

碩 士 學 位 論 文

고전압 전기장을 이용한
하수처리장 방류수 중의 대장균군
소독에 관한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

鄭 根 植

2004 年 6 月

碩士學位論文

고전압 전기장을 이용한
하수처리장 방류수 중의 대장균군
소독에 관한 연구

指導教授 甘 相 奎



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

鄭 根 植

2004 年 6 月

고전압 전기장을 이용한 하수처리장 방류수
중의 대장균군 소독에 관한 연구

指導教授 甘 相 奎

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2004年 6月



鄭 根 植

鄭根植의 共學碩士學位 論文을 認准함.

2004年 6月

委員長 허철구 印
委 長 조은일 印
委 長 감상규 印

목 차

I. 서론	1
II. 이론적 고찰	3
1. 대장균군(Coliform group)	3
2. 고전압 펄스 전기장	6
1) 고전압 펄스 파형의 특성	6
2) 전기장의 세기와 에너지	10
3) 고전압 펄스 전기장 공정의 주요 공정 변수	12
4) 고전압 펄스 전기장에서의 peak volatage와 current	12
3. 전기장에 의한 미생물사멸 이론 및 영향인자	14
1) 전기장에 의한 미생물 사멸 이론	14
2) 미생물 사멸에 미치는 영향인자	18
III. 재료 및 실험방법	23
1. 실험장치	23
2. 실험방법	27
IV. 결과 및 고찰	29
1. 전기장 세기와 처리시간에 따른 영향	29
2. 방전면적 변화에 따른 영향	38
3. 이온강도(전기전도도) 변화에 따른 영향	40
4. pH 변화에 따른 영향	43
5. SS 변화에 따른 영향	45

V. 결론 46

참고문헌 48



List of Figures

Fig. 1. Four types of pulses forms	8
Fig. 2. Layout of square wave generator using a pulse forming network of three capacitor-inductor units..	9
Fig. 3. Simplified circuit for voltage pulsed electric with exponential decay pulse generation.	9
Fig. 4. Induction of transmembrane potential in a exposed to an external field	15
Fig. 5. Electrporation of cell membrane by compression when exposed to a high voltage pulse electric field.	16
Fig. 6. Cell inactivation due to the osmotic imbalance across the cell membrane induced by its poration	17
Fig. 7. Schematic diagram of experimental set-up for high voltage AC & pulsed(DC) electric fields treatment	26
Fig. 8. The structure of a discharge tube	26
Fig. 9. Survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage AC electric field generator	30
Fig. 10. Survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage pulsed electric field generator	31
Fig. 11. Survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage AC electric field generator	34
Fig. 12. Survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage pulsed electric field generator	35

Fig. 13. Comparison of death rate of coliform group with electric field strength induced by high voltage AC (20 kHz) and pulsed electric field generator (40 Hz) at treatment time of 30 min	37
Fig. 14. Effect of copper electrode discharge area on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment	39
Fig. 15. Effect of electric conductivity (EC) on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment	41
Fig. 16. Effect of effluent pH on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment	43
Fig. 17. Effect of SS (mg/ℓ) on on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment	45



List of Tables

Table 1. Water quality characteristics of the effluents used in this study	23
Table 2. Summary of experimental conditions	28
Table 3. The values of critical electric field (E_c) and death rate constant (k_E), and determination coefficients (r^2) obtained from the survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage AC and pulsed electric field generator	32
Table 4. The values of critical treatment time (t_c) and death rate constant (k_t), and determination coefficients (r^2) obtained from the survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage AC and pulsed electric field generator	36



A Study on the Disinfection of Coliform Group in the
Effluent of Sewage Plant by High Voltage Electric Field
Treatment

Geun-Sik Chung

*Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University*

Supervised by Professor Sang-Kyu Kam



Summary

Using high voltage electric fields induced by high voltage AC (10-12 kV/cm, 20 kHz) and pulsed electric field generator (20-30 kV/cm, 40 Hz) as a semipermanent and environment-friendly disinfecting apparatus, the disinfection effect of coliform group in the effluent of sewage plant was investigated. The effects of electric field strength, treatment time, discharge area of a discharge tube, water quality factors (electric conductivity, pH and SS) on its death rate were examined. The results obtained were summarized as follows.

1. It was found that the death rate of coliform group was increased with increasing electric field strength, its logarithmic survival fraction was decreased linearly with increasing electric field strength at a constant

treatment time, the critical AC and pulsed electric field strength by extrapolation was 5 kV/cm and 2 kV/cm, respectively, and its death rate constant was increased greatly with increasing treatment time.

2. It was found that the death rate of coliform group was increased with increasing treatment time, its logarithmic survival fraction was decreased linearly with increasing treatment time at a constant electric field strength, the critical treatment time of AC and pulsed electric field strength by extrapolation was 5 min and 2 min, respectively, regardless of electric field strength, and its death rate constant was increased greatly with increasing electric field strength.
3. Comparing the death rate of coliform group by AC and pulsed electric fields used in this study, its death rate was higher for the latter than the former, but did not increase linearly with increasing electric field strength, which is considered to be caused by the difference of frequency and pulse width.
4. The results obtained for the effects of discharge area, electric conductivity and pH on the death rate of coliform group using AC electric field (12 kV/cm, 20 kHz) were as follows: its death rate showed the trend to increase linearly with increasing discharge area; for the effect of electric conductivity, its death rate was increased with increasing electric conductivity, regardless of ionic species, increased with increasing cationic valency, and was similar between the same cationic valency; the pH 5-9 used in this study did not affect its death rate; its death rate was decreased with increasing SS concentration.
5. It is considered that the electric field equipment to generate a strong high voltage electric field and to be able to increase the width and number of the pulse is necessary, in order to apply it to disinfection process of effluent in the sewage plant practically.

I. 서론

국내 하수도법에 의해 2003년부터 시행되고 있는 하수종말처리시설의 방류수 수질 기준 중 대장균수의 수질기준은 상수원의 수질에 영향을 미치는 지역의 하수처리장은 처리수의 대장균수가 1,000 개/mL 이하, 상수원의 수질에 영향을 미치는 영향이 비교적 적은 기타지역의 하수처리장은 대장균수가 3,000 개/mL 이하로 규정, 관리하고 있다. 그러나 2002년도 환경부 통계에 따르면 운영중인 전체 처리장의 20% 이상이 이러한 법적 기준을 만족하지 못하고 있으며 하수방류수에 의해 공공수역이 바이러스 등과 같은 오염이 예상되어 방류수 기준을 충족시키기 위해서는 처리장내 염소, 자외선 등과 같은 소독시설의 설치 및 가동을 요구하고 있다(배 등, 2004).

현재 이용하고 있는 소독방법 중 염소소독의 경우는 소량 주입으로 미생물 사멸 효과는 우수하나 수생생물에 대해 위해성이 큰 THMs, HAAs 등을 포함한 다양한 소독부산물(DBPs, disinfection by-products)을 생성하여 염소 소독시설은 중단되는 경향으로 가고 있다. 국내에서는 염소소독 이외의 소독방식에 대한 설치면적 및 운영 기술 축적 부족 등으로 소독 선정방법에 있어 애로점이 발생되고 있다. 선진국에서는 염소소독의 경우 DBPs의 위해성 문제점이 들어남에 따라 폐쇄성수역이나 수생생물 등 환경생태계 보호가 시급한 지역부터 자외선(UV)소독으로 점차 변경하는 추세에 있다. 그러나, 이러한 자외선 소독의 경우 유지관리 측면에서 보면 주기적으로 고가인 자외선 램프를 교체해주어야 하는 문제가 있다.

식품 등에 존재하는 미생물의 비열 사멸목적으로 많은 연구가 수행되고 있으며 연구결과 사멸효과가 우수한 것으로 보고되고 있는 고전압 펄스 전기장은 반영구적이고 환경친화적인 소독방법으로 사료된다. 고전압 펄스 전기장에 의한 미생물의 사멸에 대해서는 1960년에 Gossling에 의하여 처음으로 제안되었으며, 이후 Doevenspeck (1960), Sale과 Hamilton(1967a, 1967b, 1968)에 의하여 전기장에 의한 미생물의 사멸에 미치는 영향에 대한 연구가 시작되었다. Doevenspeck(1960)은 전기장의 세기에 따라 미생물의 사멸에 미치는 영향이 다르다는 것을 발견하였으며, Sale과 Hamilton(1967a, 1967b, 1968)은 약 25 kV/cm 이상의 직류전기장에 의해 세균과 효

모가 사멸되며, 미생물의 종류, 전기장의 세기, 처리시간 등에 의해 영향을 받는 것으로 보고하였다. 1980년대에 전기장에 의한 미생물의 불활성화에 대한 보다 체계적인 연구가 수행되었고, 전기장내에서의 미생물의 특성이나 전기장에 의한 미생물의 변화에 대한 기본적인 이론이 보고되었다. 즉, 미생물 사멸효과에 대한 전기장의 세기, 처리시간, 펄스의 길이, 펄스 수 등 다양한 전기장에 대한 영향 및 이온에 대한 영향 등이 보고 되었고(Hulsheger와 Niemann, 1980; Hulsheger 등, 1981, 1983), Zimmerman(1986) 및 Zimmerman 등(1988)은 유전 파괴(dielectric breakdown) 이론 뿐 만 아니라 electroporation, electrofusion 과 pearl chain의 형성 등 고전압 펄스 전기장에 의한 미생물의 불활성화 기작과 전기장 내에서의 미생물 세포의 행동 등에 대한 기본적인 이론을 정립하였다.

국내에서는 1990년 후반 이후에 고전압 펄스 전기장에 의한 식품의 비열살균공정에 대해 연구되었으며(김, 1998; 정, 1999; 문, 2000; 신, 2000; 이와 소, 2000), 이(2004), 이와 박(2004)은 고전압 교류전기장 발생장치를 개발하고 이로부터 유도되는 전기장을 이용하여 미생물의 사멸효과를 검토하였다. 이와 같은 고전압 전기장을 이용하여 국내외적으로 미생물 사멸에 관해 수행된 연구는 주로 식품 중에 존재할 수 있는 특정 미생물의 비열살균효과에 대해 회분식으로 수행되어 산업적으로 적용된 경우는 거의 없으며, 실제 환경 중에 적용하여 미생물 사멸에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구의 목적은 염소소독에 의한 수중 유용 생물체에 위해성의 DBPs의 생성, 자외선 소독의 운영에 따른 경제적인 문제를 해결하기 위한 대안으로서, 식품 중 미생물의 비열살균공정의 목적으로 많은 연구가 수행되고 있는 고전압 펄스 전기장의 미생물 사멸에 대한 기본적인 이론을 바탕으로 하는 반영구적이고 친환경적인 소독장치를 이용하여 하수처리장 방류수에 포함된 대장균군(coliform group)의 소독효과를 검토하고자 하였다. 본 연구에서는 두종류의 고전압 전기장 발생장치(고전압 교류(AC)전기장 발생장치, 고전압 펄스 전기장 발생장치)로부터 유도되는 고전압 전기장을 이용하여 대장균군 소독에 미치는 전기장의 세기, 처리시간의 영향과 방류수 중 수질인자의 영향을 함께 검토하여 고전압 전기장의 하수처리장 방류수 중의 대장균군 소독에 필요한 기초 자료를 도출하고자 하였다.

II. 이론적 고찰

1. 대장균군

대장균군(coliform group=총대장균군)은 먹는물에서의 검출과 계수가 용이하므로 오랜 기간동안 적절한 먹는물 수질의 지표로서 인식되어 왔다. 세균분류상 *Enterobacteriaceae*에 속하는 세균으로서 담즙염(bile salt)이나 이와 비슷한 성장억제 표면활성제의 존재 하에서 36-37°C에서 유당을 분해하여 산과 가스를 생성하는 그람 음성, 비아포성 간균으로 oxidase음성인 세균을 총칭한다. 최근에는 효소적 방법의 개발로 인해 이 정의가 β -galactosidase의 활동성을 가진 것으로 확장되었다.

전통적으로 대장균군은 *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter* 속이 속한 것으로 알려졌으나, 현대적 분류법에 의한 정의에 따르면 더욱 다른 이종의 그룹으로 구성되어 있는 것으로 알려지고 있다. 이들 중에는 분변과 일반 환경에서 모두 발견되는 *Citrobacter freundii*, *Enterobacter cloacae* 등이나, 분변에서는 거의 없고, 양질의 먹는물에서 증식할 수 있는 *Serratia fronticola*, *Rahnella agnatis*, *Buttiauxella agrestise* 등과 오염되지 않은 물이나 토양에서도 발견되는 *Serratia*와 *Yersinia* 중 몇몇 유당 발효종들이 있다. 또한 대장균군 범주에 속하나 유당발효를 하지 않는 종류도 있어 이러한 세균은 β -galactosidase를 적용하면 대장균군으로 나타난다. 따라서 대장균군의 정의에 부합되는 비분변성 세균과, 유당발효를 하지 않는 대장균군들의 존재는 분변오염의 지표로서 대장균군을 적용하는데 제한적 요소가 된다.

그럼에도, 가장 많은 수가 검출되므로 가장 큰 폭의 안전도를 제공하여 먹는물 및 처리수에서 중요한 지표세균으로 사용되고 있다. 수처리 공정을 거친 공급수에서는 검출되어서는 안되며, 만약 발견되었다면 처리후의 오염, 부적절한 수처리, 초과영양소 등을 말해준다. 비록 대장균군이 항상 분변오염이나 먹는물의 병원체와 직접적 관련이 있는 것은 아니나, 대장균군 검사법은 공공 수자원의 미생물적 품질을 관리하는

데 여전히 유용한 방법으로 사용되고 있다. 국내에서는 먹는물 수질기준, 수질환경 기준 및 분뇨·축산폐수공공처리시설의 방류수 기준에 대장균군을 사용하고 있으며, 대장균군수를 측정하는 방법으로는 최적확수 시험법, 막여과 시험방법, 평판집락 시험방법 등이 있다.

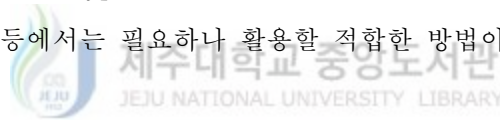
분원성 대장균군(fecal coliforms 또는 thermotolerant coliforms)은 배양온도가 44℃로 높기 때문에 열저항성 대장균군이라고도 한다. 이들은 *Escherichia*속과 그보다 낮은 범위로 존재하는 *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*의 종들로 구성되어 있다. 이 미생물 중 오로지 대장균(*Escherichia coli*)만이 분원성이며, 인간이나 다른 포유동물, 조류의 분변에는 많은 수가 항상 존재하고, 분변으로 오염되지 않은 물이나 토양에서는 거의 발견되지 않는다. 대장균 이외의 내열성 대장균군은 산업폐수 혹은 부패한 식물 찌꺼기나 유기물이 풍부한 토양의 물에서 기원한다.

