

전기장 전처리 및 금속 정밀여과 공정을 이용한 하수처리

Sewage Treatment Using Electric Field Pretreatment
and Metal Membrane Microfiltration Process정 종 태¹⁾ · 김 종 오[†]

Jung, Jongtae · Kim, Jongoh

ABSTRACT : This study was investigated to evaluate the effect of electric fields application for the reduction of membrane fouling, the inactivation of microorganisms and the enhancement of particle coagulation in microfiltration/coagulation. Cumulative permeate in the case with electric field treatment showed high value compared to the case without electric field. Particularly, the increase of HRT (Hydraulic retention time) showed the increase of cumulative permeate as well as the decrease of total resistance. By electric field treatment, the amount of small particle size less than 100 μm is increased and the survival fraction is reduced by the increase of electric field intensity. This may be attributed to the cleavage of particle or cytological destruction resulting from the inactivation of microorganism. Coagulant dosage of PAC compared with no electric field application could also be saved about 75% for the 95% of turbidity removal at 10 kV/cm.

Keywords : Electric field, Microfiltration, Coagulant, HRT, Membrane fouling

요 지 : 본 연구에서는 금속 정밀여과 시스템에 전기장 처리 공정을 적용할 경우 막오염 저감, 미생물 불활성 그리고 응집효과에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 전기장 처리공정을 적용할 경우의 누적투과량은 전기장 처리공정을 적용하지 않은 경우보다 높은 값을 보였다. 특히 수리학적체류시간을 증가시킬 경우 누적투과량 증가뿐만 아니라 총저항 값을 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 전기장 강도를 증가시킬 경우 100 μm 이하의 입자크기를 가지는 입도분포량이 증가했고 미생물 생존 개체수는 감소했다. 이는 입자들의 쪼개짐 현상과 미생물 불활성에 의한 세포 파괴현상 때문이다. 전기장 강도 10kV/cm에서 95%의 탁도 제거율을 비교한 결과 전기장 처리 공정을 적용한 경우가 적용하지 않은 공정보다 약 75%의 응집제 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 전기장, 정밀여과, 응집제, 수리학적체류시간, 막오염

1. 서 론

막분리 공정은 수처리 공정에서 재래식 공정을 대체하여 입자상 물질에서 용존성 염류까지 다양한 오염물질을 제거할 수 있다(정철우 등, 2002). 그중 정밀여과는 고분자 물질이나 바이러스, 콜로이드 등의 용질을 입자의 크기와 막의 세공의 크기 차이에 의해서 용매와 분리하는 공정이다. 정밀여과는 막 세공의 크기에 의해 선택적인 처리가 가능하고 기존의 수처리 공정에 비해 슬러지 발생과 응집제, 소독제 등의 약품 소모량을 줄일 수 있는 장점이 있다(김수한 등, 2003).

그러나 정밀여과(Microfiltration) 공정의 가장 큰 문제점은 막 여과가 진행됨에 따라 발생하는 막 오염(Membrane fouling)에 의해 막 투과유속의 감소를 초래하는 것이다. 막 투과유속의 감소는 막 오염에 의하여 발생하는데 막의

오염은 탁도를 유발하는 현탁 물질과 같은 입자성 물질의 축적, 유기물의 축적, 막 표면에서의 균의 증식, 막 표면이나 내부에서의 철, 망간 등의 산화에 의해서 일어난다(김규진, 1995; Cho 등, 1999). 따라서 막 오염 제어를 위한 적절한 전처리 공정이나 새로운 처리 기술의 개발이 필요하다(Hanna 등, 1999).

최근 전기장 처리 공정이 막 표면의 케이크 층 형성을 감소시킬 뿐만 아니라 막 투과유속을 증가시킨다는 연구 결과가 몇몇 연구가들에 의해 보고되었다(Akay 등, 1997; Gordon 등, 2004; Hanna 등, 1999). Hanna 등(1999)은 십자흐름 막 여과 시스템을 이용하여 오일 폐수 처리시 발생하는 막 오염 제어를 위해 외부 전기장을 적용시켰으며 그 결과 막 투과유속이 향상된다고 보고하였다. Gordon 등(2004)은 Oxide-CMP 폐수처리를 위해 십자흐름 정밀여과 시스템을 적용시킨 결과, 전기장 강도가 증가할수록 여과

1) 정희원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

† 정희원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail : jokim@kangnung.ac.kr)

속도가 증가한다고 보고하였다. 또한 Pramod 등(2005)은 *Cryptosporidium parvum* 제거를 위해 외부 전기장 시스템을 적용하였으며 오미영 등(2001)과 김영관 등(2000)은 매립지 침출수의 유기물 제거와 염색폐수 처리를 위해 전기 응집을 적용하였다.

