

고전압 임펄스를 적용한 막분리 공정에서의 생물막 오염 제어에 관한 연구

(A Study on the Biofouling Control in Membrane Processes Using High Voltage Impulse)

이주훈* · 김준영 · 이진우 · 이준호 · 장인성**

(Ju-Hun Lee · Jun-Young Kim · Chin-Woo Yi · June-Ho Lee · In-Soung Chang)

Abstract

Although membrane technologies are widely applied to the water and wastewater treatment processes, strategy for the control of membrane biofouling is strongly required. In this study, a possibility of control of membrane biofouling using HVI(High Voltage Impulse) was verified based on the inactivation of microorganisms by the HVI. The HVI system was consisted of power supply, voltage amplifier, impulse generator and disinfection chamber and the model microorganism was E. coli. When 15[kV/cm] of electric fields was applied to the E. coli solution, inactivation of the microorganism was found. A possibility of the control of membrane biofouling using HVI was verified with experiments of membrane filtration with and without exposure of the HVI to biomass solution. Another membrane filtration experiments with the contaminated membranes by E. coli solution were carried out and indicate that the HVI could be used as an alternative method for membrane biofouling control. A series of simulation of the electric fields between electrodes and microorganisms was carried out for the visualization of the disinfection that showed where the electric fields are formed.

Key Words : Biofouling, Electric Fields, High Voltage Impulse, Membrane Separation

1. 서 론

1.1 연구의 배경

현재 상수원 수질관리 및 수질 개선을 위해 하수처리장을 신설 또는 개량하는 하수도 시설 확충사업들이 진행되고 있다. 아울러 수질기준과 유해세균들에 대한 규제가 지속적으로 강화되고 있다. 그러나 기존의 처리시설이나 재래식 공법으로는 강화되는 규제에 대처하기에는 한계가 있다. 특히 하수관거가 부족한

* 주저자 : 호서대학교 환경공학과 석사
** 교신저자 : 호서대학교 환경공학과 교수
Tel : 041-540-5744, Fax : 041-540-5748
E-mail : cis@hoseo.edu
접수일자 : 2011년 8월 8일
1차심사 : 2011년 8월 11일
심사완료 : 2011년 9월 6일

상수원 지역의 경우에는 지역단위의 소규모 처리시설의 도입이 필수적이어서 안정적이고 양호한 처리수질 확보와 함께 공정이 간편하고 무인화 및 자동화가 가능한 시스템의 구성이 요구된다.

분리막 기술은 고-액 분리가 완벽하여 양호한 처리수질을 확보할 뿐만 아니라 기존 시설에 비해 유지관리가 수월한 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 분리막 표면에 생성된 생물막 형성으로 인한 분리막 오염은 막간차압(TMP, Trans Membrane Pressure) 증가와 처리용량 감소로 인해 분리막 적용의 한계점으로 작용하고 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 화학적 세정을 수행하는 것이 보통이지만 분리막의 수명을 단축시키고 2차 오염물질이 발생하는 등 근본적인 해결 방법으로는 다소 부족하며 새로운 막오염 제어방법이 필요하다. 식품 산업에서 응용하고 있는 고전압 임펄스(HVI, High Voltage Impulse) 장치는 가열식 살균방법이 아닌, 두 전극 사이의 높은 전계와 짧은 펄스 간격으로 처리대상 물질의 향기와 영양성분 등은 보존한 채 미생물을 사멸 혹은 불활성화 시키는 공정이다. 이는 두 전극 간에 수만 볼트 이상의 전압을 순간적으로 인가하여 세포막 사이에 일정 이상의 전위차를 발생시켜 세포의 비가역적 전기적천공(irreversible eletroporation)을 유도하여 세포 내의 단백질과 DNA 등의 유실을 유도해 미생물을 사멸시킬 수 있는 방법이다[2-4].

이러한 HVI 처리 기술에 의한 미생물 불활성화에 영향을 미치는 주요 인자들로는 전기장(electric field)의 세기, 인가시간, 처리온도, 초기 균체 수, 펄스 수 그리고 펄스 폭 등이 알려져 있다[5-10]. 이러한 인자들 중에서도 전기장 세기와 인가시간이 미생물 사멸 효과에 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며[11-12], 펄스의 모양이나 형태에 따라서도 사멸효과에 큰 차이가 발생한다는 결과들이 보고된 바 있다[13-14]. 이를테면 oscillatory pulse가 살균 효과가 가장 낮으며, exponential decay pulse 보다는 square wave pulse가 살균 효과가 높은 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 식품산업에서 활용하고 있는 HVI 공정을 수처리용 분리막 공정에 적용하여 미생물을 불