열대나 아열대 지방에서는 분원성 대장균군이 분원의 오염과 관계없이 발생할 수 있으나, 온대지방에서는 분원성오염의 가능성을 무시할 수 없으며, 병원성 미생물의 존재와 수처리가 제대로 이루어지지 않았다는 기본 가정은 유효하다. 따라서 분변오염의 지표로서는 대장균보다 신뢰도가 떨어지나, 대장균군에서 온혈동물의 장내온도를 감안하여 자연환경에 있는 세균의 성장을 억제하면서 장내세균이 자랄수 있는 온도에 배양함으로써 좀더 특이성을 높이므로 대장균군 보다는 분원성 오염에 더욱 가까운 지표미생물로 간주된다. 먹는물에서 분원성 대장균군이 검출, 동정되거나 추정 시험에서 대장균이 검출되었다는 것은 최근에 분변 오염이 되었다는 증거이므로 즉각적인 조사가 필요하다. 분원성 대장균군은 단일 단계의 시험법으로 쉽게 검출되므로 유럽의 상수원수수질기준이나, 미국의 이수목적에 따른 수질기준과 같이 수처리 공정에서 분원성 세균의 제거효율성을 알려주는 지표로서 중요한 이차적인 역할을 수행하기도 하며, 원수수질에 따른 수처리 기준 평가나 세균제거의 실행목표 제공에 사용되기도 한다.

대장균(*Escherichia coli*)은 단일종의 세균으로 인간이나 온혈동물의 장내 우점을 이루는 통성혐기성세균이다. 사람의 분변에 10⁹/g 가량 분포하며, 대장균군, 분원성 대장균군보다 분원성 오염에 대한 특이성이 가장 높아 가장 신뢰할 수 있는 분원성 오염지표이다. 사람, 사육동물, 혹은 야생동물이나 조류 등 어디에서 배출되었건 간에 하수, 처리유출수, 자연수, 최근 분변에 오염된 토양 등에서 다양하게 발견되며, 물속

에 대장균이 존재한다는 것은 항상 잠재적으로 위험한 오염을 나타내므로 즉각적인 주의가 요구된다. 일상적인 방법으로 대장균을 완전히 동정하는 것은 매우 복잡하여, 높은 정확도와 함께 신속히 동정하는 방법들이 개발되어 표준방법에 수록되어 있고, 상품화되어 있다. 국내에서는 아직 대장균을 수질이나 먹는물의 분원성오염지표로 분석하고 있지 않다.

대장균은 보통 장내에서 서식하고 대부분이 비병원성이다. 그러나 몇몇 subtype은 다양한 기작에 의하여 장질환을 일으키며, 감염의 유형은 살모넬라, 이질, 콜레라, 위장염 등과 비슷하다. 장내병원성 subtype은 장내병원성(enteropathogenic), 장침투성(enteroinvasive), 장독성(enterotoxigenic), 장출혈성(verocutotoxin) 등의 4가지로 구분되며, O:157이 네 번째에 분류된다. 물의 대장균검사에는 생화학적 방법을 사용하는데, 병원성 대장균 균주는 구별이 되지 않는다. 병원성을 구분하는 혈청학적 타입은 체세포 O 항원에 근거하며 그밖에 캡슐 K항원과 편모 H 항원이 있다. 급수원에서 대장균의 병원성 subtype을 검출은 물 시료의 일상적인 검사에 일반적이지 않으며 전염병적 연구 등에서는 필요하나 활용할 적합한 방법이 정립되어 있지 않다.



2. 고전압 펄스 전기장(High-voltage pulsed electric field)

1) 고전압 펄스 파형의 특성

고전압장치에서 발생하는 펄스의 파형에는 exponential decay pulse, square wave pulse, oscillatory pulse, spike-pulse(triangular pulse), sinusoidal pulse 등 다양한 형태가 있으나 주로 사용되는 펄스 파형은 크게 exponential decay pulse와 square wave pulse의 두 가지이다. 이들 exponential decay pulse, square wave pulse 형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같으며 이를 구성하는 기본적인 회로는 Fig. 2 및 3에 나타내었다. Exponential decay pulse는 간단한 회로를 통해서 쉽게 얻을 수 있는 반면, square wave pulse는 pulse forming network(PFN)을 통해 발생시켜야 하기 때문에 상당히 복잡하고 비용도 많이 든다(신, 2000). 그러나 square wave pulse는 인가된 대부분의 펄스 에너지가 전기적 에너지로 처리 대상에 전달되지만 exponential decay pulse는 긴 tailing을 갖으며 이 tailing 부분은 사멸 효과를 갖지 못하고 처리 대상 열에너지로 전달되어 과도한 열을 발생시키게 된다. 따라서 square wave pulse는 exponential decay pulse보다 에너지 효율이 우수하여 미생물 사멸이 더 효과적인 것으로 알려져 있다(신과 박, 2000). 즉, 저항과 축전지가 직렬 연결된 일반적인 series 형의 회로에서 지수형(exponential decay pulse)의 폭은 아래 식 (1)과 같이 정의 된다.

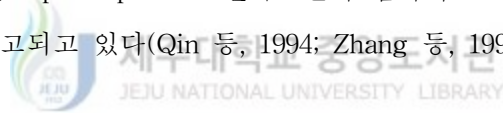
$$\tau = R \cdot C \quad (1)$$

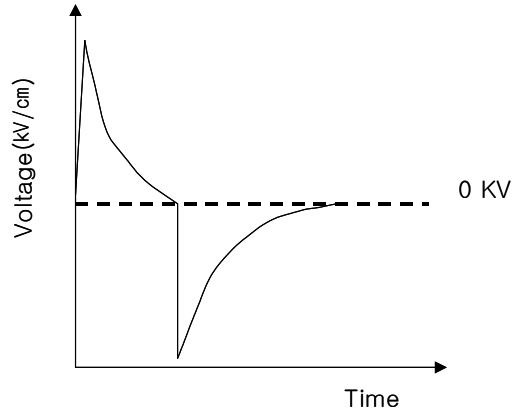
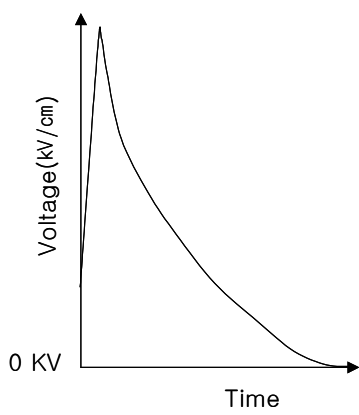
여기서 R은 전체 회로(시료포함)상의 저항의 합이고 C는 축전지 용량(capacity, F)이다. 그러나 전기 회로상의 저항은 시료의 저항에 비해 매우 낮고, 시료의 축전 용량은 회로상의 축전기의 축전 용량에 비해 매우 작기 때문에 식 (2)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\tau = R_S \cdot C_0 \quad (2)$$

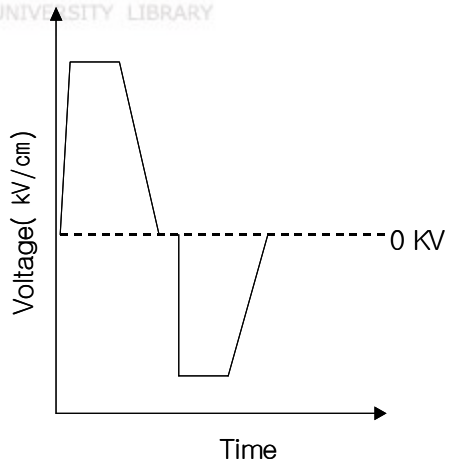
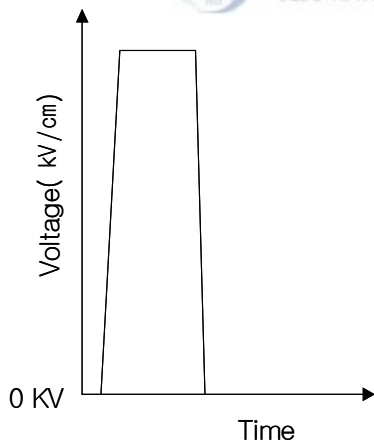
여기서 R_S 는 시료의 저항값이고 C_0 는 축전지의 축전 용량이다. Exponential decay pulse의 펄스폭은 두 전극간의 전압으로 표시하여 나타낼 경우에는 V_{\max} 의 약 37% 까지 감소하는데 걸리는 시간으로 정의한다(신, 2000). 즉, 인가된 펄스 에너지의 37%만 전달되고 나머지는 열로 전달되어 사멸효과를 나타내지 못한다고 보고하고 있다.

이들 파형은 다시 극성에 따라서 단방향 펄스(monopolar pulse)와 양방향 펄스(bipolar pulse)로 구분되어 지고, bipolar pulse는 monopolar pulse보다 사멸효과가 높은 것으로 보고되고 있다. 즉, 고전압 펄스 전기장은 세포막내의 전하의 이동을 유발하고 세포막을 극성화시키는데 bipolar pulse는 이러한 전하의 이동을 바꾸어 세포막의 극성 형태를 계속해서 변화시켜 세포막에 스트레스를 유발시켜 높은 사멸율을 얻을 수 있으며 또한 bipolar pulse는 전극표면에 침착되는 scale을 약 80% 이상 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다(Qin 등, 1994; Zhang 등, 1994).





A. Monopolar exponential decay pulse B. Bipolar exponential decay pulse



C. Monopolar square wave pulse D. Bipolar square wave pulse

Fig. 1. Four types of pulses forms

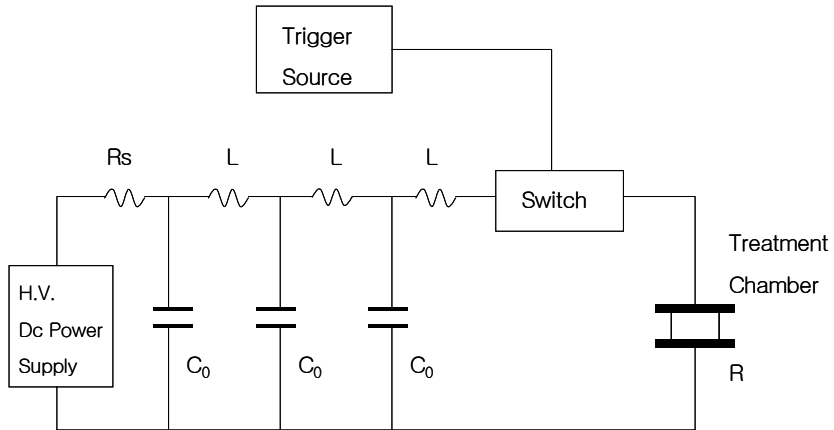


Fig. 2. Layout of square wave generator using a pulse forming network of three capacitor-inductor units.

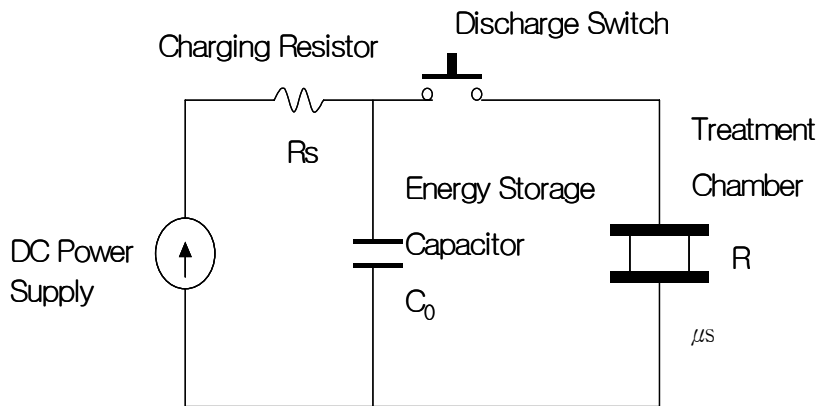


Fig. 3. Simplified circuit for voltage pulsed electric with exponential decay pulse generation.

2) 전기장의 세기와 에너지(신, 2000)

일정한 두 점 사이 즉, 처리 용기내의 두 전극 사이에 걸리는 평균 전기장의 세기는 인가된 전압(V)을 전극 사이의 거리(d)로 나눈 값으로 정의 된다(식 3).

$$E = V/d \quad (3)$$

저항을 통해 축전된 전기가 처리용기내의 시료에 방전될 경우 펄스는 지수적으로 감소하며, 그 펄스폭은 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 $\tau = R \cdot C$ 이므로 처리시간 (treatment time) t는 식 (4)와 같다

$$t = n \cdot \tau = n \cdot R \cdot C \quad (4)$$

여기서 n은 펄스의 수, τ 는 펄스의 폭을 나타낸다.

Generator에서 발생하는 전압(V)이 일정할 경우, 병렬로 연결되는 축전지의 수가 증가하면 축전되는 전기 에너지와 펄스폭은 증가하게 된다. 축전지에 축전된 전기 에너지 W(J)는 식 (5)로 으로 표시되며, 펄스 당 시료에 전달되는 전기적 에너지 W'(J)은 식 (6)으로 나타낸다.

$$W = 1/2 \cdot C \cdot V^2 \quad (5)$$

$$W' = \int_0^t p(t) dt \quad (6)$$

여기서 p(t)는 순간 전력(instantaneous power)으로 이는 식 (7)로 나타낼 수 있으며, V(t)는 전극 간에 인가되는 순간 전압, I(t)는 시료에 흐르는 순간 전류를 나타낸다.

$$p(t) = V(t) \cdot I(t) \quad (7)$$


시료에 인가되는 전기장이 균일하고, 저항값이 일정하다고 가정할 경우 처리 용기 내의 시료에 전달되는 에너지는 식 (8)로 나타내어진다.

$$Q = \frac{V^2 \cdot C \cdot n}{2v} = \frac{V^2 \cdot t}{2Rv} \quad (8)$$

여기서 v 는 처리용기의 부피이다. Square wave pulse의 경우에는 최대 전압 V_{\max} 가 시료에 인가되었을 경우 시료에 전달되는 전기적 에너지는 식 (9)로 표시된다.

$$W = P_{peak} \cdot t = V_{\max} \cdot I_{\max} \cdot t = V_{\max}^2 \cdot t / R_r \quad (9)$$

여기서 I_{\max} 는 펄스가 인가되는 동안 시료에 흐르는 최대 전류값이고 P_{peak} 는 최대 전력(W)으로 식 (10)으로 정의 할 수 있다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$P_{peak} = V_{\max} \cdot I_{\max} = V_{\max}^2 / R = R \cdot I_{\max}^2 = E^2 \cdot v / \rho \quad (10)$$

Square wave pulse에 의한 처리 용기내에서 시료에 전달되는 에너지는 식 (11)과 같다.

$$Q = \frac{V \cdot I \cdot \tau \cdot n}{v} = \frac{V^2 \cdot \tau \cdot n}{Rv} = \frac{V^2 \cdot t}{Rv} \quad (11)$$

Grahl 등(1992)은 식품의 비열 살균의 조건을 유지한 상태에서 *E. coli*를 4 log 사멸 시키는데 필요한 전기장의 세기와 에너지는 각각 $E = 26 \text{ kV/cm}$, $Q = 297 \text{ kJ/L}$ 로 보고하였다.