또한 정밀여과 공정에서 입자와 입자 또는 입자와 막 표면의 전기 화학적 상호작용력은 중요한 역할을 한다. 전기 화학적 상호작용력에 대한 pH와 염 농도가 막 투과유속에 미치는 영향에 관해서는 많은 연구자들의 연구에 의해 보고되었다. Hoogland 등(1990)은 alumina 정밀여과 막에 의해 분리된 silica 입자의 투과유속은 pH가 높을수록 증가한다고 보고 하였다. Hunter(1981)는 전하를 띤 silica 입자가 고분자막에 부착됨에 따라 나타나는 농도분극 저항과 입자의 zeta potential 값의 관계를 규명하였으며, 농도분극 저항은 입자의 zeta potential 값이 증가할수록 감소하는 것으로 보고되었다.

따라서 본 연구에서는 금속 정밀여과 공정의 처리효율을 향상시키기 위해 전기장 처리공정을 적용시켰으며 실험인자에 대한 처리특성을 실험적으로 검토하였다. 또한 전기장 처리 공정이 응집 및 미생물 불활성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 이용한 전기장 처리 시스템의 개요도(a) 및 금속막의 실사진과 내부단면도(b)를 Fig. 1에 나타내었다. 모델 Innoclean-L4V인 전기장 장치는 반응기 길이: 40cm, 직경: 25mm, 반응기 내부 용량은 180mL이며 전압변화를 0-40kV로 변화시킬 수 있다. 실험에 사용한 금속 막의 재질은 스테인리스 스틸(SUS 316L)이며 서로 조직이 다른 여러 겹(5겹)의 sheet를 소결 열처리하여 접합을 시킨 media로서 사용 중 각 sheet가 분리되지 않도록 특수 접합 가공되어 기존 유기 막에 비해 높은 기계적 강도와 우수한 내열성·내식성을 지니며 고온·고압의 환경 하에서 사용이 가능한 장점을 지닌 여과매체이다. 금속 막의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of metal membrane

Type	Tubular
Material	Stainless steel (SUS 316L)
Nominal pore size	1 μm
Size	D 14 × L 220 (mm)
Area	97 cm ² /unit
Maker	Fibertech Co., Ltd. Korea

전기장 처리용 시료는 Kn시 하수종말처리장의 유입하수를 사용하였으며 전기장 강도 및 수리학적 체류시간에 대한 원수 수질특성을 Table 2에 나타내었다. 원수의 수질은 채수시기에 따라 약간의 수질의 차이가 있기 때문에 3회 평균값으로 나타내었다. 제타전위의 경우 유입유량 6.5L/hr로 120분 처리 후 Zeta potential analyzer로 분석하였다. 일

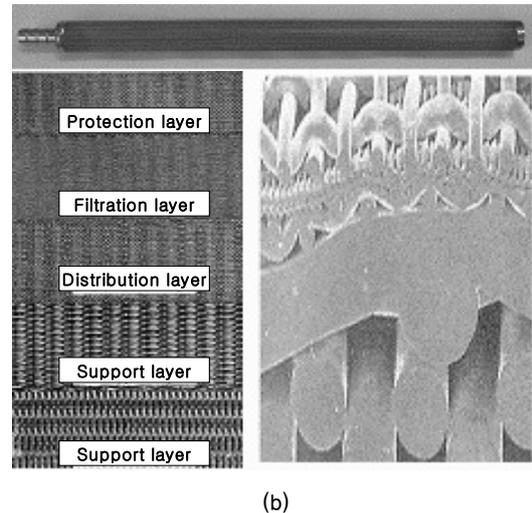
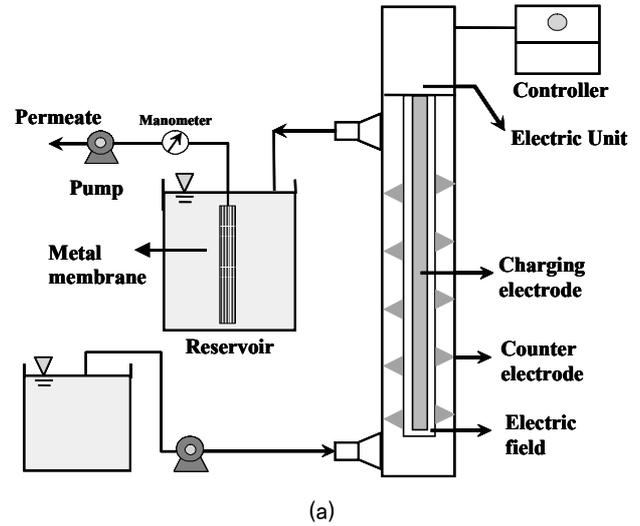