활성화시킴으로써 분리막 표면의 생물막 형성을 억제하거나 또는 생물막으로 이미 오염된 분리막을 세정하는 방법으로 사용 가능한지에 대한 타당성을 확인하고자 하였다. 궁극적으로는 HVI 처리 기술이 수처리 공정에서 발생하는 막 오염 제어에 활용될 수 있는지를 평가하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험재료 및 분석방법

2.1 실험재료 및 방법

일반적으로 대장균은 병원균에 비해 물속에서 오래 생존하며 소독에 대한 저항력이 강하고, 검출하기 쉬우며 검사방법이 간단하다. 따라서 대장균의 검출로 병원성 미생물에 의한 오염을 판단할 수 있기 때문에 병원성 미생물의 존재 유무를 판정할 때 대장균을 지표 미생물로 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대장균을 생물막 오염의 대상 미생물로 사용하였다.

실험에 사용된 대장균(ATTC 8739)은 한국종균협회(Korean Culture Center of Micro-organism, KCCM)로부터 분양받았으며, 대장균 균주를 121[°C]에서 15분간 멸균된 Nutrient broth(DIFCO, USA) 용액에 30[°C]에서 24시간 동안 배양하였다. 배양된 액체 배지는 대장균의 농도가 높아 멸균된 0.85[%] 식염수(NaCl) 용액으로 적절히 희석하여($10^5 \sim 10^6$ [CFU/ml]), 매 실험마다 새로 제조하여 실험에 사용하였다. HVI 인가에 따른 대장균의 사멸율을 관찰하기 위해 희석된 시료를 살균 처리조에 채운 후, HVI를 인가하면서 매 10분마다 대장균을 1[ml]씩 분취하여 Compact dry(Lot No. 084610, Nisuii pharmaceutical Inc., Japan) 배지에 접종시켰다. 접종된 배지는 30[°C]에서 24시간동안 인큐베이터에서 배양하였고, 24시간 후 배지에 생성된 파란 집락을 계수하여 그 사멸율을 판단하는 자료로 사용하였다.

2.2 HVI 장치

실험에 사용된 고전압 임펄스(HVI) 장치는 전원부,

고전압 증폭기, 임펄스 발생장치, 그리고 살균 처리조로 그림 1과 같이 구성되어 있다.

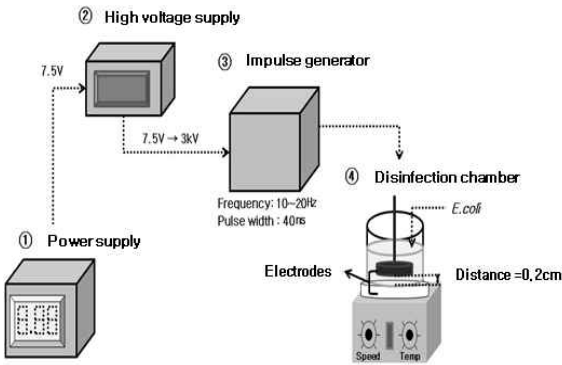


그림 1. HVI 실험장치
Fig. 1. Schematic diagram of HVI system

전원부에서 나온 7.5[V]의 전압을 고전압 증폭기를 이용하여 3[kV]로 승압시킨 후 임펄스 발생장치를 거쳐 임펄스 폭과 주파수를 각각 40[ns]와 10[Hz]인 펄스전압을 발생시켜 살균처리조에 인가하였다. 대장균을 사멸시키기 위한 살균처리조의 직경과 높이는 각각 120[mm]와 60[mm]이며, 처리 용량은 180[mL]이다. 또한 살균처리조에 사용된 전극은 70[mm]의 직경을 가지는 stainless steel을 사용하였으며, 침지된 전극의 간격은 0.2[cm]로 고정시킨 후 실험을 진행하였다. 이 때 대조군과 비교를 위하여 다양한 전계세기를 인가하면서 기초 실험들이 진행되었으며, 대조군과 뚜렷한 차이를 보였던 10과 15[kV/cm]의 전계세기가 분리막 여과와 세정효과 실험에 적용되었다.

2.3 분리막 연속 여과 실험

HVI 처리 기술을 이용해 대장균에 의한 막오염 제어 가능성을 평가하기 위해 연속식 여과 실험을 수행하였다.

그림 2에 도식된 것처럼 시료를 살균처리소에서 15분 동안 총 3회에 걸쳐 반응시킨 후 연속식 여과 시스템(Lab-scale Tangential Flow Filtration System, Amicon, USA)에 유입시키면서 막오염을 유도하였다. 여과된 샘플의 양은 총 450[mL]이었으며, 분리막을

통과한 유출수는 시간에 따른 플럭스(Flux, L/m² · h) 변화를 관찰하기 위해 전자저울로 그 무게를 측정하면서 컴퓨터를 이용해 데이터를 수집하였다. 이 때 여과시간 경과에 따른 막오염의 변화는 다음 (1)식과 같이 부피농축도(VCR, Volume concentration Ratio)에 따른 플럭스 변화율로 나타내었다.