3) 고전압 펄스 전기장 공정의 주요 공정 변수

신 (2000)은 고전압 펄스 전기장시스템을 공정에 적용할 때의 주요 변수를 아래와 같이 보고하고 있다

- ① 고전압 펄스 발생기에서 발생하는 전압의 세기- 이는 축전지내에 축적되는 에너지의 양을 조절하며, 전극 사이에 인가되는 전기장의 세기를 결정한다.
- ② 저장되는 에너지와 펄스의 길이를 조절하는 연결된 축전지의 수
- ③ 전극간의 거리
- ④ 펄스의 수
- ⑤ 펄스 frequency (f)
- ⑥ 펄스의 형태
- ⑦ 시료의 저항- 시료중의 이온강도에 의해 저항이 달라질 수 있다.
- ⑧ 연속 공정의 경우 유량- 고전압 펄스 전기장시스템을 사용하여 시료 중의 미생물을 사멸할 경우 반응기내를 통과하는 시료의 유속은 전달되는 전기에너지 양을 결정하게 되어 공정변수가 될 수 있다.



4) 고전압 펄스 전기장에서의 peak voltage와 current

방류수 중의 미생물을 사멸하기 위해 고전압 펄스 전기장 장치 및 처리용기 등을 설계, 제작할 때에는 순간 최대전압과 순간 최대 전류를 반드시 고려하여야 한다.

전기장의 세기는 전극간에 인가된 전압을 전극간의 거리로 나눈 것으로($E = V/d$), 전극간의 간극이 커질수록 같은 전기장의 세기를 얻기 위해서는 보다 높은 전압이 필요하게 된다.

펄스의 decay 시간을 τ , 축전지의 용량을 C_0 , 전극간의 간극을 d , 전극의 면적을 A 라 하면 방류수의 전기전도도(σ)는 식 (12)에 의해 구할 수 있다.

$$C_0 = \frac{\tau}{R} = \frac{\tau \cdot \sigma \cdot A}{d} \quad (12)$$

최대 전류값은 축전량(capacitance), inductance, 저항(resistance)의 함수이다. 회로상의 inductor는 최대 전류를 지연시키고 감소시키는 역할을 한다. 최대 전류값은 식 (13)과 같이 정의된다.

$$I_{\max} = \frac{V}{R} = \frac{V \cdot \sigma \cdot A}{d} \quad (13)$$

실제 공정상의 최대 전류값은 위의 식에 의해 계산된 값보다 작으나 근접하는 경우가 있으므로 항상 I_{\max} 값을 고려하면서 공정을 운영하여야 한다.



3. 전기장에 의한 미생물 사멸 이론 및 영향 인자

1) 전기장에 의한 미생물 사멸 이론(신과 변, 2000)

고전압 펄스 전기장에 의해 미생물이 사멸되는 이론에 대해 많은 연구자들에 의해 논의되어 왔으며, 그 중 가장 널리 받아들여지는 이론은 유전파괴(dielectric breakdown)현상에 의한 세포막의 파괴이다(Zimmermann, 1986; 신과 변, 2000). 세포막 파괴에는 세포막의 임계 막횡단전위(transmembrane potential) 이론, 세포막의 압축 이론, 삼투압에 의한 팽윤 이론, 유동막 이론(fluid-mosaic model), 세포막의 구조적 결함이론 등이 있으며(신과 변, 2000), 이들 이론을 살펴 보면 다음과 같다.

(1) 세포막의 임계 막횡단전위(transmembrane potential) 이론

미생물 세포가 강한 전기장에 노출되면 전기장 내의 전자의 흐름에 따라 이온이 이동되어 phospholipid vesicles의 이중층이 극성화된다. 세포막의 지질 이중층은 전기 부도체이므로 극성화된 지질 이중층의 표면에 이온이 축적하게 되고 그 결과 transmembrane potential(V_m)이 유도된다(Fig. 4). 이 때 가해진 전기장과 V_m 사이에는 식 (13)으로 나타낼 수 있다(Hulsheger 등, 1983).

$$V_m = f \cdot a \cdot E \quad (14)$$

여기서 f 는 미생물 세포의 형태 계수(구형인 경우 1.5), a 는 세포의 반경이다. 만약 길이가 L 이고 반구 직경이 d 인 원통형 세포인 경우 f 는 식 (14)와 같이 나타내어진다(Zimmermann 등, 1974).

$$f = \frac{L}{L - d/3} \quad (15)$$

V_m 이 임계값(critical potential, E_c , 약 1 V) 이상이 되면 세포막내에 세공(pores)이 형성된다(Knorr 등, 1994).

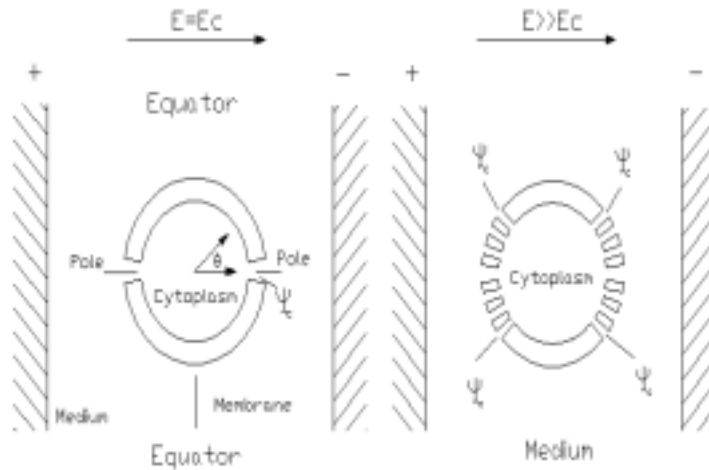


Fig. 4. Induction of transmembrane potential in a cell exposed to an external electric field (Knorr et al., 1994).

(2) 세포막의 압축 이론

세포막의 압축 이론은 고전압 전기장에서 세포막이 압축되는 이론이다. 세포막은 낮은 유전 상수(dielectric constant)를 갖는 유전체, 즉 부도체로서 축전지와 비슷한 성질을 갖는다. 대개 세포막은 2 정도의 유전상수를 갖고, 세포내의 유전상수는 세포막보다는 높은 값을 갖는다. 세포가 현탁되어 있는 용액의 유전상수가 세포막의 유전상수보다 크게 되면 세포막의 안과 밖에 자유 전자가 축적하게 되고, transmembrane potential이 증가하게 된다. 따라서 세포막 안과 밖에 축적된 반대 극성을 갖는 자유 전자는 전기적 인력에 의해 세포막의 전기 압축을 일으키게 된다. 전기 압축에 의한 힘이 세포막의 탄성 이상이 되면 세포막에 세공이 형성되고, 계속되는 압축에 의해 형성된 세공이 커지면서 세포의 내부 물질의 유출 등에 의한 기능의 상실로 인하여 사멸하게 된다(Fig. 5)(Zimmermann, 1986; Mertens 등, 1992; Castro 등, 1993).

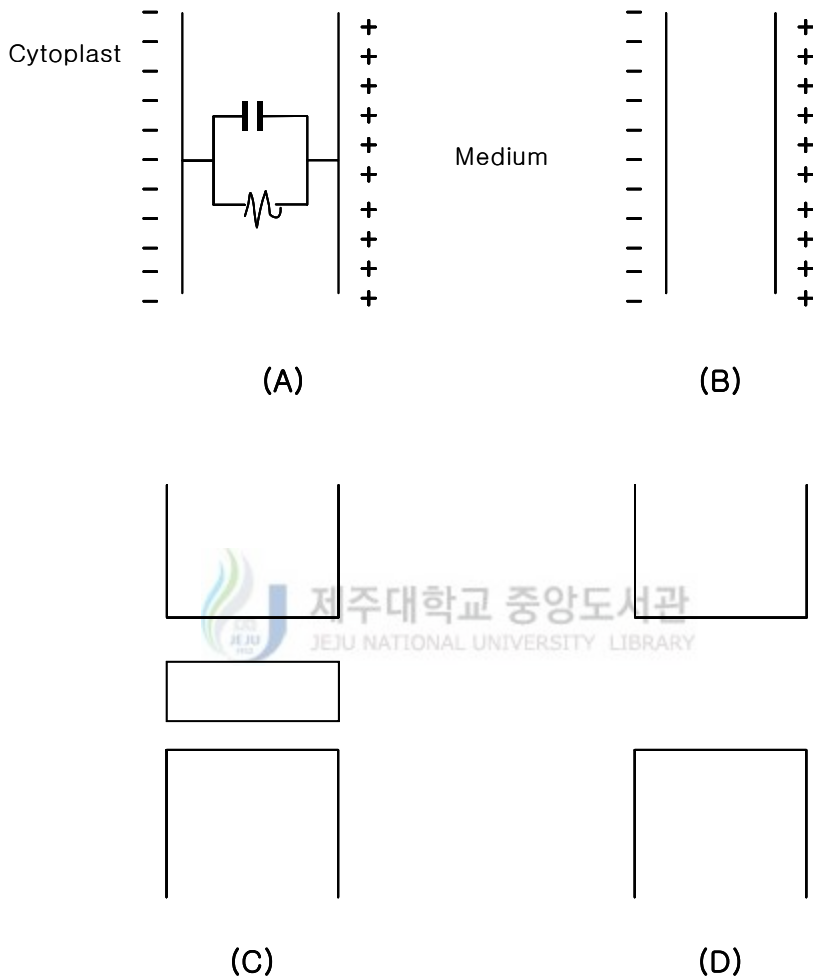


Fig. 5. Electroporation of cell membrane by compression when exposed to a high voltage pulse electric field. Accumulation of transmembrane electric potential (A), compression of membrane (small pore formation), $V < 1$ (B), reversible breakdown of membrane, $V = 1$ (C), irreversible breakdown of membrane (large pore formation), $V \gg 1$ (D).

(3) 삼투압에 의한 팽윤 이론(Tsong, 1990; Vega-Mercado 등, 1996a)

외부로부터 자장을 걸면 세포막 주위에 전하량이 축적되어 세포막의 압축과 미세 기공의 생성에 의해 미세 물질의 세포막의 투과성이 증가하게 되고(electroporation), 이로 인해 세포내의 삼투압은 물의 유입을 촉진하게 되어 세포는 팽윤되고 결국 세포막은 파괴되어 미생물은 사멸한다는 이론이다(Fig. 6).

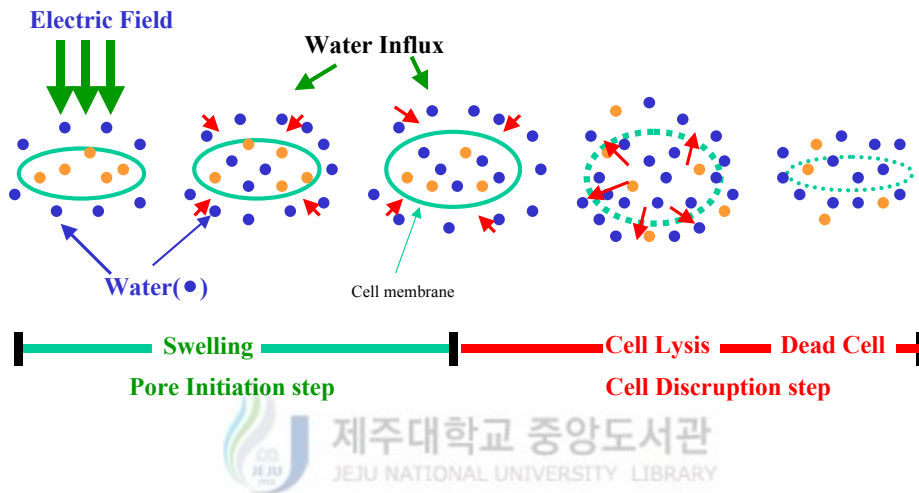


Fig. 6. Cell inactivation due to the osmotic imbalance across the cell membrane induced by its poration (Tsong, 1990).

(4) 유동막 이론(fluid-mosaic model), 세포막의 구조적 결합이론

전기장에 의한 미생물 사멸은 세포막은 지질과 단백질로 구성되어 있는 fluid-mosaic model 및 세포막의 구조적 결합이론으로도 설명하고 있다. 즉, fluid-mosaic model에서 세포막의 지질 이중층내에 포함되어 있는 단백질이 전기장이 없을 경우에는 고유의 기능을 유지하다가 세포가 전기장에 노출되면 압축이 일어나고 단백질이 conducting channel을 형성하면서 세포막의 투과성을 증가시키게 되어 대사활동 등 세포의 고유 기능에 손상을 일으켜 사멸에 이르는 것으로 보고하고 있다 (Zimmermann, 1986).

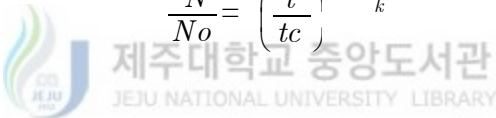
그리고 세포가 전기장에 노출되었을 때 세포막내 친수성 또는 소수성 세공의 형성에 의한 세포막의 기능 손상, 능동수송의 기능 손상 등 전기장에 의한 세포막의 구조적 결합에 의해서도 사멸된다고 보고되고 있다(Glaser 등, 1988).