Fig. 1. Schematic diagram of electric fields system (a) and metal membrane (b)

Table 2. Water quality of fresh sewage

Parameter	Values	
	Ranges	Average
pH	6.5-7.1	6.8
COD _{Cr} (mg/L)	110-118	114
BOD ₅ (mg/L)	85-93	89
SS (mg/L)	190-210	200
T-P (mg/L)	33-37	35
T-N (mg/L)	4.8-5.2	5
Turbidity (NTU)	163-198	180.5

반세균 측정은 Petrifilm™(3M, USA)을 이용하여 측정하였으며 배양온도는 35°C로 유지하고 24-48시간 배양하여 측정하였다.

전기장 처리 공정이 응집효과에 미치는 영향을 평가하기 위한 응집실험은 급속교반과 완속교반을 거친 후 MF 금속 막 여과에 적용하였다. 실험에 사용된 응집제로는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 PAC(Poly aluminium chloride)을 사용하였으며, 응집제 주입량은 0-80mg/L로 변화시켜 응집실험을 수행하였다. 응집실험은 표준형 jar-test 장치를 이용하였다. Jar-test는 시료 1L에 대하여 급속혼합 230rpm($G=162\text{sec}^{-1}$ at 20°C)에서 2분, 완속교반은 60rpm($G=22\text{sec}^{-1}$ at 20°C)에서 5분, 20rpm($G=4\text{sec}^{-1}$ at 20°C)에서 10분으로 2단 완속교반하였으며, 완속교반 후 침전시간은 30분으로 하였고 침전 후 상정액을 수표면 밑 6cm 지점에서 채취하였다(김운영 등, 2001). SEM(Scanning electron microscope) 측정은 상기의 응집실험 조건과 유입유량 6.5L/hr로 6시간 전기장 강도 20kV/cm로 처리한 후 24시간 자연건조시켜 SEM 측정장비로 측정하였다. 응집실험 및 금속 막 여과실험으로부터 얻어진 처리수의 수질분석

항목 및 분석방법(장치)을 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기장 강도의 영향

전기장 강도를 0-40kV/cm로 변화시킬 경우 막 투과유속(a) 및 저항값(b)에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 전기장 처리한 경우가 하지 않은 경우보다 초기 막 투과유속은 높고 저항값은 낮은 것으로 나타났다. 또한, 전기장 강도 10kV/cm에서 보다 40kV/cm로 증가시킬 경우 막 투과성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 전기장 강도 10kV/cm와 40kV/cm의 막투과유속은 생하수의 막투과유속보다 초기운전 10분 동안 각각 1.2배와 1.6배, 운전 40분 동안 각각 1.7배와 2.7배 높은 막 투과성능을 나타내었다. 또한 운전 40분 동안의 저항값 비교 결과 생하수에서의 저항값보다 각각 2배와 3배 낮은 값을 보였다. Fig. 3은 전기장 강도를 0-40kV/cm로 변화시킨 경우의 수질분석 결과이며 전기장 강도가 증가할수록 SS, 탁

Table 3. Analytic items and methods

Items	Methods or device
BOD ₅	Standard method, 5-day BOD test
COD _{Cr}	Standard method (Hach DR 2010)
Suspended solids (SS)	Glass fiber, Whatman GF/C
T-N	In-line UV/persulfate digestion and oxidation method (UV Spectrometer jena SPECORD 50)
T-P	Perchloric acid with vanadomolydo phosphoric acid method (UV Spectrometer jena SPECORD 50)
Turbidity	(Turbidity meter, model turb 550 IR)
Particle size	(LS 230 particle size analyzer, Beckman Coulter Co., USA)
Scanning electron microscope (SEM)	(S-4200, Hitachi, Japan)
Zeta potential	(ELS-8000, Otsuka, Japan)
pH	(MP 120-pH meter, Schwerzenbach, Switzerland)