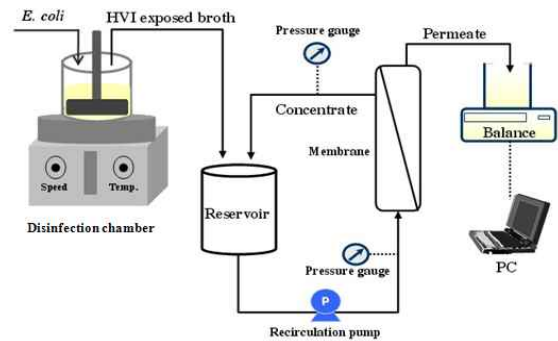


그림 2. 연속식 여과 교차 실험 장치
Fig. 2. Schematic diagram of TFF(Tangential Flow Filtration) system

$$VCR = \frac{V_{\text{feed}}}{V_{\text{concentrate}}} = \frac{V_{\text{feed}}}{V_{\text{feed}} - V_{\text{permeate}}} \quad (1)$$

이 때 V_{feed} : feed volume, $V_{\text{concentrate}}$: concentrate volume, V_{permeate} : permeate volume

실험에 사용된 분리막은 Biomax-5(Amicon, USA)로 분획분자량이 5[kDalton]인 한외여과막(Ultra-filtration membrane)이었다.

2.4 HVI를 이용한 오염된 분리막의 세정효과

대장균 시료로 오염된 분리막을 HVI로 처리하였을 때 어느 정도 플럭스가 회복이 되는지 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 초순수를 이용해 분리막의 초기 물플럭스(J_{iw})를 회분식 여과장치(stirred batch filtration cell, Amicon 8200, USA)를 이용하여 측정 한 후, 대장균이 배양된 액체배치를 멸균된 0.85[%] 식염수로 희석하여 운전 초기의 균체수를 약 105[CFU/mL]로 유지하고, 다시 회분식 여과장치를 이용하여 플럭스 (J)를 측정하였다. 여과가 종료된 후

분리막은 별도의 세척과정 없이 여과 셀 안에 다시 초순수를 채우고 세정 전 최종물플럭스(J_{fw} before HVI)를 측정 후, 바로 HVI에 의한 세정효과를 관찰하기 위해 오염된 분리막을 살균처리조에 침지시켜, 20[kV/cm] 전계세기에서 15분 동안 고전압을 인가하였다. 그 후 분리막을 살균처리소에서 꺼낸 후 다시 회분식 여과장치에 고정시킨 후, 초순수를 이용해 최종물플럭스(J_{fw} after HVI)를 측정하였다. 이러한 방법으로 측정된 플럭스 값은 초기 물플럭스에 따른 상대 플럭스 변화로 나타내어 HVI 처리의 유/무에 따른 분리막의 세정효과를 알아보려고 하였다. 실험에 사용된 분리막은 YM30(Amicon, USA)으로써, 친수성 재질인 regenerated cellulose로 분획분자량은 30 [kDalton]인 한외여과막이다.

2.5 전계 영향 시뮬레이션

전자기장 현상은 맥스웰 방정식으로 표현 가능하나 전자기 현상들은 벡터량을 포함하고 있기 때문에 변수가 많아질 경우 해석하기 어려운 점이 있다. 또한 전계가 미생물에 미치는 영향을 정량적으로 표현하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구서에는 시뮬레이션 프로그램인 “전자장해석나라(Jaewoo Electronics Co. Ltd, Korea)”를 통하여 전계가 미생물에 미치는 영향을 시각적으로 검토하고자 하였다.

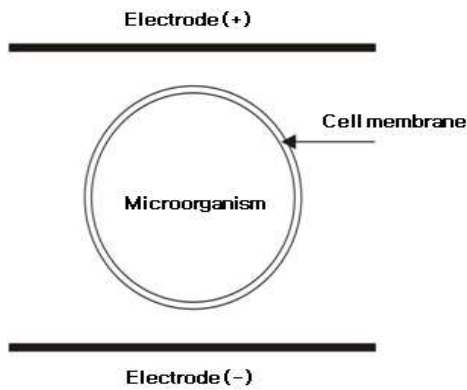


그림 3. 모델링을 위한 전극과 미생물의 기본 개념도
Fig. 3. Simplified illustration of the electrodes and microorganism for modelling

본 연구에서는 3가지 가정 하에 모사를 수행하였다. 첫 번째는 미생물의 비유전율을 5로 고정하고 전압의 세기를 다르게 하여 전계가 미생물에 미치는 영향을 나타내었고, 두 번째는 전압을 10[kV]로 고정하여 비유전율을 다르게 하여 미생물에 미치는 영향을 모사하였다[15]. 마지막으로 전극 간에 다수의 미생물이 있다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 전계가 미생물에 미치는 영향을 시뮬레이션하기 위한 기본적인 도식도이며, 표 1에 시뮬레이션을 하기 위한 기본 조건들을 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션 인자
Table 1. The parameters for simulation