2) 미생물 사멸에 미치는 영향인자

고전압 펄스 전기장에 의한 미생물 사멸에는 전기장의 세기, 처리시간, 펄스의 형태, 온도 등 공정 변수외에 미생물의 종류와 상태, 생육조건, 생육단계, 미생물 농도 등 미생물학적 요인, 시료의 pH, 전기전도도, 점도, 고형분의 존재 등 외부조건 요인 등 여러 인자가 관여하고 있으나 가장 직접적인 영향 인자는 전기장의 세기와 처리시간이다(신과 박, 2000). 이들 인자에 대해 보고된 내용을 살펴 보면 다음과 같다.

(1) 전기장의 세기와 처리시간의 영향

Hulsheger 등(1981)은 광범위한 실험적 연구를 통해 미생물의 사멸율과 전기장의 세기, 처리시간(펄스의 폭 x 펄스의 수)에 대해 다음과 같은 식 (16)를 제시하였다. 식 (15)의 양변을 대수로 하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{t}{t_c} \right)^{-\frac{E-E_c}{k}} \quad (16)$$


$$\log \frac{N}{N_0} = - \left(\frac{E-E_c}{k} \right) \log \left(\frac{t}{t_c} \right) \quad (17)$$

여기서 N_0 는 초기 균수, N 은 t 시간에서 균수, T_c 및 E_c 는 임계처리시간 및 임계 전기장 세기, E 는 걸어준 전기장의 세기, k 는 미생물이 갖는 고유상수로 미생물의 종류에 따라 다르다.

식 (17)은 미생물의 대수 생존율은 전기장의 세기에 직선적으로, 처리시간에 대해서는 대수적으로 영향을 미치는 것을 보여주고 있다. 그러나 이러한 관계가 모든 미생물에 대해 적용되는 것은 아니라고 보고되고 있다. 즉, Jung 등(2000)은 *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens*의 사멸속도는 전기장의 세기 또는 처리시간에 대해 식 (18) 및 식 (19)와 같이 1차반응속식에 따랐다고 보고하고 있다.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k_E (E - E_c) \quad (18)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = -k_t (t - t_c) \quad (19)$$

그리고 펄스 전기장에 의한 사멸은 전기장의 세기와 처리시간 이외에도 펄스의 형태, 온도, 미생물의 종류와 상태, 사용 시료 등의 여러 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 일반화된 사멸속도식을 제안하지 못하여 이에 대한 많은 연구가 필요하다고 제안하고 있다.

(2) 펄스 형태의 영향

고전압 펄스 전기장의 펄스 형태는 상기 II-1-1)에서 언급한 바와 같이 펄스 파형은 크게 exponential decay pulse와 square wave pulse로 나눌 수 있으며, 또한 극성에 따라 단방향 펄스(monopolar pulse)와 양방향 펄스(bipolar pulse)로 구분되어 지고, square wave pulse는 exponential decay pulse보다 에너지 효율이 우수하여 미생물 사멸이 더 효과적이며, bipolar pulse는 monopolar pulse보다 사멸효과가 높으므로 보고되고 있다(Qin 등, 1994; Zhang 등, 1994).

(3) 온도의 영향

고전압 펄스 전기장에 의한 미생물의 살균이 60℃ 이하의 낮은 온도범위에서 일어날지라도 처리 온도가 높을수록 사멸효과가 현저히 증가하는데, 이는 세포막의 유동성과 깊은 관련을 갖고 있다고 보고하고 있다(신, 2000). 낮은 온도에서 세포벽 또는 세포막 주 구성 성분인 인지질은 견고한 gel 구조로 촘촘하게 압축된 상태를 갖는 반면 높은 온도에서는 덜 정돈된 liquid crystalline 구조를 갖게 된다. 즉, Gel 구조에서 liquid crystalline 구조로의 상변화는 온도와 높은 상관성을 가지므로 세포막의 물리적 안정성에 영향을 준다. Zimmermann(1986)과 Jayaram 등(1992)은 온도가 상승하면 세포막 구성성분인 지질의 측면 확산속도(lateral diffusion rate)가 증가되어 gel 구조에서 liquid crystalline 구조로 변하는 것으로 보고하고 있다. 따라서 처리 온도가 높고, 강한 전기장을 가하거나 처리시간이 길어져 온도가 상승하게 되면 미생물의 세포막은 더 큰 유동성을 갖게 되어 전기장에 민감하게 반응하게 된다.

(4) 미생물학적 영향

미생물의 종류와 크기, 형태, 생리적 상태, 생육조건, 생육단계, 미생물 농도 등 미생물학적 요인 또한 미생물의 사멸율에 영향을 미치는 인자로서 일반적으로 세균보

다는 효모가, gram-negative가 gram-positive보다 그리고 spore보다는 영양세포의 사멸율이 크고, 생육단계별 영향은 일반적으로 정지기의 세포(완숙세포)보다는 증식기의 세포(미숙세포)가 사멸율이 높다고 보고되고 있다(Yiping, 1996; Marquez 등, 1997; 신, 2000). 세포는 정지기에 접어 들면 온도의 상승이나 산화, 고염도 등의 외부적 요인에 의한 스트레스에 대해 스스로를 방어하기 위해 새로운 단백질을 합성하여 세포 표면에 층을 형성하므로 정지기의 세포는 대수 증식기의 세포에 비해 외부 스트레스에 큰 저항성을 갖게 되어 고전압 펄스 전기장에 의해서도 대수 증식기에 비해 낮은 민감성을 나타내게 된다고 알려져 있다.

고전압 펄스 전기장에서 미생물의 사멸율에 미치는 이의 농도의 영향에 대한 보고된 논문을 살펴 보면, Zhang 등(1994)은 초기 균체량을 10^6 , 10^5 , 10^4 CFU/mL로 하여 고전압 펄스 전기장으로 처리하였을 경우 초기 균체량이 적을수록 사멸율이 크다고 하였으나 다른 실험에서 다시 Zhang 등(1995)은 초기 균체량이 세포의 사멸에 영향을 미치지 않는다고 하였다. 신(2000)은 *Saccharomyces cerevisiae*의 초기 균체량을 10^7 , 10^6 , 10^5 CFU/mL로 조정하여 교반하면서 50 KV/cm, 40℃에서 고전압 펄스 전기장에 의한 사멸율을 검토한 결과 초기 균체량이 감소할수록 사멸율은 약간씩 증가하는 경향을 보였으나 그 차이는 매우 작았다고 보고하였다.

(5) 환경요인의 영향

시료의 pH, 이온종류, 이온강도(전기전도도), 고형물 존재 등 환경요인은 미생물의 사멸율에 영향을 미치는 주요 변수가 될 수 있다.

① pH의 영향

미생물 세포들은 외부 환경에 관계없이 proton pump에 의하여 cytoplasmic pH를 중성에 가깝게 유지하고 있으나(Vega-Mercado 등, 1996b), 고전압의 전기장이 세포에 인가되면 세포막이 형성되면서 세포막의 투과성이 증가하게 되고, 세포막은 삼투압의 불균형을 일으켜 세포내로의 H^+ 이온의 유입속도가 커지고 이로 인해 cytoplasmic pH가 감소하게 되고 심할 경우 DNA나 ATP와 같은 세포의 기본 구성물질이 화학적 변화를 일으키게 된다(Wiggins, 1975; Dolowy, 1975). 이 때 세포 내부로 유입된 H^+ 를 세포외로 방출하기 위하여 H^+ -ATPase를 작동하게 되는데, 이러

한 미생물의 'proton motive force (PMF)'에 의한 pH 항상성 유지에는 다량의 에너지가 소모되어 결국에는 다른 대사활동에 지장을 초래하게 되어 외부 충격에 대한 저항성이 감소하게 된다(Padan 등, 1981; Booth, 1985).

신(2000)은 고전압 펄스 전기장(50 KV/cm, 40°C)으로 처리시 *Saccharomyces cerevisiae*의 사멸에 미치는 시료 pH(4-9)의 영향을 검토한 결과 중성에서 산성 또는 알칼리성으로 갈수록 사멸효과가 현저하게 증가하였다고 보고하였다. 즉, 중성 이외의 pH 영역에서는 proton pump 또는 H^+ -ATPase 작동에 따른 다량의 에너지가 소모되어 외부 충격에 의한 저항성이 감소되어 사멸율은 증가되는 것으로 판단된다. 그러나 Vega-Mercado 등(1996b)은 20 KV/cm의 낮은 전기장 세기에서는 pH, 온도와 관계없이 유의성이 없는($P>0.05$) 미생물의 불활성화를 초래한다고 보고하고 있다. 또한 그들은 전기장의 세기가 40-55 KV/cm 에서는 pH가 중성에서 산성쪽으로 갈수록 사멸율은 증가하였다고 보고하였다.

② 이온종류 및 이온강도의 영향

시료내의 이온들은 전하의 전달체로서 각각의 전하량에 따라 전류의 흐름이나 저항성에 영향을 미친다. 또한 H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 같은 이온들은 배양 중이나 배양 후 시료 용액 중에 존재할 경우 세포막의 투과성에 큰 영향을 미치고 세포막의 손상에도 관여한다(Wang 등, 1979; Schubert, 1987; Tedeachi, 1993). 세포외액에 H^+ 나 Ca^{2+} 이 세포내의 농도보다 높은 농도로 존재할 경우 세포는 쉽게 세포내로 이들 이온을 유입하여 세포내의 H^+ , Ca^{2+} 농도를 상승시키게 되며 이로 인하여 세포막에 손상을 주게 되며(Henry, 1993), Mg^{2+} 이온 등은 세포막의 유동성을 증가시키는 역할을 한다(Wang 등, 1979). 신(2000)은 고전압 펄스 전기장에서 1가 이온(Na^+ , K^+)과 2가 이온(Ca^{2+} , Mg^{2+}) 등이 미생물의 사멸에 미치는 영향을 검토한 결과 2가 이온이 1가 이온보다 현저한 사멸 상승효과를 보였으며, 같은 1가 이온과 2가 이온 사이에서는 서로 간에 큰 영향을 찾아 볼 수 없었다고 보고하였으며, Ho와 Mittal(1996) 역시 electroporation시 같은 전하량을 갖는 이온들에 의해 영향을 받지 않는다고 보고하였다.

시료의 이온강도는 전기전도도와 밀접한 관계가 있어, 이온강도가 커질수록 전기전도도는 커지게 된다. 이러한 전기전도도는 고전압 펄스 전기장으로 처리시에 시료

내의 전기장의 형성, 전류의 흐름 등에 영향을 주어 미생물 사멸에 많은 영향을 미친다. Electroporation이나 electrofusion 등과 같이 생물에 전기적 조작을 가하였을 경우나 효소의 불활성화 등의 보고에 의하면 일정범위까지는 전기전도도가 증가할수록 사멸 효율이 증가하나(Gaskova 등, 1996; Saravia 등, 1996; 신, 2000) 일정 이상으로 이온강도가 증가하여 전기전도도가 더욱 커지면 미생물 사멸율은 오히려 감소하게 된다(Hulsheger 등, 1981; Vega-Mercado 등, 1996b). 신(2000)은 *Saccharomyces cerevisiae*에 대해 각기 다른 농도의 인산 완충액(0.005 M - 0.1 M, pH 7)에서 50 KV/cm, 40℃로 처리하였을 때 이온의 농도가 증가할수록 사멸율은 증가하였다고 보고하였다. 그러나 Vega-Mercado 등(1996b)은 40 KV/cm, 10℃의 조건에서 *E. coli*의 사멸율에 미치는 이온강도(0.028-0.168 M)의 영향을 검토한 결과 이온강도가 증가할수록 사멸율은 감소하였다고 보고하였다. 즉, 이온강도가 0.028 M일 경우가 0.168 M일 경우 보다 2.5 log 배 사멸율이 증가하였으며, 이는 세포막의 안정성으로 설명할 수 있다고 보고하고 있다.

③ 고형물 존재의 영향



기타 시료 중에 고형물이 존재할 경우 이는 전류의 흐름이나 저항성에 영향을 주어 미생물의 사멸에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

Ⅲ. 재료 및 실험방법

1. 재료 및 실험장치

본 연구에서 시료로 사용된 하수처리장 방류수는 제주시 하수종말처리장의 소독공정 이전의 방류수를 채수하여 그대로 사용하였으며, 이의 수질특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Water quality characteristics of the effluents used in this study

Items	Range
pH	6.6-7.0
EC(mS/cm)	2.8-3.7
BOD(mg/L)	3.2-10.0
COD(mg/L)	8.6-11.5
SS(mg/L)	2.4-9.8
Cl ⁻ (mg/L)	550-782
NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	4.1-9.5
T-N(mg/L)	12.3-19.7
T-P(mg/L)	1.1-1.9
Coliform group(CFU/mℓ)	6,000-8,000
Ca(mg/L)	16.5-20.3
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	65.3-102.5
K(mg/L)	26.7-35.9
Mg(mg/L)	7.5-10.2
Na(mg/L)	29.3-40.1

대장균군 소독효과를 검토하기 위하여 사용된 실험장치는 입력전압을 조절하는 Transformer, 입력전압으로부터 고전압을 유도하는 고전압 발생장치(Power supply, AC, DC용), 펄스 발생기(Pulse Genertor, 고전압 발생장치가 DC용인 경우), 전압 등을 측정하기 위한 Digital Oscilloscope(TDS 3032, Tektronix), 고전압발생장치로부터 유도되는 고전압 전기장이 제공되는 방전관(Dischae tube), 시료탱크, 시료탱크로부터 방전관으로 시료를 일정 속도로 유입하는 Peristaltic pump 등으로 구성하였다 (Fig. 7 참조).

전기장 발생 장치는 두가지 형태의 전기장 발생장치 즉 고전압 펄스 발생장치와 고전압 교류 전기장 발생장치를 사용하였다. 고전압 펄스 전기장 발생장치는 직류 (DC) 고전압 발생부와 펄스 발생기로 구성되어 있고, 펄스 발생기의 회로는 Fig 3과 같다. 이때 발생하는 직류 펄스는 최대 30 kV의 전압과 40 Hz을 갖도록 설계되었으며, 파형은 monopolar exponential decay pulse이다. 고전압 교류 전기장 발생장치는 입력전압에 따라 최대 인가전압 12 kV, 20 kHz의 주파수를 갖을 수 있도록 주문 제작하여 사용하였다.