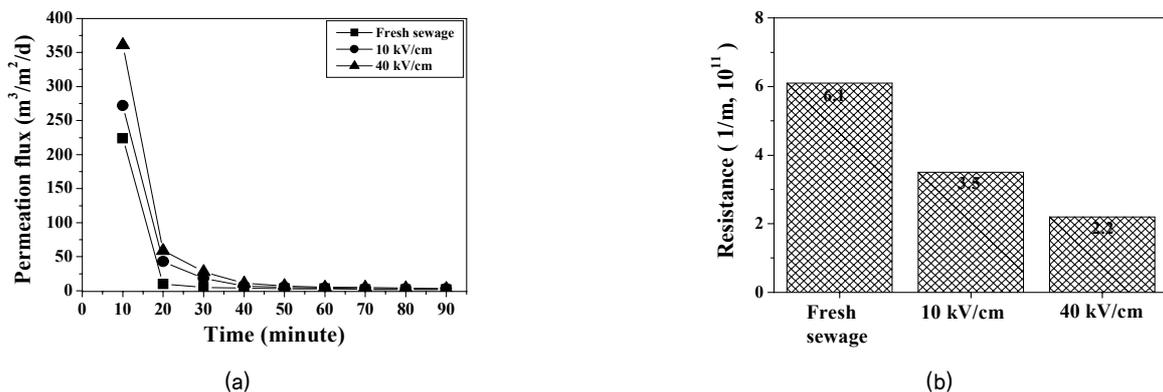


Fig. 2. The relationship between electric field intensity and permeation flux (a) and resistance (b) {Conditions: feed flow rate 19.6 L/hr, trans-membrane pressure (TMP) 34 kPa, pH 6.5}

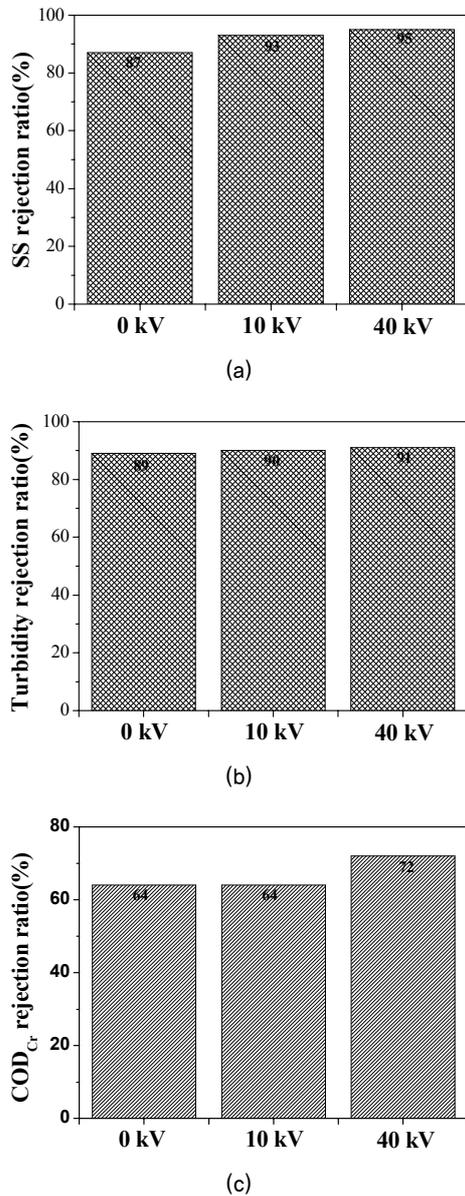


Fig. 3. The relationship between electric field intensity and SS (a) and turbidity (b) and COD_{Cr} (c) [Conditions: feed flow rate 19.6 L/hr, trans-membrane pressure (TMP) 34 kPa, pH 6.5]

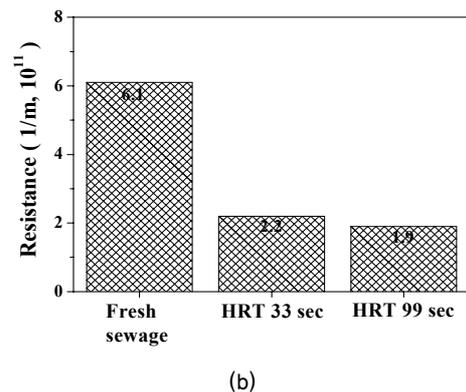
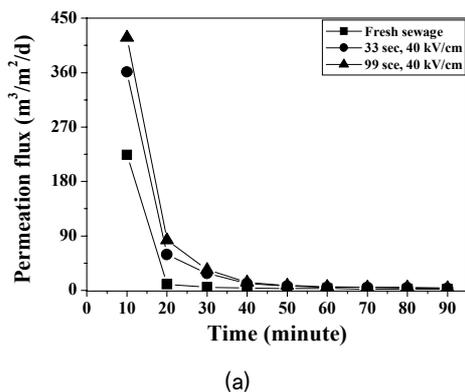


Fig. 4. The relationship between HRT and permeation flux (a) and resistance (b) [Conditions: electric field intensity 40 kV/cm, trans-membrane pressure (TMP) 34 kPa, pH 6.4]

도 그리고 COD_{Cr} 제거율이 증가하는 것으로 나타났다. 전기장 강도 40kV/cm에서 SS, 탁도 그리고 COD_{Cr} 제거율은 각각 95%, 91%, 72%였다. 오미영 등(2001)의 전기응집을 이용한 매립지 침출수 처리에 따르면 전류밀도를 증가시킨 결과 40%의 COD 제거 및 80%의 높은 SS 제거율을 보고하고 있다.