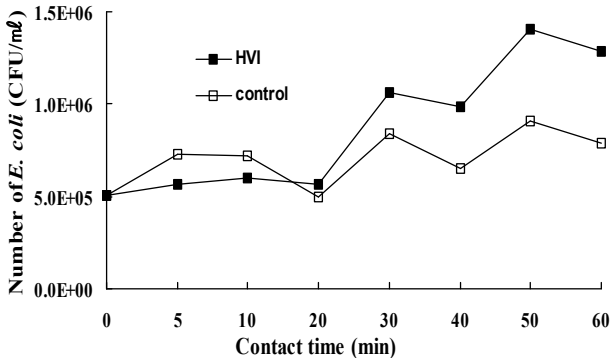
Items	value
Dimemnsion characteristics	2 dimension surface electrostatic field
Electrodes	metallic plate
Microorganism	relative dielectric constants = 5
Cell membrane (or cell wall)	relative dielectric constants = 1
medium	distilled water, relative dielectric constants, 80.74

3. 결과 및 고찰

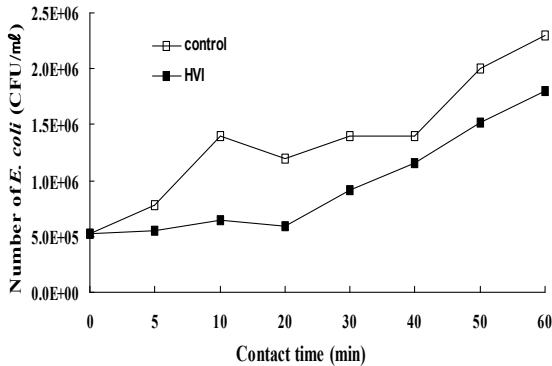
3.1 전계세기에 의한 사멸효과

대장균의 초기 농도가 105[CFU/ml]의 시료에 전계 세기를 각각 10[kV/cm]와 15[kV/cm]를 인가하였을 때 인가시간의 경과에 따른 대장균의 농도변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4 (a)의 경우 HVI를 인가하지 않은 대조군과 10[kV/cm]의 전계를 인가하였을 경우에 운전 15분까지는 HVI 살균효과가 있는 듯하였으나, 15분 이후에는 오히려 HVI를 인가한 경우에 개체수가 더 높은 것으로 나타나 살균효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 결국 인가된 전기장의 세기(10[kV])로는 계속 왕성하게 증식중인 대장균을 사멸시키기에는 부족하다고 판단되었다. 이는 처리시간이 증가한다 하더라도 어느 임계점 이하의 전계 세기에서는 미생물 불

활성화에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 이는 전계의 세기뿐 아니라 고전압 임펄스의 펄스의 폭(width) 및 펄스의 수(number) 또한 미생물 사멸에 큰 영향인자로 작용한다는 연구결과가 보고된 바 있다 [16].



(a) 전계세기: 10[kV/cm]



(b) 전계세기: 15[kV/cm]

그림 4. 전계세기에 따른 대장균의 사멸효과
Fig. 4. Effect of electric field strength on E. coli deactivation by HVI
(a) 10[kV/cm], (b) 15[kV/cm]

따라서 전계의 세기를 15[kV/cm]로 상승시켜 살균 실험을 수행하였다. 전계의 세기가 10[kV/cm]로 인가된 경우와는 달리 대조군과 비교하였을 때 대장균 개체수의 증가가 효과적으로 억제되고 있는 경향이 관찰되었다(그림 4 (b)). 대조군의 개체수를 보면 시간에 따라 계속 증가하고 있는데 이는 대장균이 왕성하게 증식(log-growth phase)하는 상태에 있음을 알 수 있다. 따라서 전계의 세기를 15[kV/cm]로 인가하였을

경우에도 10[kV/cm]와 마찬가지로 증식단계에 있는 대장균의 개체수를 효율적으로 억제시키지 못하였다. 하지만 대조군의 균체수가 60분 동안에 280[%] 증가하는 것을 감안하였을 때 15[kV/cm]가 인가되었을 경우 대장균의 증식을 상당부분 억제하고 있음을 나타내었다. 따라서 상대적으로 전계가 약한 10[kV/cm]와 비교 시 15[kV/cm]가 미생물 사멸에 좀 더 직접적인 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다.