Fig. 8은 방전관 내·외부의 구조를 나타낸 그림으로, 방전관은 시료수의 유출입부, 내부 백금 전극(ϕ 1 mm)과 전극 지지대, 방전관 외부면에 테이핑 된 4개의 Cu 테이프 전극 (각 Cu 테이프의 길이= 35 mm), 그리고 비유전율(ϵ_r)이 3.7인 SiO_2 를 충전한 외경 24 mm, 길이 800 mm인 pyrex관으로 구성되어 있고, 동전극에 고전압 전기장이 걸려 있다. 그리고 방전관은 수류의 흐름과 균일한 수중 전계 분포를 고려하여 동축 실린더형을 사용하였다. 본 연구에서 방전관 내부에 유전체인 SiO_2 를 충전하여 사용한 이유는 다음과 같다.

본 방전관에서와 같이 내부에 구형의 SiO_2 를 유전체를 충전할 경우 다중(多種)의 유전체를 방전 영역에 충전 가능하기 때문에 기본적인 전기장의 분포 특성은 이론적 고찰에서 언급한 식 (3) ($E= V/d$)만으로 설명하기는 어렵고, 식 (20)과 같이 유전체의 유전율(ϵ_r)과 전기력선밀도(D)의 관계의 복합적인 관계식으로 나타내는 것이 일반적이다.

$$E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (20)$$

그리고 수식 (20)에서 인가전압이 일정하게 유지되면 전기력선속밀도도 일정하다고 볼 수 있다. 이 경우 구형 SiO_2 유전체의 비유전율이 가변적이 되어 방전관 내의 수중 최대 전기장은 SiO_2 를 충전하지 않은 경우보다 증가하여 수 중 미생물 사멸은 증가할 것으로 사료된다. 이와 박(2004)은 구형의 ZrO_2 유전체를 충전할 경우 방전관내의 최대 전기장은 2-3배 증가하고, 또한 수중 이온화 물질의 양이 증가하여 대장균의 사멸율은 증가한다고 보고하였다.

SiO_2 를 방전관 내부에 충전하였을 경우 방전관 내부의 전기장 분포 특성을 해석한 바에 의하면 방전관과 유전체구가 맞닿는 부분, 유전체구 부근의 수중부 그리고 유전체구의 표면에서 강한 전기장이 발생하며, 즉, 인가된 전압이 10 kV일 때, 최대 전기장이 약 36 kV/cm 가 발생하게 되고, 구형 유전체의 표면과 유전체구 부근 수중의 전계는 약 8 kV/cm 정도 전기장이 집중되며, 방전관과 구형 유전체가 맞닿는 부분에서는 약 23 kV/cm 정도의 강한 전계가 집중된다고 보고하였다(이, 2004).



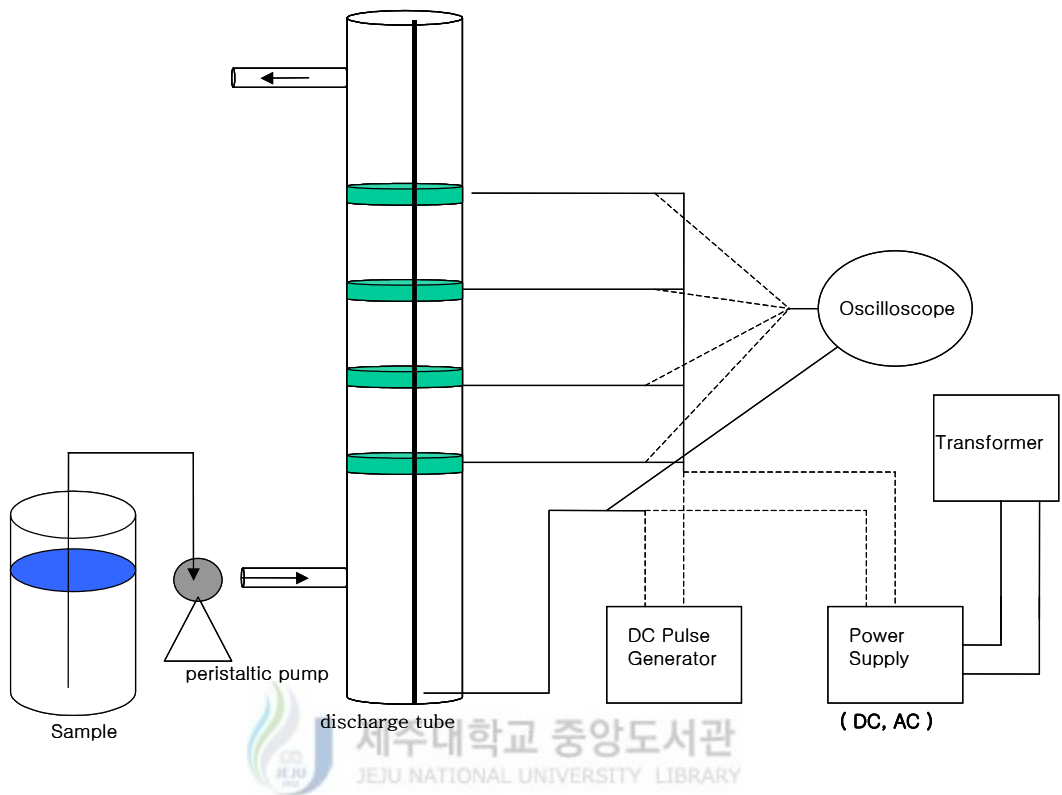


Fig. 7. Schematic diagram of experimental set-up for high voltage AC & pulsed(DC) electric field treatment.

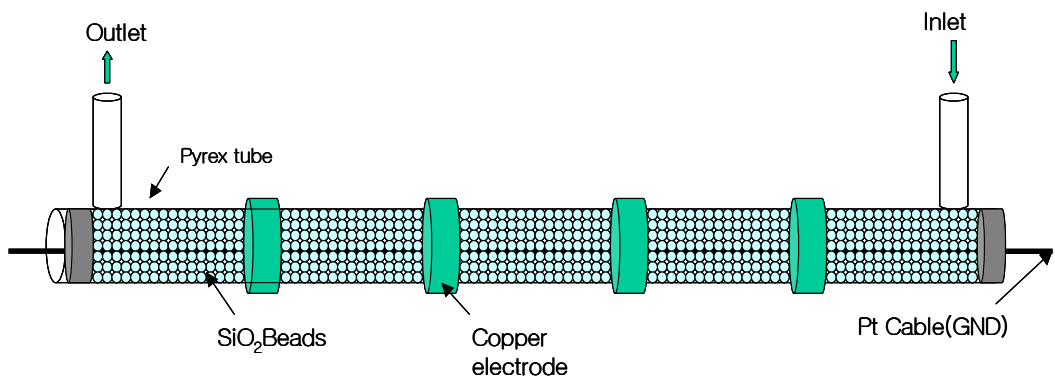


Fig. 8. The structure of a discharge tube.

2. 실험 방법

본 연구에서 고전압 전기장에 의한 대장균군 소독 실험은 시료탱크 중의 방류수를 peristaltic pump를 이용하여 방전관으로 이송하여 방전관이 완전히 채워진 후에(이 때 방류수 부피는 120 mL임), 고전압 전기장 장치의 주요 인자인 전기장의 세기, 처리시간, 방전면적과 방류수 수질 인자인 pH, 이온강도 및 SS의 영향을 검토하였다.

미생물 사멸에 미치는 가장 직접적인 인자인 전기장의 세기 및 처리시간의 영향은 고전압 교류 전기장 발생장치는 전기장의 세기를 10-12 kV/cm, 20 kHz의 주파수의 조건에서, 고전압 펄스 전기장인 경우 전기장의 세기를 20-30 kV/cm, 40 Hz의 조건에서 처리시간을 1-60분으로 조절(이는 peristaltic pump를 이용하여 방전관내로 이송되는 유속을 2-120 ml/min 조정하였음)하여 측정하였다. 방전면적, pH, 이온강도 및 SS의 영향은 고전압 교류 전기장 발생장치로부터 유도되는 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 이용하여 검토하였다. 방전면적에 따른 영향은 방전관 외부에 부착된 4개의 Cu 적극을 순차적으로 차단하여(즉, 방전면적을 26.4-105.6 cm²로 변화시켜) 검토하였으며, pH는 0.1N-H₂SO₄/NaOH로 방류수의 pH를 5-9로 변환시켜 살펴보았으며, 이온강도(전기전도도)에 따른 영향은 방류수에 NaCl, KCl, CaCl₂ 및 MgCl₂를 사용하여 전기전도도를 전기전도도계(YSI Model 35, USA)를 사용하여 각각 4.0-9.0 mS/cm로 조절하여 검토하였고, SS 농도에 따른 영향을 관찰하기 위하여 G/F 여지로 여과한 시료를 SS 농도가 0인 시료로 하고 이 시료에 방류수를 정지한 후 형성된 침전물을 일정량씩 가하여 SS 농도를 0-24 mg/l의 4단계로 조정하여 살펴 보았다. 이상의 모든 실험은 각각 5회 반복하여 그 결과를 산술평균하였다. 본 연구에 사용된 실험조건을 요약하면 Table 2와 같다.

대장균군수는 수질오염공정시험방법에 규정된 최적확수 시험법, 막여과 시험방법, 평판집락 시험방법 중 수질환경보전법 제 8조의 배출허용기준에 규정한 대장균군수에 적용하는 평판집락 시험방법에 따라 분석하였으며, 처음 검체 중에 함유되어 있던 미생물 이외 다른 미생물 오염이 조작 중에 일어날 수 있으므로 모든 실험은 무균조작을 하였다.

Table 2. Summary of experimental conditions

Factor		Power supply source	Variables
Electric field strength		High voltage pulsed(DC) electric field generator	20-30 kV/cm 40 Hz
		High voltage AC electric field generator	10-12 kV/cm, 20 kHz
Treatment time		High voltage pulsed and AC electric field generator	1-60 min
Discharge area		High voltage AC electric field generator (12 kV/cm, 20 kHz)	26.4-105.6 cm ²
Effluent	pH		5-9
	Ionic strength (electric conductivity)		4.0-9.0 mS/cm with NaCl, KCl, CaCl ₂ and MgCl ₂
	SS		0-24 mg/ℓ

IV. 결과 및 고찰

1. 전기장 세기와 처리시간에 따른 영향

일반적으로 고전압 펄스 전기장 처리시 전기장의 세기는 앞서 언급한 바와 같이 미생물의 사멸과 아주 밀접한 관계를 갖고 있다. 미생물 세포의 세포막 전위차 (transmembrane potential, V_m)는 인가되는 전기장의 세기가 커짐에 따라서 비례하여 증가하므로 미생물의 사멸율은 증가하고, 이는 미생물의 종류에 따라 다르다고 보고하고 있다(신, 2000). 즉, V_m 과 미생물의 종류(형태(f)와 반경(a))와 전기장의 세기(E)와의 관계는 이론적 고찰에서 언급한 식 (14) ($V_m = f \cdot a \cdot E$)로 표현할 수 있으며 (Hulsheger 등, 1983), V_m 이 1 V 이상이 되게 되면 미생물은 세포막에 세공을 형성하면서 사멸이 시작되므로 미생물의 크기가 커지면 적은 전기장으로도 쉽게 사멸을 유도할 수 있게 된다. 그리고 고전압 전기장에 의한 미생물의 사멸율은 임계 전기장 세기(E_c) 이상에서 전기장의 세기가 증가할수록 식 (18) ($\log \frac{N}{N_0} = -k_E(E - E_c)$)에 서와 같이 지수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Hulsheger 등, 1981). 여기서 E_c 는 미생물의 생존율(N/N_0)이 1.0이 되는 값으로 외삽한 값으로 미생물이 사멸하기 시작하는 최소 전기장의 세기를 나타낸다.

고전압 교류 전기장 장치(10-12 kV/cm, 20 kHz) 및 펄스(DC) 전기장 장치(20-30 kV/cm, 40 Hz)로부터 유도되는 고전압 전기장의 세기의 처리시간을 달리 하였을 때 대장균군 생존율을 각각 Fig. 9 및 10에 나타내었고, 이로부터 구한 E_c , 사멸속도 상수 (k_E) 및 결정계수(r^2)를 Table 3에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 전기장 세기가 증가함에 따라 대장균군 사멸율은 증가함을 알 수 있었고, 또한 일정한 처리시간에서 전기장 세기에 따른 대장균군 대수 생존율은 직선적으로 감소하여 식 (18)에 잘 부합됨을 알 수 있었고, 외삽하여 구한 각 전기장의 E_c 는 각각 6 kV/cm, 2 kV/cm를 나타내었다. 그리고 Table 3에서 보여지는 바와 같이 처리시간이 증가할수록 대장

균군의 사멸속도 상수는 크게 증가함을 알 수 있었다. 즉, 고전압 교류 전기장의 경우 10분에서 60분으로 처리시간이 증가함에 따라 사멸속도 상수는 0.0334에서 0.3143으로 약 10배 증가하였고, 고전압 펄스 전기장의 경우 5분에서 30분으로 증가함에 따라 0.0077에서 0.0739로 역시 약 10배 증가하였다.

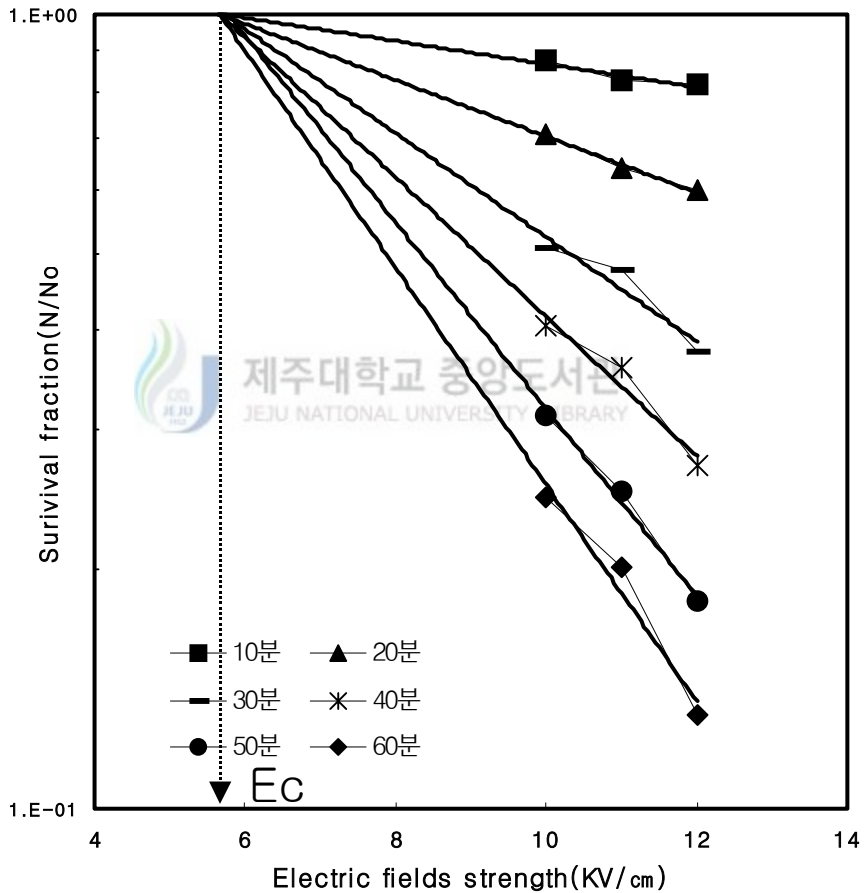


Fig. 9. Survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage AC electric field generator (20 kHz, N_0 : $6,500 \pm 500$, pH 6.8 ± 0.2 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$).