수중에서 입자의 안정성과 불안정성은 표면전하량 밀도 (Bound layer charge density)가 중요한 역할을 한다. (-)전하로 하전 된 입자는 안정하게 되나 (+)전하가 표면에 붙게 되면 입자의 (-)전하가 중화되어 입자끼리 중화하는 현상(Coagulation)이 나타나게 된다. 따라서 본 연구의 전기장 처리 시스템은 이러한 원리를 이용하여 막 표면에서 입자의 흡착을 방지하여 동일운전 압력 하에서 높은 막 투과 성능을 얻을 수 있다. 또한 foulants 입자의 표면전하량을 감소시켜 입자들 간의 응집현상으로 인한 기공 막힘 방지 효과 때문에 전기장 처리 한 경우가 하지 않은 경우보다 더 높은 막 투과 성능을 나타낸 것으로 판단된다. Gordon 등(2004)은 전기장 강도가 증가할수록 입자들간의 인력이 크게 작용하여 분리막의 저항 감소와 막투과유속이 증가와 하는 것으로 보고했지만 임계 전기장 강도보다 오히려 더 높은 전기장 강도를 적용할 경우 역효과를 보고했다.

3.2 수리학적 체류시간(HRT, Hydraulic retention time)의 영향

전기장 처리시 수리학적 체류시간(HRT)이 금속 막 투과 특성에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)의 실험결과에서, 실제 유입하수에 전기장 처리 한 경우가 전기장 처리 하지 않은 경우보다 더 높은 막투과유속을 나타냈으며 반응조 내에서 수리학적 체류시간을 33sec에서 99sec로 변화시킨 결과 수리학적 체류시간 99sec의 초기 막투과유속이 33sec의 초기 막투과유속보다 높게 나타났다. 또한

수리학적 체류시간에 따른 저항값(b)을 측정된 결과 운전 시간 40분에서의 수리학적 체류시간 33sec와 99sec의 저항값은 실제 유입하수 처리의 저항값보다 각각 2.8배와 3.2 배 정도 감소하였고 수리학적 체류시간이 증가할수록 저항값이 감소하는 특성을 보였다. 따라서 실제 하수처리에 전기장 처리 공정을 적용할 경우 반응기 내에서 충분한 접촉시간(수리학적 체류시간)을 가지는 것이 표면 전하량 감소로 인한 입자들의 응집을 촉진시켜 막 내부저항을 감소시키고 막 투과성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

3.3 pH의 영향

Fig. 5는 pH 변화에 따른 투과량의 변화를 나타낸 실험 결과이다. pH 조절은 0.1N HCl과 0.1N NaOH를 이용하여 4, 8 그리고 10으로 변화시켜 실험하였다. Fig. 5의 실험결과를 살펴보면 동일 pH에서 전기장 처리 한 경우가 처리하지 않은 경우보다 더 높은 투과량을 나타내었다. 또한 pH 8에서의 투과량은 전기장 처리 한 경우와 하지 않은 경우 모두 pH 4와 pH 10에서의 것보다 더 높은 투과특성을 나타내었다. 금속 막 표면의 제타전위는 pH 5-9사이에

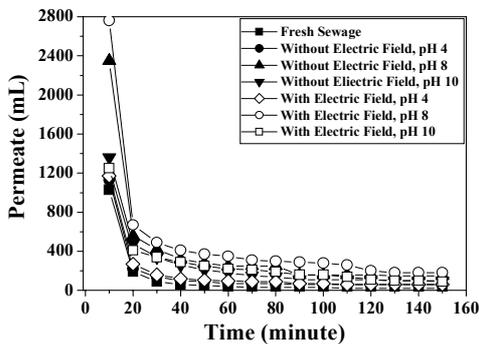
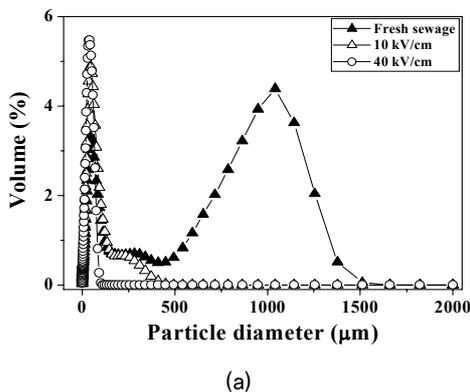
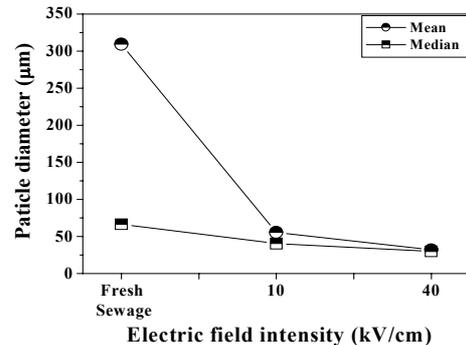