3.2 교차형 흐름 여과에서의 플럭스 감소

HVI의 적용이 막오염을 어느 정도 제어할 수 있는가를 확인하기 위해, 전계세기 15[kV/cm]에서 15분간 대장균 시료에 HVI를 인가한 후 HVI를 인가하지 않은 대조군과의 플럭스 변화를 비교 관찰하였다. HVI의 인가 유/무에 따른 플럭스 변화를 알아보기 위해 교차형흐름 분리막 여과 시스템에서 실험을 수행하였다.

그림 5에 VCR에 따른 상대플럭스 변화($J/J_{i,w}$)를 나타내었다. 대조군의 경우 플럭스가 급격하게 감소하는 반면, HVI를 인가하였을 때의 플럭스는 대조군보다 상대적으로 높게 유지되면서 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 HVI에 의해 대장균의 불활성화가 유도되어서 효율적으로 막오염을 저감시킬 수 있음을 보여주는 것이다.

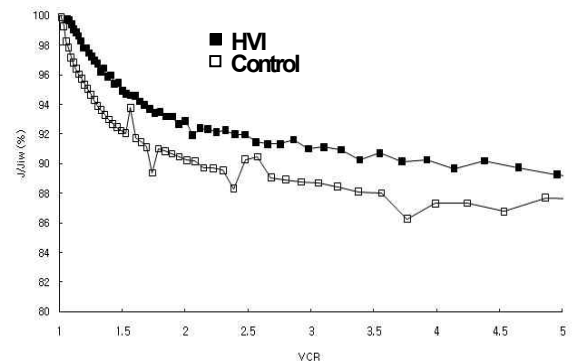


그림 5. HVI 인가 유·무에 따른 플럭스의 변화
Fig. 5. Variation of normalized flux before and after 15[kV/cm] HVI induction

이상에서 살펴본 바와 같이 용액 내에서 부유하고 있는 대장균들이 HVI에 의해 불활성화되어 막오염 저감에 효율적이었다면 대장균에 의해 오염된 분리막을 HVI로 세정하는 방법의 효용성을 확인해 볼 필요가 있다. 이는 분리막을 활용한 수처리 공정에서 막오염 및 세정에 관한 중요한 제어 대책을 제시할 수 있기 때문이다.

3.3 HVI를 이용한 오염된 분리막의 플럭스 회복을 변화

대장균 시료에 의해 오염된 분리막의 HVI 처리에 의한 세정효과를 알아보기 위해 회분식 여과실험이 진행되었으며 그 결과를 그림 6에 제시하였다.

대장균이 존재하는 시료를 여과하면 분리막 오염을 야기하면서 플럭스가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이렇게 오염된 분리막을 별도의 세정 없이 초순수를 이용해 여과하였으며, VCR 5에서 나타난 플럭스 회복율(□)은 약 88%이었다. 이후 HVI 인가 후 다시 회분식 여과를 수행하였을 경우의 플럭스(△)는 초기 플럭스의 약 93%까지 회복됨을 알 수 있었다. 이는 HVI 처리기술의 적용이 미생물에 의해 야기되는 막오염을 저감시킬 수 있을 뿐 아니라, 오염된 분리막을 효율적으로 세정할 수 있는 가능성을 보여주고 있는 것이다.

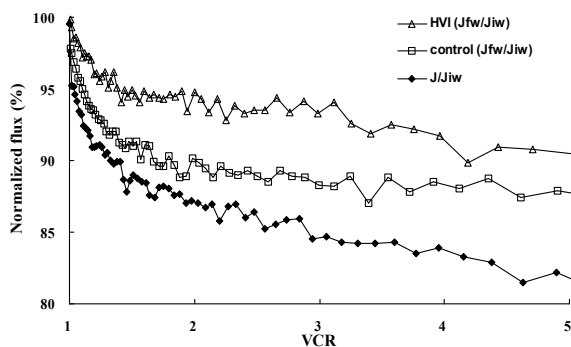
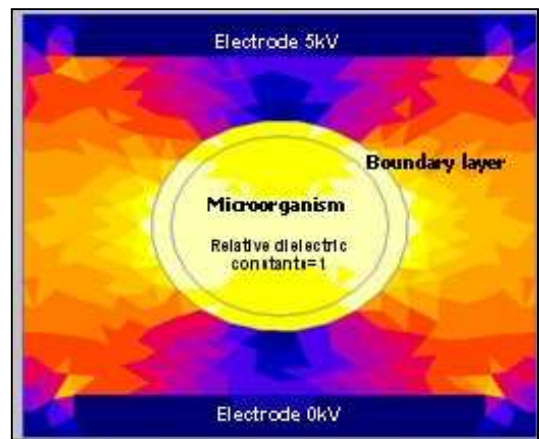


