요한 운전변수인 전류밀도와 접촉시간이 증가할수록 막 여과 저항이 감소함을 확인할 수 있었다.

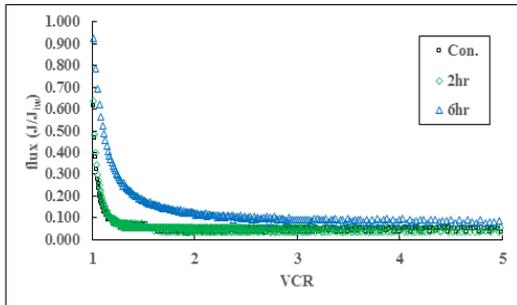


Fig. 6. Flux variation according to VCR under the current density of 24A/m<sup>2</sup>.

Table 4. Reduction of the total fouling resistance over the control ( $R_t/R_0$ )

Current Density (A/m <sup>2</sup> )	Reduction of total fouling resistance over the control ( $R_t/R_0$ ), %		
	Contact time (hr)		
	0	2	6
2.5	-	6	13
12	-	7	26
24	-	13	61

## 4. 결론

본 연구는 전기응집의 주요 운전변수인 전류밀도와 접촉시간을 변화해가며 활성슬러지의 특성이 어떻게 변하는지 관찰하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 활성슬러지에 전기응집을 수행하였을 때, MLSS의 농도는 증가하였으나, 유기물 성분인 MLVSS는 크게 증가하지 않았다. MLSS의 증가는 전기응집으로 인한 불용성 무기물, 즉, Al(OH)<sub>3</sub>와 같은 알루미늄염이 생성되어 발생한 것이다.
- 2) Soluble COD가 최대 48% 가량 감소하였다. 이는 응집과정에서 모 용액의 유기물 성분이 일부 응집되어 감소한 것으로 추정된다. 또한 모 용액의 미생물이 전기적 자극을 받아 슬러지의 활성도가 증가되어 유기물 제거율이 향상된 것으로 판단된다. 반면 TN과 TP는 전기응집 전후에 큰 차이를 보이고 있지 않았다.
- 3) EPS의 경우 Soluble EPS와 Bound EPS 모두 전기응집 후에 감소하는 경향을 보였다. Soluble EPS는 전기응집을 통해 생성된 알루미늄염으로 인해 흡착되어 제거된 것이고, Bound EPS는 전기화학적 산화반응으로 생분해가 잘 되는 화합물로 전환되거나 전류의 영향으로 플록에 붙어있던 Bound EPS가 탈착되어 제거된 것으로 추정된다. 또한, 24 A/m<sup>2</sup>와 12 A/m<sup>2</sup>의 전류밀도 조건에서는 EPS가 감소하여 막 오염 제어에 효과를 주었지만 2.5 A/m<sup>2</sup>의 낮은 전류밀도에서는 전기응집에 대한 효과가 미미하였다.
- 4) 전기응집을 거친 후 막 여과를 수행하여 본 결과, 전기응집을 수행한 슬러지의 막 여과 성능이 대조군에 비해 막 오염 저항 감소율이 최대 61%까지 향상되었음을 확인하였다.