Fig. 5. Relationship between pH and permeate with time passage (Condition: electric field intensity 10 kV/cm, trans-membrane pressure 34 kPa, flow rate 12 L/hr, SS 168 mg/L)



(a)



(b)

Fig. 6. The particle size distribution with electric field intensity (a) and the values of mean and median sizes (b) (Conditions: flow rate 21.6 L/hr, pH 6.5, Turbidity 113 NTU, SS 98 mg/L)

서 약 $-0.5 \sim -0.2\text{mV}$ 값을 갖는다. 대상 시료에 전기장 처리할 경우 중성영역에서는 전기장 처리시 방출된 자유전자에 의해 입자들은 안정화되어 분리막 표면에 입자의 흡착을 방지하게 된다. 그러나 대상시료의 pH가 산과 알칼리로 바뀔 경우 금속막 표면 주변은 +전하와 -전하로 둘러쌓이게 된다. 따라서 금속막 표면에 둘러싸인 입자들의 침전속도는 중성영역에서의 것보다 산과 알칼리 영역에서 더 빠르게 진행되어 투과량이 감소한 것으로 판단된다.

3.4 입도분포도와 미생물 불활성의 변화

생하수에 전기장 처리 공정을 적용 할 경우 하수 내 입도 분포도에 대한 영향을 Fig. 6, 미생물 생존 개체수의 변화에 대한 실험결과를 Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 6에서 생하수의 입도 분포량을 측정된 결과 $10\mu\text{m}$ 이상의 입자크기를 가지는 입도분포량은 약 92%였고 평균과 중간값 입자크기는 각각 $312.5\mu\text{m}$ 와 $74.3\mu\text{m}$ 값을 보였다. 생하수의 $100\mu\text{m}$ 이상의 입자크기를 가지는 입도분포량은 60%인 반면에 전기장 처리 공정을 적용할 경우 10kV/cm 전기장 강도에서 $100\mu\text{m}$ 이상의 입자크기를 가지는 입도분포량은 약 13%, 40kV/cm 의 경우 약 0.1%인 것으로 나타났으며 전기장 강도가 증가할수록 $100\mu\text{m}$ 입자크기 이하의 입도분포량이 증가하는 특성을 보였다. 또한 40kV/cm 전기장 강도 처리시 평균과 중간값 입자크기는 각각 $32.2\mu\text{m}$ 와 $30\mu\text{m}$ 값을 보였으며 생하수의 평균과 중간값 입자크기보다 각각 10배와 2.5배 정도 작은 입자크기였다. Fig. 7은 전기장 강도 10kV/cm 에서 30분 전기장 처리 후 미생물 생존 개체수의 변화를 나타낸 실험결과이다. Fig. 7의 실험결과에서 전기장 처리 전 미생물의 개체수는 $3.5 \times 10^5 \text{N/mL}$ 이며 전기장 처리 후 전기장 강도 10kV/cm 와 40kV/cm 의 미생물 생존 개체수는 각각 $8.4 \times 10^4 \text{N/mL}$ 와 $5.3 \times 10^4 \text{N/mL}$ 로 나타났다. 이와 같이 전기장 처리시 입자크기가 작은 영역

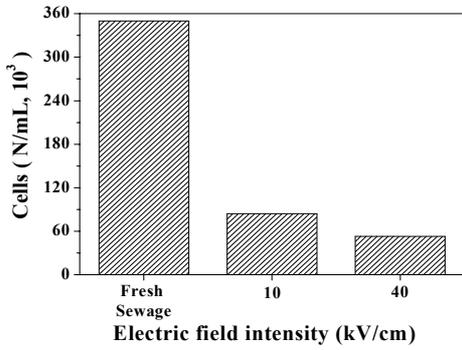


Fig. 7. The variation of bacteria survival fraction with respect to time at 10 kV/cm (Conditions: flow rate 21.6 L/hr, pH 6.5, contact time 30 minute, Turbidity 94 NTU, SS 81 mg/L)

으로 입도분포량이 증가하는 것은 하수 내에 존재하는 입자들의 쪼개짐 현상과 미생물 불활성에 의한 세포 파괴현상 때문인 것으로 판단된다.