그림 6. 세정방법에 따른 대장균에 의해 오염된 분리막의 플럭스 변화

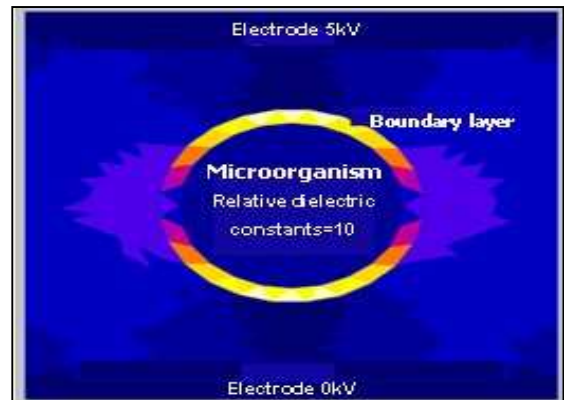
Fig. 6. Flux variation of the contaminated membranes by E. coli. according to the different washing and cleaning condition

3.4 전계시뮬레이션

전계에 따른 미생물 살균효과를 시각적으로 묘사하기 위해 다음과 같은 세 가지 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 1) 비유전율에 따른 전계세기가 미생물에 미치는 영향, 2) 전극 간에 단일 미생물의 존재를 가정 한 후 전계세기가 미생물에 미치는 영향, 3) 전극 간에 다수의 미생물이 존재한다는 가정 하에 전계세기가



(a) 비유전율 = 1
(a) Relative dielectric constants = 1



(b) 비유전율 = 10
(a) Relative dielectric constants = 10

그림 7. 비유전율 1과 10의 조건에서 각각 전계가 미생물에 미치는 영향

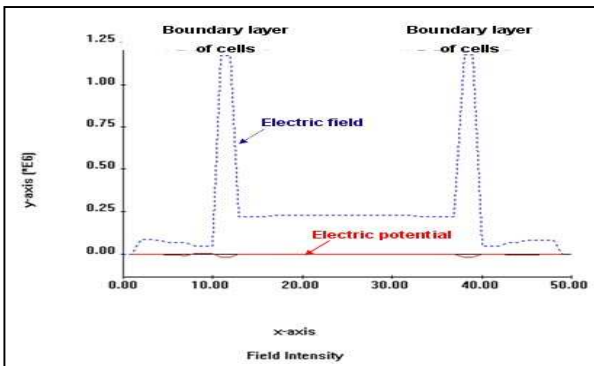
Fig. 7. Simulation of microorganism deactivation when the applied electric field is 10(kV) with the relative dielectric constant of 1 (a) and 10 (b)

미생물에 미치는 영향을 가정하여 전극과 미생물 간의 등가모델링 시뮬레이션의 결과를 그림 7에 나타내었다. 이 때 보이는 노란색 계열의 면은 정전용량 성분이 높아서 전하 축적 능력이 높은 부분을 의미한다.

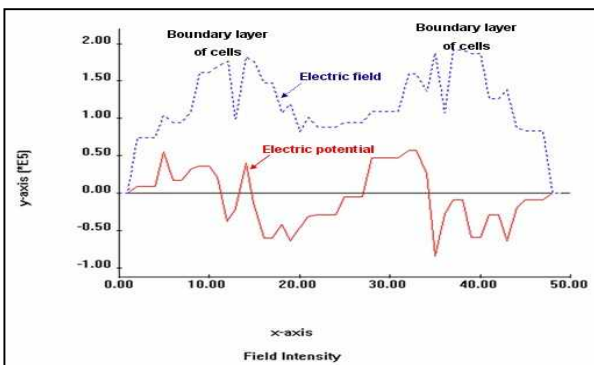
그림 7의 (a)와 (b)는 전압을 10[kV] 인가할 때 미생물 주변 매질의 유전율 1과 10의 조건에서 각각 전계가 미생물에 미치는 영향을 나타낸 것이며, (a)가 상대적으로 비유전율이 높은 (b)보다 미생물 세포 주변에 전계가 강화됨을 확인할 수 있다. 이는 비유전율 1인 물질 주변으로 강한 전계가 인가됨을 나타내는 것이다. 만약 미생물과 함께 포함된 비유전율이 1인 물질이 있을 경우 강한 전계를 인가하게 되면 비유전율이 1인 물질로 가기 때문에 미생물에 강한 전계를 주지

못하여 전계에 따른 미생물의 불활성화를 기대할 수 없다. 반대로 비유전율이 10일 경우 전하를 축적하는 힘이 적기 때문에 상대적으로 미생물 쪽으로 높은 전계가 인가되게 되어 높은 미생물 불활성화를 보이게 되는 것으로 이해할 수 있다.

그림 8은 전극 간에 단일 또는 다수의 미생물이 존재할 경우 다양한 전계세기가 미생물에 미치는 영향을 모사한 것을 나타낸 것이다. 그림 8 (a)의 특성 그래프에서 보면 전극 간의 단일 미생물이 존재할 경우가 다수의 미생물이 존재할 경우 (b)보다 미생물 경계면에서 더 큰 전계 영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 다수의 미생물이 존재할 경우 전계가 분산되어 그 효과가 감소함을 의미한다.