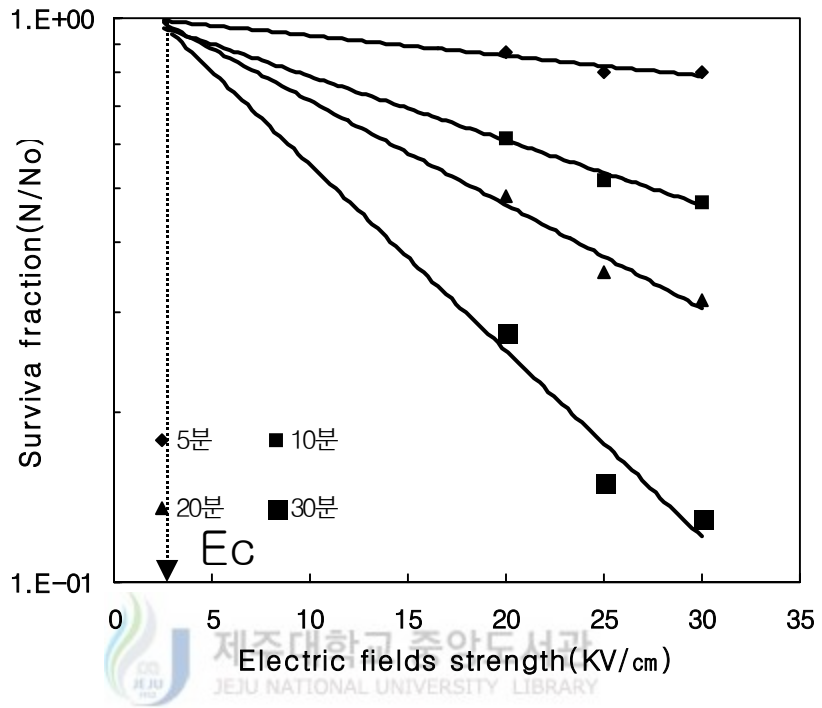


Fig. 10. Survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage pulsed electric field generator (40 Hz, N_0 : 6,500±500, pH: 6.8±0.2, Temp.: 20±1°C).

Table 3. The values of critical electric field (E_c) and death rate constant (k_E), and determination coefficients (r^2) obtained from the survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage AC and pulsed electric field generator

Power supply source	Treatment time (min)	E_c (kV/cm)	k_E	r^2
High voltage AC electric field generator	10	6	0.0334	0.9512
	20		0.0816	0.983
	30		0.1508	0.9038
	40		0.2022	0.9447
	50		0.2706	0.989
	60		0.3143	0.9612
High voltage pulsed electric field generator	5	2	0.0077	0.9458
	10		0.0264	0.9737
	20		0.0416	0.9449
	30		0.0739	0.9488

Hulsheger 등(1981)은 미생물의 대수 생존율은 식 (17) ($\log \frac{N}{N_0} = -\left(\frac{E-E_c}{k}\right)\log\left(\frac{t}{t_c}\right)$)과 같이 처리시간에 대해 대수적으로 영향을 미친다고 보고하였다. 그러나 Jung 등(2000)은 *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens*의 사멸속도는 처리시간에 대해 식 (18) 및 식 (19) ($\log \frac{N}{N_0} = -k_i(t-t_c)$)와 같이 1차반응속식에 따랐다고 보고하고 있다. 임계 처리시간 t_c 는 미생물을 사멸하기 위해 필요한 최소 처리시간을 나타내며, 일반적으로 전기장의 세기와 처리온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다고 보고하고 있다(정, 1999).

상기 고전압 전기장에서 대장균군 대수 생존율을 다른 전기장에서 처리시간에 따른 함수관계를 Fig. 11 및 12에 나타내었다. 이로부터 구한 파라미터, 즉 임계 처리시간 (t_c), 사멸속도 상수(k_t) 및 결정계수(r^2)를 Table 4에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 처리시간이 증가함에 따라 대장균군 사멸율은 증가함을 알 수 있었고, 또한 일정한 전기장 세기에서 처리 시간에 따른 대장균군 대수 생존율은 직선적으로 감소하여 식 (19)에 잘 부합됨을 알 수 있었고, 외삽하여 구한 각 전기장의 t_c 는 각각 5 분, 2분으로 전기장의 세기에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 이러한 결과는 정(2000)이 보고한 고전압 펄스 전기장을 이용하여 우유 중의 *E. coli*, *Ps. fluorescens* 및 *B. stearothermophilus*의 살균시 전기장의 세기가 증가함에 따라 감소한다는 결과와 차이를 보였는데, 이러한 결과는 사용 전기장의 세기, 펄스의 종류, 처리시간, 매질의 특성 등 다양한 요인에 기인하는 것으로 사료된다. 그리고 Table 4에서 보여지는 바와 같이 전기장의 세기가 증가할수록 대장균군의 사멸속도 상수(k_t)는 크게 증가함을 알 수 있었다. 즉, 고전압 교류 전기장의 경우 10 kV/cm에서 12 kV/cm로 증가함에 따라 k_t 는 사멸속도 상수는 0.0238에서 0.0352로 약 1.5배 증가하였고, 고전압 펄스 전기장의 경우 20 kV/cm에서 30 kV/cm로 증가함에 따라 0.0417에서 0.0683로 역시 약 1.6배 증가하였다.

Fig. 13은 본 연구에 사용된 교류 전기장과 펄스 전기장의 30분 처리시간에서 전기장의 세기에 따른 대장균군 사멸율을 비교한 것으로, 교류 전기장의 경우 10 kV/cm, 11 kV/cm, 12 kV/cm에서 각각 49%, 52%, 63%의 사멸율을, 펄스 전기장의 경우 20 kV/cm, 25 kV/cm, 30 kV/cm에서 각각 72%, 84%, 87%의 사멸율을 보여 펄스 전기장의 경우가 교류 전기장의 경우보다 1.14-1.78배 높았으나 전기장의 세기에 직선적으로 비례하지 않았다. 이는 식 (8) ($Q = \frac{V^2 \cdot C \cdot n}{2v} = \frac{V^2 \cdot t}{2Rv}$)에서와 같이 대장균군에 전달되는 에너지의 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 교류 전기장의 경우 20 kHz의 주파수의 펄스를 사용하였고, 펄스(직류) 전기장의 경우 40 Hz의 펄스를 사용하였으며, 또한 사용 전기장에 따라 펄스의 폭도 차이가 나기 때문인 것으로 사료된다.

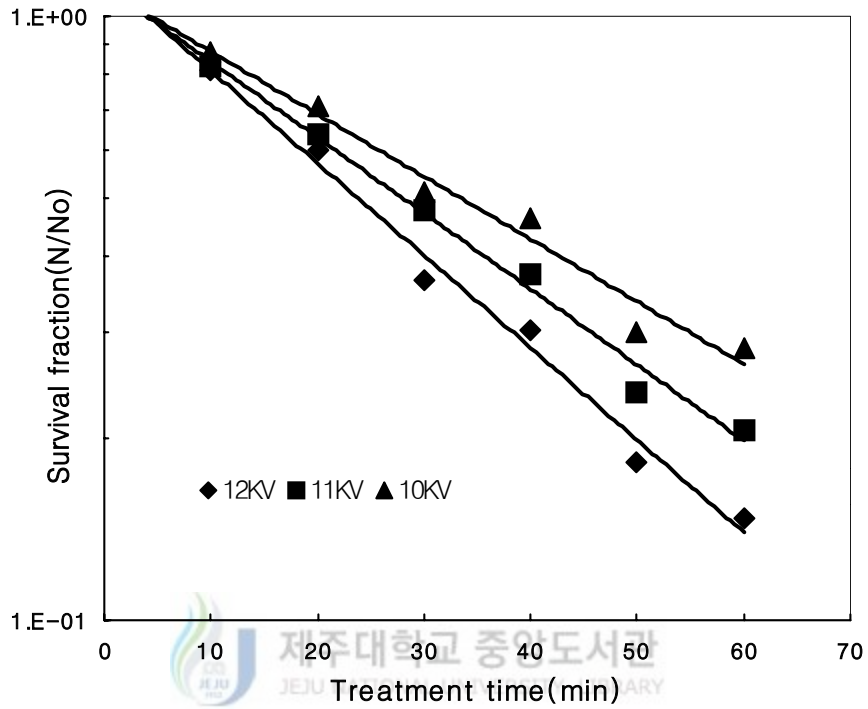


Fig. 11. Survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage AC electric field generator (20 kHz, N_0 : 6,500±500, pH 6.8±0.2, Temp.: 20±1°C).

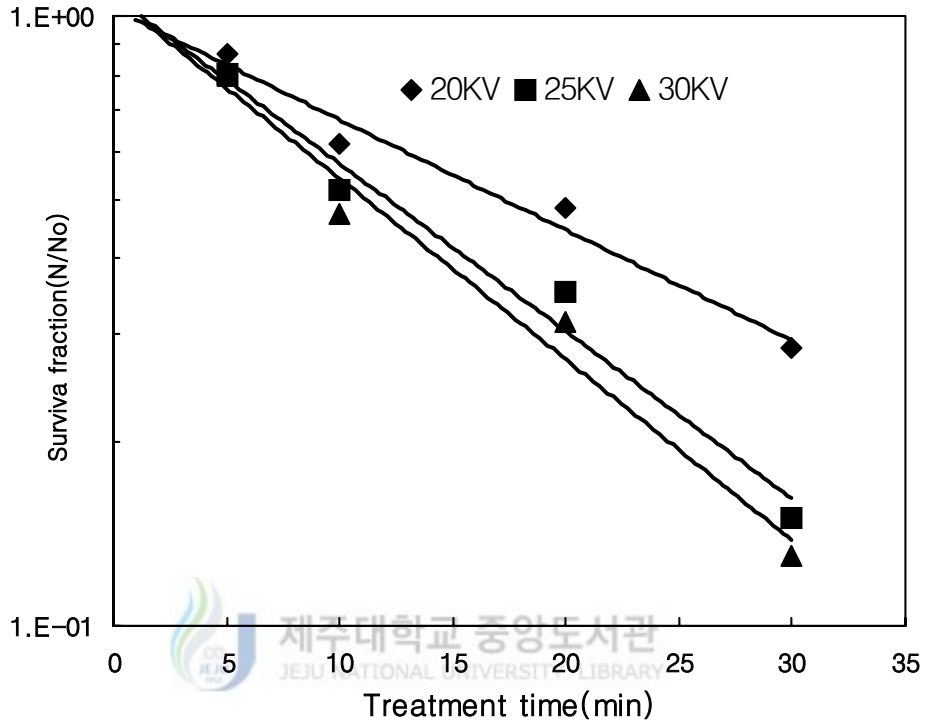


Fig. 12. Survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage pulsed electric field generator (40 Hz, N_0 : $6,500 \pm 500$, pH 6.8 ± 0.2 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$).

Table 4. The values of critical treatment time (t_c) and death rate constant (k_t), and determination coefficients (r^2) obtained from the survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage AC and pulsed electric field generator

Power supply source	Electric field strength (kV/cm)	t_c (min)	k_t	r^2
High voltage AC electric field generator	10	5	0.0238	0.9725
	11		0.0289	0.9895
	12		0.0352	0.9882
High voltage pulsed electric field generator	20	2	0.0417	0.9725
	25		0.0633	0.975
	30		0.0683	0.9743

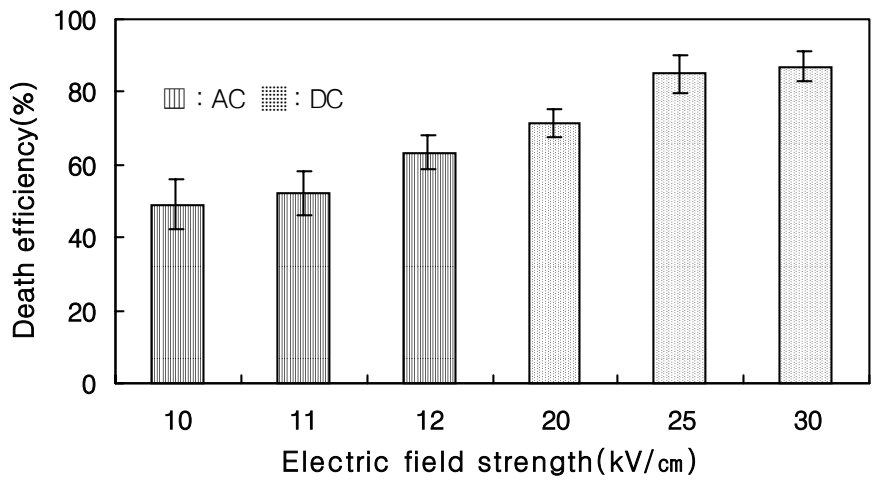


Fig. 13. Comparison of death rate of coliform group with electric field strength induced by high voltage AC (20 kHz) and pulsed electric field generator (40 Hz) at treatment time of 30 min (N_0 : $6,500 \pm 500$, pH 6.8 ± 0.2 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$).