3.5 응집 효과

생하수에 전기장 처리 공정 적용시 응집효과에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과를 Fig. 8, Fig. 9 그리고 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 8은 전기장 강도에 따른 하수 내 입자의 제타전위를 나타낸 결과이다. 금속 막 표면의 제타전위는 pH 5-9사이에서 약 -0.5~0.2mV의 제타전위 값을 나타내었다. 하수 내 입자의 제타전위는 전기장 강도가 증가함에 따라 제타전위 값도 증가하였으며 이는 응집 공정에 전기장 처리 공정 적용시 응집효과 향상에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Fig. 9는 각각의 전기장 강도에서 응집제 주입량 변화에 따른 탁도 제거효율을 나타낸 실험 결과이다. 전기장 강도 10kV/cm에서 95%의 탁도 제거율을 비교한 결과 전기장 처리 공정을 적용한 경우가 하지 않은 공정보다 적은 응집제 주입량으로 95%의 탁도 제거율을 나타냈으며 약 75%의 응집제 절감효과가 있는 것으

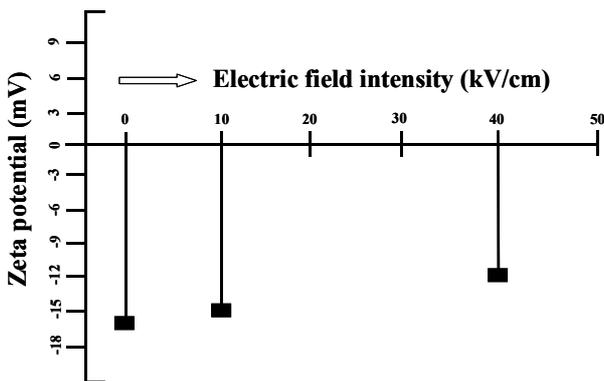


Fig. 8. The variation of zeta potential of particle with respect to electric field intensity (Conditions: flow rate 19.6 L/hr, pH 6.5, Turbidity 78 NTU, SS 54 mg/L)

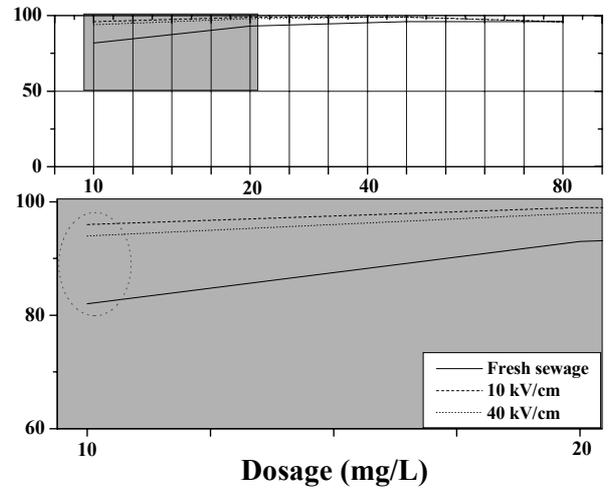


Fig. 9. Relationship between turbidity removal and PAC dosage at different electric field intensity (Conditions: flow rate 21.6 L/hr, pH 6.5, Turbidity 121 NTU, SS 103 mg/L)

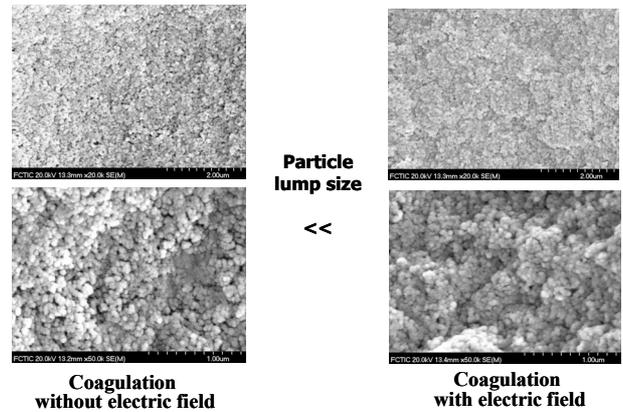


Fig. 10. SEM images with respect to without and with electric field (Conditions: flow rate 6.5 L/hr, pH 7.2, electric field intensity 20 kV/cm, PAC 20 mg/L, Turbidity 148 NTU, SS 122 mg/L)

로 나타났다. Fig. 10은 전기장 처리 유무에 따른 입자들의 응집에 대한 SEM 사진을 나타낸 결과이다. SEM 사진 분석 결과 전기장 처리한 경우가 처리하지 않은 경우보다 더 큰 입자 덩어리를 형성하는 것으로 나타났다. 이와 같이 폐수처리에 전기장 처리 공정을 적용할 경우 응집효과를 개선시키므로 응집제 주입량 절감에 따른 경제적인 측면 뿐만 아니라 제거효율 측면 모두 크게 향상 시킬 것으로 판단된다.