## References

- [1] F. Meng, S. R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H. S. Shin, F. Yang, "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material, Water Research, vol. 43, pp. 1489-1512, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- [2] W. Yang, N. Cicek, J. Ilg, "State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America", Journal of Membrane Science, vol. 270, pp. 201-211, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.07.010>
- [3] Z. Wang, Z. Wu, S. Mai, C. Yang, X. Wang, Y. An, Z. Zhou, "Research and applications of membrane bioreactors in China: Progress and prospect", Separation Purification Technology, vol. 62, pp. 249-263, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.014>
- [4] J. Wu, P. Le-Clech, R. M. Stuetz, A. G. Fane, V. Chen, "Effects of relaxation and backwashing conditions on fouling in membrane bioreactor", Journal of Membrane Science, vol.324, pp. 26-32, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.06.057>
- [5] P. Le-Clech, V. Chen, T. A. G. Fane, "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment", Journal of Membrane Science, vol. 284, pp. 17-53, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.08.019>
- [6] B. R. Lim, K. H. Ahn, K. G. Song, J. W. Cho, "Microbial community in biofilm on membrane surface of submerged MBR: effect of in-line cleaning chemical agent", Water Science Technology, vol. 51, no. 6-7, pp. 201-207, 2005.
- [7] M. F. Siddiqui, M. Rzechowicz, H. Winters, A. W. Zularisam, A. G. Fane, "Quorum sensing based membrane biofouling control for water treatment: A review", Journal of Water Process Engineering, vol. 7, pp. 112-122, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.06.003>
- [8] A. D. Tafti, S. M. S. Mirzaii, M. R. Andalibi, M. Vossoughi, "Optimized coupling of an intermittent DC electric field with a membrane bioreactor for enhanced effluent quality and hindered membrane fouling", Separation Purification Technology, vol. 152, pp.7-13, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.004>
- [9] M. Hunsom, K. Pruksathorn, S. Damronglerd, H. Vergnes, P. Duverneuil, "Electrochemical treatment of heavy metals (Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>, Ni<sup>2+</sup>) from industrial effluent and modeling of copper reduction", Water Research, Vol. 39, pp. 610-616, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.10.011>
- [10] N. Meunier, P. Drogui, G. Mercier, J. F. Blais, "Treatment of metal-loaded soil leachates by electrocoagulation", Separation and Purification Technology, vol. 67, pp. 110-116, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.03.040>
- [11] K. Sadeddin, A. Naser, A. Firas, "Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant", Desalination, vol. 268, pp. 204-207, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.027>
- [12] J. Liu, L. Liu, B. Gao, F. Yang, "Cathode membrane fouling reduction and sludge property in membrane bioreactor integrating electrocoagulation and electrostatic repulsion", Separation and Purification Technology, vol. 100, pp. 44-50, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.08.029>
- [13] B. Zhu, D. A. Clifford, S. Chellam, "Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes", Water Research, vol. 39, pp. 3098-3108, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.020>
- [14] K. Bani-Melhem, M. Elektorowicz, "Development of a Novel Submerged Membrane Electro-Bioreactor (SMEBR): Performance for Fouling Reduction", Environment Science Technology, vol. 44, pp. 3298-3304, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/es902145g>
- [15] M. Ben-Sasson, Y. M. Lin, A. Adin, "Electrocoagulation-membrane filtration hybrid system for colloidal fouling mitigation of secondary-effluent", Separation and Purification Technology, vol. 82, pp. 63-70, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.08.020>
- [16] APHA, AWWA, WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th, pp. 2-53~58, USA, 1995.
- [17] Z. Wang, Z. Wu, S. Tang, "Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor", Water Research, vol. 43, pp. 2504-2512, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.026>
- [18] O. H. Lowry, N. J. Rosebrough, A. L. Farr, R. J. Randall, "Protein measurement with the folin phenol reagent", Journal of Biological Chemistry, vol. 193, pp. 265-275, 1951.
- [19] D. B. Michel, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, F. Smith, "Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances", Journal of Analytical Chemistry, vol. 28, no. 3, pp. 350-356, 1956.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- [20] G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment", Separation and Purification Technology, vol. 38, pp. 11-41, 2004.
- [21] E. Lacasa, P. Canizares, C. saez, F. J. Fernandez, M. A. Rodrig, "Electrochemical phosphates removal using iron and aluminium electrodes", Chemical Engineering Journal, vol. 172, pp. 137-143, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.080>
- [22] J. Liu, L. Liu, B. Gao, F. Yang, "Integration of bio-electrochemical cell in membrane bioreactor for membrane cathode fouling reduction through electricity generation", Journal of Membrane Science, vol. 430, pp. 196-202, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.046>
- [23] J. Zhang, H. C. Chua, J. Zhou, A. G. Fane, "Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors", Journal of Membrane Science, vol. 284, pp. 54-66, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.06.022>
- [24] H. Lin, M. Zhang, F. Wang, F. Meng, B. Q. Liao, H. Hong, J. Chen, W. Gao, "A critical review of extracellular polymeric substances (EPSS) in membrane

- bioreactors Characteristics, roles in membrane fouling a", Journal of Membrane Science, vol. 460, pp. 110-125, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.034>
- [25] S. Ibeid, M. Elektorowicz, J. A. Oleszkiewicz, "Electro-conditioning of activated sludge in a membrane electro-bioreactor for improved dewatering and reduced membrane fouling", Journal of Membrane Science, vol. 494, pp. 136-142, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.051>
- [26] S. Ibeid, M. Elektorowicz, J. A. Oleszkiewicz, "Impact of electrocoagulation of soluble microbial products on membrane fouling at different volatile suspended solids' concentrations", Environmental Technology, vol. 38(4), pp. 385-393, 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2016.1195879>
- [27] L. C. Hua, C. Huang, Y. C. Su, T. N. P. Nguyen, P. C. Chen, "Effects of electro-coagulation on fouling mitigation and sludge characteristics in a coagulation-assisted membrane bioreactor", Journal of Membrane Science, vol. 495, pp. 29-36, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.062>
- [28] H. D., Park, I. S., Chang, K. J., Lee, "Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment", pp.199-203, CRC Press, 2015.

### 엄 세 은(Um-Se Eun)

[준회원]



- 2016년 2월 : 호서대학교 환경공학과 (환경공학 학사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 나노바이오트로닉스학과 재학 중 (환경공학 석사)

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도

### 장 인 성(In-Soung Chang)

[정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 공업화학 과 (공학박사)
- 1997년 2월 : 한화그룹중합연구소 주임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도