(a) 단일 미생물
(a) A single microorganism



(b) 다수 미생물
(b) Multiple microorganisms

그림 8. 전극간의 미생물 존재에 따른 전계세기의 변화
Fig. 8. Variation of electric field strength on microorganism between electrodes

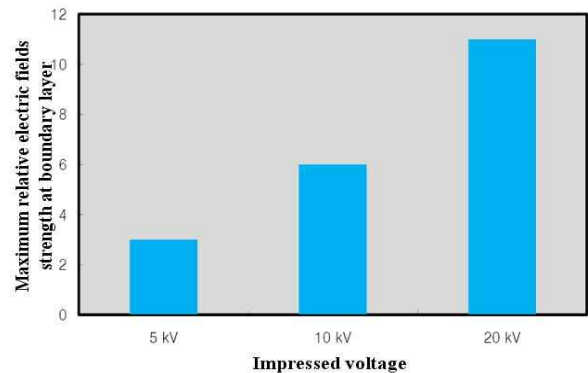


그림 9. 적용되는 전압에 따른 전계세기의 변화
Fig. 9. Variation of electric field strength according to the applied voltage

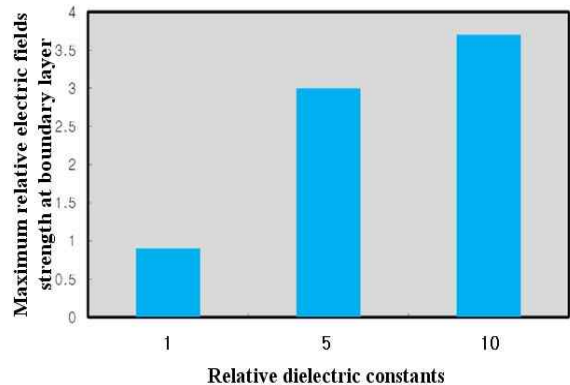


그림 10. 다양한 비 전율에서의 전계 세기 변화
Fig. 10. Variation of electric field strength at different dielectric constants

그림 9에서는 두 전극 간에 인가한 전계세기가 클수록 미생물의 경계면에 미치는 전계가 커짐을 알 수 있었으며, 그림 10은 앞서 언급한 것처럼 주변 매질과 미생물의 비유전율의 변화에 의해 미생물 경계면에서의 전계 세기가 달라지는 것을 나타내는 결과이다.

3. 결 론

본 연구는 고전압 임펄스(HVI) 장치를 이용하여 막 오염 제어의 가능성을 파악하는 것이다. 먼저 미생물의 불활성에 영향을 미치는 다양한 운전인자 중 최적의 전계세기와 인가시간의 영향을 살펴보았다. 비교적 전계가 약한 10[kV/cm]에서는 HVI 장치가 사멸에 큰 변화를 유도하지 못한 반면, 15[kV/cm]에서는 대조군과 비교 시 증식을 억제하며, 대장균의 불활성화를 유도하였다. 또한 막오염 감소를 위한 HVI의 적용은 대조군과 비교 시 대장균의 불활성화를 유도하여 플럭스가 상대적으로 증가함에 따라 효율적으로 막오염이 저감됨을 확인할 수 있었다. 이와 함께, 오염된 분리막의 세정을 위한 HVI 처리기술의 적용을 통해 플럭스를 약 93[%]까지 회복시킬 수 있었다. 이를 통해 HVI 처리기술이 미생물로 오염된 분리막을 전기장 인가를 통해 막 오염 제어 공정으로써 사용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

전계형성 시뮬레이션을 통하여 두 전극 간에 미생물이 존재할 경우 전계의 형성은 미생물 또는 미생물의 경계면에서 그 세기가 증가되는 경향을 확인하였다. 또한 전압의 세기가 증가할수록 미생물의 경계면에 미치는 전계의 세기는 증가하였다. 마지막으로 주변 매질과 세포막 사이에 생성된 전계 사이에 작용하는 힘의 정보를 시뮬레이션을 통해 시각적인 정보를 얻을 수 있었으며, 전극 간에 다수의 미생물이 존재할 경우 미생물의 a경계면에서는 전계세기가 감소됨을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-521-D00240).