4. 결 론

금속 정밀여과 공정의 처리효율을 향상시키기 위해 전기장 처리 공정을 적용하여 실험인자에 대한 처리특성을 실험적으로 검토하였으며 또한 전기장 처리 공정이 응집 효과 및 미생물 불활성에 미치는 영향을 평가한 결과 다음

과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 생하수에 전기장 처리 공정을 적용할 경우 초기 누적 투과량 향상뿐만 아니라 총 저항값을 감소시키는 것으로 나타났으며 또한 반응기 내에서 충분한 접촉시간 (HRT)을 가지는 것이 막 투과성능을 향상시키는 것으로 나타났다.
- (2) 전기장 처리 공정 적용시 전기장 강도가 증가할수록 입자크기가 작은 영역의 입도분포량이 증가하는 것으로 나타났으며 미생물 생존 개체수는 40% 미만인 것으로 나타났다.
- (3) 생하수에 전기장 처리 공정 적용시 응집효과에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과 전기장 강도가 증가할수록 제타전위 값이 증가하였으며 또한 응집공정에 전기장 공정 적용은 응집제 주입량 절감에 따른 경제적인 측면뿐만 아니라 제거효율 측면 모두 크게 향상시키는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 R&D 클러스터 구축사업(No. RTI 05-01-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김규진(1995), 분리막을 이용한 정수 및 폐수처리, *대한환경공학회지*, Vol. 17, No. 5, pp. 413~420.
2. 김수한, 박희경(2003), Crossflow 방식 응집-정밀여과 공정의 케이크층 저감 메커니즘, *J. of the korean society of water and wastewater*, Vol. 17, No. 4, pp. 519~527.
3. 김윤영, 최상준, 이주동, 이석훈, 주득중(2001), PAC-Polyamine 계 고분자 혼합응집제의 상수처리 특성, *대한환경공학회 2001 춘계학술연구발표회*, pp. 11~12.
4. 김영관, 오미영(2000), 전기응집을 이용한 염색폐수의 처리, *대한환경공학회지*, Vol. 22, No. 8, pp. 1429~1436.
5. 오미영, 김영관(2001), 전기응집에 의한 매립지 침출수의 유기물 제거 특성, *대한환경공학회지*, Vol. 23, No. 1, pp. 31~38.
6. 정철우, 김효진, 강임석(2002), 응집공정과 UF공정을 이용한 상수원수내 유기물질의 제거, *J. of KSEE*, Vol. 24, No. 5, pp. 927~937.
7. Cho, J. W., Amy, G. and Pellegrino, J.(1999), Membrane filtration of natural organic matter : Initial comparison of rejection and flux decline characteristics with ultrafiltration and nanofiltration membranes, *Water Res.*, Vol. 33, No. 11, pp. 2517~2526.
8. Akay, G. and Wakeman, R. J.(1997), Electric field enhanced crossflow microfiltration of hydrophobically modified water soluble polymer, *Journal of Membrane Science*, Vol. 131, pp. 229~236.
9. Gordon C. C. Yang and Tsung-Yin Yang(2004), Reclamation of high quality water from treating CMP wastewater by a novel crossflow electrofiltration/electrodialysis process, *Journal of Membrane Science*, Vol. 233, No. 1-2, pp. 151~159.
10. Hanna M. Huotari, Ingmar H. Huisman and Gun Tragardh (1999), Electrically enganced crossflow membrane filtration of oily wastewater using membrane as a cathode, *Journal of Membrane Science*, Vol. 156, No. 1, pp. 49~60.
11. Hoogland, M. R., Fane, A. G. and Fell, C. J. D.(1990), The effect of pH on the cross-flow filtration of mineral slurries using ceramic membrane, 1st ed., Trans. Tech. Publications, Montpellier.
12. Hunter, R. J.(1981), Zeta potential in colloid science, principles and applications, Academic Press, London.
13. Pramod Kulkarni, Gabriel Dutari, David Weingeist, Avner Adin, Roy Haught and Pratin Biswas(2005), Capture of water-borne colloids in granular beds using external electric fields: improving removal of *Cryptosporidium parvum*, *Water Research*, Vol. 39, No. 6, pp. 1047~1060.

(접수일: 2007. 6. 11 심사일: 2007. 6. 22 심사완료일: 2007. 9. 12)