2. 방전면적 변화에 따른 영향

고전압 교류 전기장 발생장치(12 kV/cm, 20 kHz)를 Fig. 8에 있는 동일한 면적을 가지는 Cu 전극(외부전극, 각각 26.4 cm²)에 각각 연결하여 반응관 외부에 부착된 Cu 전극을 순차적으로 차단하여 Cu 전극의 방전면적을 변화시켜 대장균군의 사멸율을 측정한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 상기 고전압 교류 전기장을 각각의 Cu 전극에 각각 1개, 2개, 3개, 4개 연결하여 방전면적을 26.4, 52.8, 79.2 및 105.6 cm²로 변화시켰을 때 대장균군 사멸율의 평균치는 각각 10.3%, 20.5%, 57.8%, 89.3%로 방전면적에 따라 거의 일정한 비율로 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 반응관내에서 미생물의 사멸은 Cu 전극이 부착된 부분에서만 일어나고 있음을 나타내며, 방전면적이 증가함에 따라 대장균군에 전달되는 전기적 에너지가 비례적으로 증가하고 따라서 사멸율도 비례적으로 증가한다고 사료된다. 이러한 결과는 Cu 전극을 2개 연결하였을 때 대장균 (*E. coli*)의 사멸율은 1개 연결하였을 때 보다 거의 2배로 증가한다는 이(2003)의 결과와 일치하고 있다. 이러한 특성을 이용하여 반응관의 형태를 변화시킬 경우 처리시간을 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

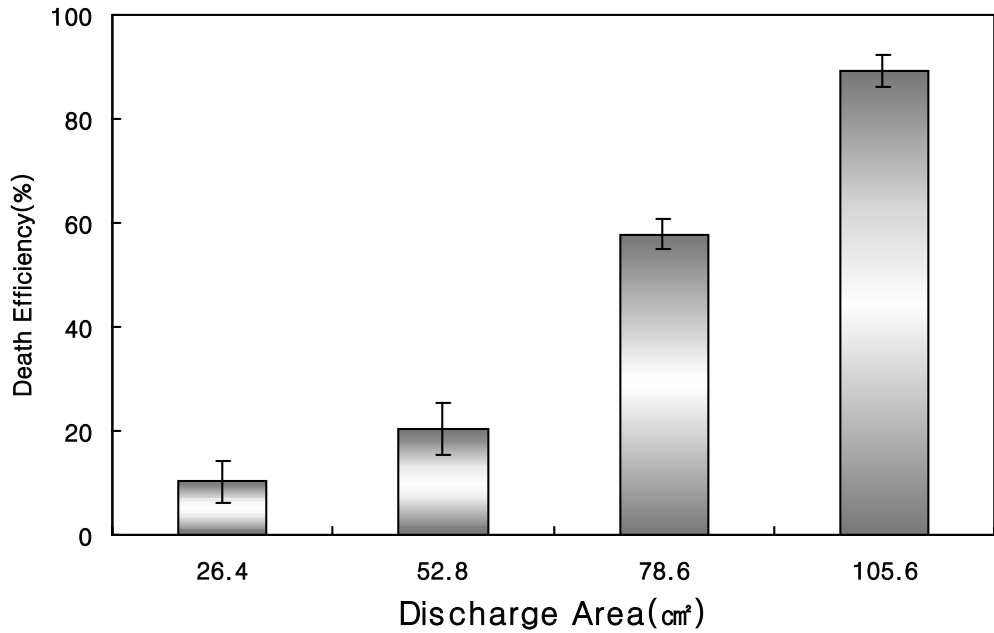


Fig. 14. Effect of copper electrode discharge area on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 60 min (N_0 : $7,300 \pm 300$, pH 6.9 ± 0.2 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$).

3. 이온강도(전기전도도) 변화에 따른 영향

시료의 이온강도는 전기전도도와 밀접한 관계가 있어, 이온강도가 커질수록 전기전도도는 커지게 되며, 이러한 전기전도도는 고전압 전기장으로 처리시에 시료내의 전기장의 형성, 전류의 흐름 등에 영향을 주어 미생물 사멸에 많은 영향을 미친다. 그리고 전기전도도에 따라 미생물 사멸율은 증가 또는 감소하는 것으로 보고되고 있으며(Hulsheger 등, 1981; Gaskova 등, 1996; Vega-Mercado 등, 1996b; Saravia 등, 1996; 신, 2000), 또한 이온강도를 구성하는 이온의 종류에 따라 미생물의 사멸율은 다르다고 보고되고 있다(Ho와 Mittal, 1996; 신, 2000).

본 연구에서는 고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용하여 대장균균의 사멸율에 미치는 전기전도도의 영향을 검토하기 위해 방류수의 전기전도도에 1가 양이온(Na^+ , K^+), 2가 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+})을 가지는 전해질인 NaCl, KCl, CaCl_2 , MgCl_2 로 일정량씩 주입하여 전기전도도를 1.3-9.0 mS/cm로 변화시키고, 처리시간을 20분으로 하였을 때 그 결과를 Fig. 15에 도시하였다.

그림에서 보여지는 바와 같이 이온의 종류에 관계없이 전기전도도가 증가할수록 사멸율이 증가하며, 양이온의 원자가가 클수록 사멸율은 증가하는 경향을 보이고 있으나 같은 이온가 사이에서는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 전기전도도가 4.0 mS/cm에서 9.0 mS/cm로 증가할 경우 대장균균의 사멸율은 2가 양이온인 CaCl_2 와 MgCl_2 는 각각 47.1-72.4%, 48.9-70.6%, 1가 양이온인 NaCl과 KCl은 각각 42.8-60.2%, 43.7-58.2%의 사멸율을 보였다. 이러한 결과는 신(2000)이 보고한 pH 7의 인산 완충용액의 이온강도를 증가하였을 때 *Saccharomyces cerevisiae*이 증가하였다는 결과와 일치하고 있으나 Vega-Mercado 등(1996b)이 보고한 이온강도가 증가할수록 *E. coli*의 사멸율은 감소하였다는 결과와는 상이하였다. 그리고 이온의 종류에 따른 미생물 사멸 실험에서 2가 이온이 1가 이온보다 사멸 상승효과를 보였고, 같은 1가 이온과 2가 이온 사이에서는 서로 간에 큰 영향이 없었다는 신(2000) 및 electropermeation시 같은 전하량을 갖는 이온들에 의해 영향을 받지 않는다고 보고한 Ho와 Mittal(1996)와 같은 경향을 보임을 알 수 있었다.

본 연구결과와 다른 연구자의 연구결과를 종합적으로 판단해 보면 전기장의 세기,

반응온도, 사용 매질 및 미생물의 종류 등 다양한 인자에 의해 전기전도도의 영향은 차이를 보인다고 판단할 수 있다.

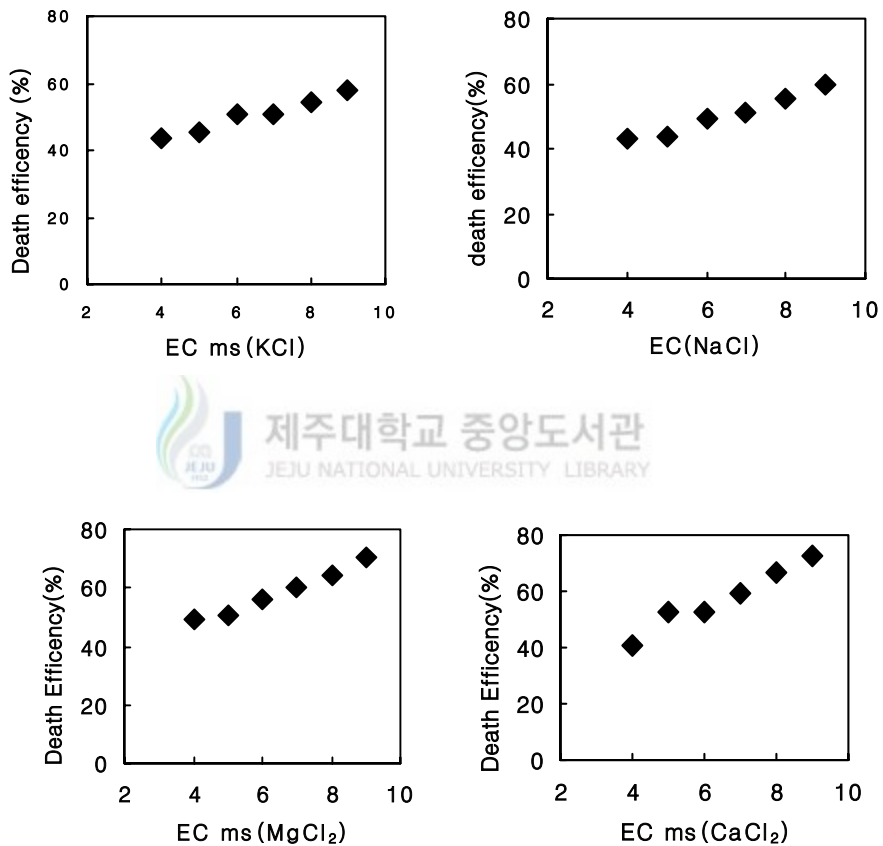


Fig. 15. Effect of electric conductivity (EC) on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 20 min (N_0 : $7,800 \pm 600$, pH 7.0 ± 0.1 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$). The initial effluent EC was adjusted to 1.3–9.0 mS/cm with NaCl, KCl, CaCl₂, and MgCl₂.

4. pH의 영향

미생물 세포들은 외부 환경에 관계없이 proton pump에 의하여 cytoplasmic pH를 중성에 가깝게 유지하고 있으나, 고전압의 전기장이 세포에 인가되면 세포막이 형성되면서 세포막의 투과성이 증가하게 되고, 세포막은 삼투압의 불균형을 일으켜 세포내로의 H^+ 이온의 유입속도가 커지고 이로 인해 cytoplasmic pH가 감소하게 되고 이때 세포 내부로 유입된 H^+ 를 세포외로 방출하기 위하여 H^+ -ATPase를 작동하게 되는데, 이러한 미생물의 'proton motive force (PMF)'에 의한 pH 항상성 유지에는 다량의 에너지가 소모되어 결국에는 다른 대사활동에 지장을 초래하게 되어 외부 충격에 대한 저항성이 감소하게 된다고 보고되고 있다(Padan 등, 1981; Booth, 1985).

고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용하여 대장균의 사멸율에 미치는 pH의 영향을 검토하기 위해 방류수의 pH를 1.0/0.1 N $H_2SO_4/NaOH$ 로 5-9로 조절하고, 처리시간을 30분으로 하여 그 결과를 Fig. 16에 도시하였다.

그림에서 보여지는 바와 같이 대장균 사멸에 미치는 pH의 영향은 뚜렷한 경향을 보이지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 20 KV/cm의 낮은 전기장 세기에서는 pH, 온도와 관계없이 유의성이 없는($P>0.05$) 미생물의 불활성화를 초래한다고 보고한 Vega-Mercado 등(1996b)의 결과와 일치하고 있다. 그러나 Vega-Mercado 등(1996b)은 전기장의 세기가 40-55 KV/cm 에서는 pH가 중성에서 산성쪽으로 갈수록 사멸율은 증가하였다고 보고하였고, 신(2000)은 고전압 펄스 전기장(50 KV/cm, 40°C)으로 처리시 *Saccharomyces cerevisiae*의 사멸에 미치는 시료 pH(4-9)의 영향을 검토한 결과 중성에서 산성 또는 알칼리성으로 갈수록 사멸효과가 현저하게 증가하였다고 보고하였다. 본 연구결과를 타 연구자의 결과와 비교해 보면 본 연구에서 사용된 전기장은 대장균의 사멸에 pH가 영향을 미칠 정도의 강한 전기장이 아니기 때문인 것으로 판단된다.

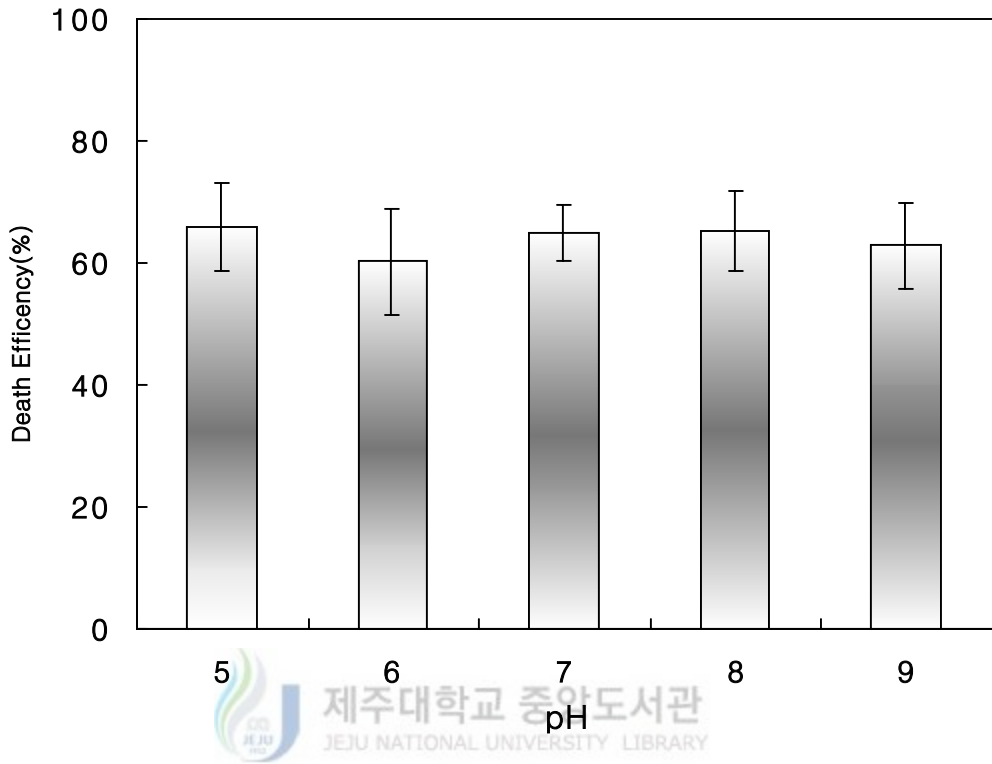


Fig. 16. Effect of effluent pH on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 30 min (N_0 : 6,800±400, EC: 2.5± 0.5 mS/cm, Temp.: 20±1 °C).

5. SS의 영향

시료 중에 존재하는 고형물은 미생물 사멸에 크게 영향을 미친다고 보고하고 있다 (정, 1999). 하수처리장의 방류수에서도 어느 정도 고형물(SS)을 함유하고 있으므로 이로 인해 대장균군 사멸에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용하여 대장균군의 사멸율에 미치는 SS의 영향을 검토하기 위해 방류수의 SS를 0, 4.2, 10, 24mg/ℓ로 변화시키고 처리시간을 30분으로 하였을 때 대장균군 사멸 결과를 Fig. 17에 도시하였다. 상기 SS에 대해 각각 89%, 64%, 46%, 41%의 한 사멸율을 보였다. 즉, SS가 증가할수록 대장균군의 사멸율은 현저히 감소하였는데, 이는 SS가 대장균군에 전달될 에너지를 차단하여 감소시키기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 효과적인 대장균군 사멸을 위해서는 SS를 제거하여야 하든가 전기장의 세기를 증가시켜야 할 것이다.