References

- [1] 정철우, 손희중, “십자형 막분리 공정에서 전처리 응집공정의 적용성 평가”, 한국수처리학회지, 제16권, 제5호 pp. 97-106, 2008.
- [2] K. Aronsson, U. Ronner, “Influence of Escherichia coli, Listeria innocua and Saccharomyces cerevisiae in relation to membrane permeabilization and subsequent leakage of intracellular compounds due to pulsed electric field processing”, International J. Food Microb., Vol. 99, pp. 19-32, 2005.
- [3] N. Dutreux, S. Notermans, T. Wijtzs, M.M. Gongora-Nieto, G.V. Barbosa-Canovas and B.G. Swanson, “Pulsed electric fields inactivation of attached and free-living Escherichia coli and Listeria innocua under several conditions”, International J. Food Microb., Vol. 54, pp. 91-98, 2000.
- [4] M. Loginov, N. Lebovka, O. Larue, M. Shynkaryk, M. Nonus, J.L. Lanoiselle, and E. Vorobiev, “Effect of high voltage electrical discharges on filtration properties of Saccharomyces cerevisiae yeast suspensions”, J. Membr. Sci., Vol. 346, pp. 288-295, 2010.
- [5] K. Aronsson, U. Ronner, “Influence of pH, water activity and temperature on the inactivation of Escherichia coli and Saccharomyces cerevisiae by pulsed electric fields”, Innovative Food Sci. Emerg. Technol., Vol. 2, pp. 105-112, 2001.
- [6] K. Huang, J. Wang, “Designs of pulsed electric fields treatment chambers for liquid foods pasteurization process: a review”, Journal of Food Eng., Vol. 95, pp. 227-239, 2009.
- [7] C. Ferrer, D. Rodrigo, M.C. Pina, G. Klein, M. Rodrigo, and A. Martinez, “The monte carlo simulation is used to establish the most influential parameters on the final load of pulsed electric fields E. coli cells”, Food Control, Vol. 18, No. 8, pp. 934-938, 2007.
- [8] V. Heinz, S. Toepfl, and D. Knorr, “Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment”, Innovative Food Sci. Emerg. Technol., Vol. 4, pp. 167-175, 2003.
- [9] H. Vega-Mercado, H.O. Martin-Belloso, F. Chang, G. Barbosa-Cánovas, and B. Swanson, “Inactivation of Escherichia coli and Bacillus subtilis suspended in pea soup using pulsed electric fields”, Journal of Food Processing and Preservation, Vol. 20, No. 6, 501-510, 1996b.
- [10] S. Guyot, E. Ferret, J.B. Boehm, and P. Gervais, “Yeast cell inactivation related to local heating induced by

low-intensity electric fields with long-duration pulses”, International J. Food Microb., Vol. 113, pp. 180-188, 2007.

- [11] E.G. Akdemir, Q.H. Zhang, “Effects of pulse polarity and pulse delaying time on pulsed electric fields-induced pasteurization of E. coli O157:H7”, Journal of Food Engineering, Vol. 68, pp. 271-276, 2005.
- [12] H. Hülshager, J. Potel, and E.G. Niemann, “Electric field effects on bacteria and yeast cells”, Radiat. Environ. Biophys., VOL. 22, No. 2, 149, 1983.
- [13] Q. Zhang, A. Monsalve-Gonzalez, A. Qin, B. Barbosa-Canovas, and B.G. Swanson, “Inactivation of saccharomyces cerevisiae by square wave and exponential decay pulsed electric field”, J. Food Process Eng., Vol. 17, pp. 469-479, 1994.
- [14] S. Alkhafaji, M. Farid, “Modelling the inactivation of Escherichia coli ATCC 25922 using pulsed electric field”, Innovative Food Sci. Emerg. Technol., Vol. 9, pp. 448-454, 2008.
- [15] 최규하, “반도체 전력변환을 중심으로 한 전력전자”, 광문각, pp. 23, 1999.
- [16] S. Alkhafaji, M. Farid, “An investigation on pulsed electric fields technology using new treatment chamber design”, Innovative Food Sci. Emerg. Technol., Vol. 8, pp. 205-212, 2007.

◇ 저자소개 ◇



이주훈 (李柱勳)

1982년 11월 28일생. 2005년 호서대학교 환경공학과 졸업. 2007년 동 대학원 환경공학과 졸업(석사). 현재 (주)퓨어엔비텍 근무.



김준영 (金遵英)

1978년 12월 13일생. 2004년 호서대학교 환경공학과 졸업. 2007년 동 대학원 환경공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 BK21 반도체·디스플레이공학과 박사과정.



이진우 (李鎭雨)

1961년 2월 4일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 세명백트론(주) 연구실장. 현재 호서대학교 전기공학과 교수.



이준호 (李竣昊)

1962년 9월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 일본 전력중앙연구소 Visiting scholar 및 한국과학재단 Post Doc. Fellow. 현재 호서대학교 환경공학과 교수.



장인성 (長仁莢)

1964년 3월 31일생. 1990년 서울대학교 공업화학학과 졸업. 1992년 동 대학원 공업화학학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 공업화학학과 졸업(박사). 1997년 2월~현재 호서대학교 환경공학과 교수.