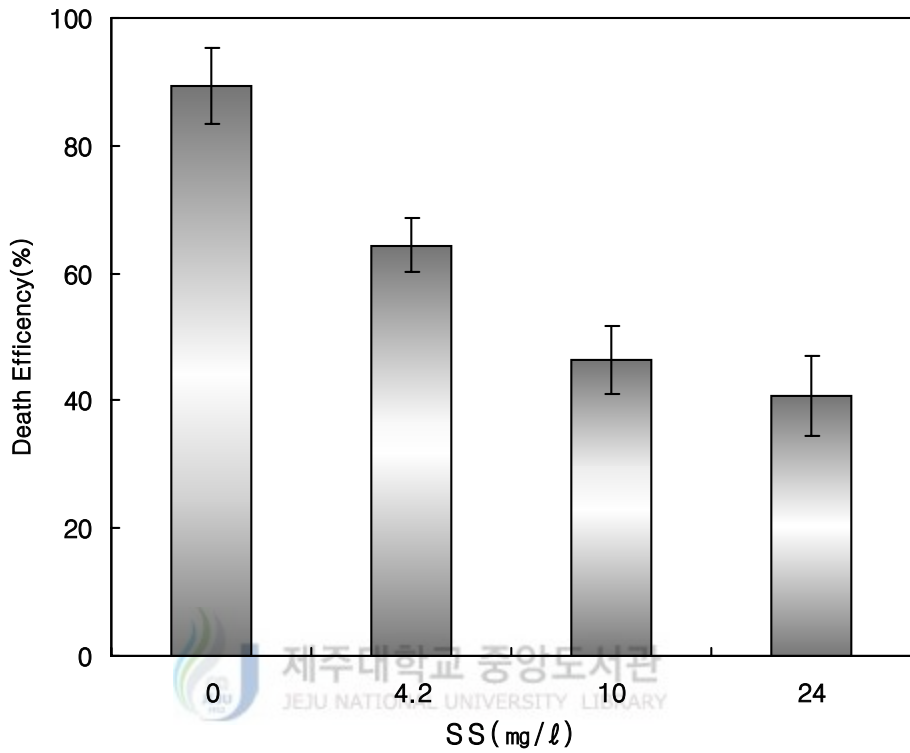


Fig. 17. Effect of SS (mg/ℓ) on on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 30 min (N_0 : $7,600 \pm 400$, EC: 2.5 ± 0.5 mS/cm, Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$).

V. 결 론

두 종류의 고전압 전기장 발생장치, 즉 고전압 교류(AC) (10-12 kV/cm, 20 kHz) 및 펄스 전기장 발생장치 (20-30 kV/cm, 40 Hz)로부터 유도되는 고전압 전기장을 이용하여 하수처리장 방류수 중의 대장균군 소독에 미치는 전기장의 세기, 처리시간, 방전면적의 영향과 방류수 중의 수질인자(전기전도도, pH, SS)의 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전기장 세기가 증가함에 따라 대장균군 사멸율은 증가함을 알 수 있었고, 또한 일정한 처리시간에서 전기장 세기에 따른 대장균군 대수 생존율은 직선적으로 감소하였으며, 외삽하여 구한 교류 및 펄스 전기장의 임계 전기장의 세기(E_c)는 각각 5 kV/cm, 2 kV/cm 이었고, 그리고 처리시간이 증가할수록 대장균군의 사멸속도 상수는 크게 증가하였다.
2. 고전압 전기장의 처리시간이 증가함에 따라 대장균군 사멸율은 증가함을 알 수 있었고, 또한 일정한 전기장 세기에서 처리 시간에 따른 대장균군 대수 생존율은 직선적으로 감소하였으며, 외삽하여 구한 교류 및 펄스 전기장의 임계처리시간(t_c)는 각각 5 분, 2분으로 전기장의 세기에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 그리고 전기장의 세기가 증가할수록 대장균군의 사멸속도 상수(k_t)는 크게 증가하였다.
3. 일정한 시간에서 본 연구에 사용된 교류 전기장과 펄스 전기장의 세기에 따른 대장균군 사멸율을 살펴 보면 후자가 전자보다 높은 사멸율을 보였으나 전기장의 세기에 직선적으로 비례하지 않았다. 이는 사용한 주파수 및 사용 전기장의 펄스의 폭의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.
4. 고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용하여 대장균군 사멸율에 미치는 Cu 전극의 방전면적, 방류수의 전기전도도, pH 및 SS의 영향을 검토한 결과 Cu 전극 방전면적과는 직선적으로 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 전기전도도의 영향

에서는 전기전도도를 구성하는 이온의 종류에 관계없이 전기전도도가 증가할수록 사멸율이 증가하였으며, 양이온의 원자가가 클수록 사멸율은 증가하는 경향을 보이고 있으나 같은 이온 사이에서는 거의 변화가 없었다. pH의 영향은 본 연구에서 검토된 pH 5-9의 범위내에서는 사멸율에 영향이 없었으며, SS의 영향은 SS가 증가할수록 대장균균에 전달된 전기 에너지를 차단하여 사멸율은 현저히 감소하는 경향을 보였다.

5. 수행된 연구 결과를 토대로 하수처리장 방류수 소독에 적용하기 위해서는 강한 전기장과 펄스의 폭과 수를 증가시키는 고전압 장치가 필요하다고 판단된다.



VI. 참고문헌

- 김경탁, 1998, 고전압 펄스 전기장 처리에 의한 사과주스의 미생물 불활성화와 저장 중 품질변화, 1998, 중앙대학교 박사학위논문, 102pp.
- 문권주, 2000, 고전압 펄스 전기장을 이용한 tyrosinase의 불활성화에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, 44pp.
- 배영석, 송민형, 정경훈, 권동식, 이기공, 2004, 하수 염소 소독시 소독부산물 발생 특성, 한국물환경학회지, 20(3), 275-280.
- 백주원, 2002, 전력용 반도체를 이용한 대용량 고전압 펄스 발생 시스템, 경북대학교 박사학위논문, 150pp.
- 신정규, 2000, 고전압 펄스 전기장에 의한 *Sacchchromyces cerevisiae*의 불활성화 원리, 연세대학교 박사학위논문, 136pp.
- 이동훈, 2003, 고전계하 수방전관내의 대장균 제거에 관한 연구, 경남대학교 대학원 박사학위논문, 142pp.
- 이동훈, 2004, 구형 SiO₂를 갖는 수방전관의 전계 해석 및 대장균의 제거 특성, 전기학회논문집, 53C(2), 103-108.
- 이동훈, 박재운, 2004, 구형 ZrO₂를 충전한 방전관의 수질 변환 및 대장균의 제거 특성, 전기학회논문집, 53C(3), 143-148.
- 이희규, 소명환, 2000, 고전압 펄스에 의한 전기 살균에서 임펄스 전압 파형의 영향, 산업식품공학, 4(3), 136-140.
- 육사 전자과, 1988, 전기·전자공학개론, 청문각.
- 정관재, 1999, 고전압 펄스 전기장을 이용한 우유의 살균, 연세대학교 대학원 석사학위논문, 56pp.
- 정동학, 2002, 꼭 알고 싶었던 전기·전기에너지, 광문각.
- 정태범, 1999, 고전압 펄스 전기장을 이용한 탁주의 비열 살균에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, 43pp.

- Booth, I. R., 1975, Regulation of cytoplasmic pH in bacteria, *Microbio. Rev.*, 49(4), 359.
- Castro, A. J., G. V. Barbosa-Canovas and B. G. Swanson, Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields, *J. Food Proc. Pres.*, 17, 47-73.
- Dolowy, K., 1975, Uniform hypothesis of cell behavior-movement, contact inhibition of movement, adhesion, chemotaxis, phagocytosis, pinocytosis, division, contact inhibition of division, fusion, *J. Theor. Biol.*, 52, 83-97.
- Dovenspeck, H., 1960, German Patent 1,237, 541.
- Glaser, R. W., S. L. Leikin, L. V. Chemomordik, V. E. Pastushenko and A. L. Sokirko, 1988, Reversible electrical breakdown of lipid bilayers: formation and evolution of pores, *Biochim. Biophys. Acta*, 940, 275-287.
- Gossling, B.S., 1960, UK Patent 845,743.
- Grahl, T., W. Sitzmann and H. Markl, 1992, Killing of microorganisms in fluid media by high-voltage pulses, *DEHEMA Biotechnol., Conference Series*, Vol. 5B, 675-678.
- Grahl, T. and H. Markl, 1996, Killing of microorganisms by pulsed electric fields, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 45, 148-157.
- Ho, S. Y. and G. S. Mittal, 1996, Electroporation of cell membrane: a review, *Crit. Rev. Biotechnol.*, 16, 349-362.
- Hulsheger, H. and E. G. Niemann, 1980, Effects of high-voltage pulses on *E. coli* K12, *Radiat. Environ. Biophys.*, 18, 281-288.
- Hulsheger, H., J. Potel and E. G. Niemann, 1981, Killing of bacteria with electric pulses of high field strength, *Radiat. Environ. Biophys.*, 20, 53-65.
- Hulsheger, H., J. Potel and E. G. Niemann, 1983, Electric field effects on bacteria and yeast cells, *Radiat. Environ. Biophys.*, 22, 149-162.
- Jayaram, S., G. S. P. Castle and A. Margaritis, 1992, Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltage pulses, *Biotechnol. Bioeng.*, 40, 1412-1420.

- Jung, K. J., J. K. Shin, K. Y. Ha, H. Y. Cho and Y. R. Pyun, 2000, Pasteurization of milk by pulsed electric fields in a continuous system, 8th Int'l Cong. Eng. and Food, M-07.
- Marquez, V. O., G. S. Mittal and M. W. Griffiths, 1997, Destruction and inhibition of bacterial spores by high voltage pulsed electric field, *J. Food Sci.*, 62(2), 1-4.
- Mertens, B and D. Knorr, 1992, Development of nonthermal processes for food preservation, *Food Technol.*, 46, 124-133.
- Knorr, D., M. Geulen, T. Grahl and W. Sitzman, 1994, Food application of high electric field pulses, *Trends Food Sci. Technol.*, 5, 71-75.
- Padan, E., D. Zilberstein and S. Schuldiner, 1981, pH homeostasis in bacteria, *Biochim. Biophys. Acta*, 650, 151.
- Qin, B., Q. Zhang, G. V. Barbosa-Canovas, B. G. Swanson and P. D. Pedrow, 1994, Inactivation of microorganisms by pulsed electric fields with different voltage waveforms, *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, 1, 1047-1057.
- Sale, A. J. H. and W. A. Hamilton, 1967a, Effects of high electric fields on microorganisms I. Killing of bacteria and yeasts, *Biochim. Biophys. Acta*, 148, 781-788.
- Sale, A. J. H. and W. A. Hamilton, 1967b, Effects of high electric fields on microorganisms II. Mechanism of action of the lethal effect, *Biochim. Biophys. Acta*, 148, 789-800.
- Sale, A. J. H. and W. A. Hamilton, 1968, Effects of high electric fields on microorganisms III. Lysis of erythrocytes and protoplasts, *Biochim. Biophys. Acta*, 163, 37-43.
- Schubert, D., 1987, Biophysical approaches to the study of biological membranes, In Findlay, J. B. C. and W. H. Evans (eds.), *Biological Membranes- A Practical Approach*, IRL Press, Oxford University.

- Tedeschi, H. 1993, The cell membranes, In Cell Physiology- Molecular Dynamics (2nd ed.), Wm. C. Brown Publishers, Oxford, England.
- Tsong, T. Y., 1990, Review on electroporation of cell membranes and some related phenomena, Biochem. Bioenerg., 24, 271-295.
- Vega-Mercado, H., U. R. Pothakamury, F. J. Chang, G. V. Barbosa-Canovas and B. G. Swanson, 1996a, Inactivation of E-coli by and Bascillus subtilis suspended in pea soup using pulsed electric fields, J. of Food Proc. Preser., 20, 501-510.
- Vega-Mercado, H., U. R. Pothakamury, F. J. Chang, G. V. Barbosa-Canovas and B. G. Swanson, 1996b, Inactivation of Esherichia coli by combining pH, ionic strength and pulsed electric fields hurdles, Food Res. Int'l, 29(2), 117-121.
- Wang, D. I. C., C. L. Cooney, A. I. Demain, P. Dunnill, A. E. Humphery and M. D. Lilly, 1979, Fermentation and Enzyme Technology, John Wiley & Sons, New York.
- Wiggins, P. M., 1975, Cellular functions of a cell in a metastable equilibrium state, J. Theor. Biol., 52, 99-111.
- Yiping, S., 1996, Inactivation of Bacillus spore, In Progress report, Ohio State University.
- Zhang, Q, A. Monsalve-Gonzalez, B., B. Qin, G. V. Barbosa-Canovas and B. G. Swanson, 1994, Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by square wave and exponential decay pulsed electric field, J. Food Process Eng., 17, 469-478.
- Zimmermann, U., 1986, Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion, Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol., 105, 176-256.
- Zimmermann, U., G. Pilawat and F. Riemann, 1974, Dielectric breakdown of cell membranes, Biophys. J., 14, 881-899.
- Zimmermann, U., W. M. Arnod and W. Mehrle, 1988, Biophysics of electroinjection and electrofusion, J. Electrostat., 21, 309-345.

감사의 글

이제 저의 대학원 생활을 마무리 하려고 합니다. 참으로 멀고 힘든 길이었습니다. 그 길을 포기하지 않고 걸어 올수 있도록 여러 가지로 부족한 저에게 끊임없는 관심과 열정으로 밤을 지새우면서 지도해주신 감상규 교수님께 존경과 사랑의 마음으로 깊은 감사를 드립니다.

또한 바쁘신 와중에 세심한 검토와 지도로 심사를 하여주시고 제자의 허물을 사랑으로 감싸 안아주신 허철구 교수님, 조은일 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 아울러 대학원 생활 동안 정성껏 지도해 주신 오윤근 교수님, 허 목 교수님, 이기호 교수님, 이용두 교수님께도 감사를 드립니다. 그리고 저의 실험을 위해 기꺼이 실험장비를 쓸 수 있도록 기꺼이 허락하여 주시고 바쁘신 와중에도 저희 많은 의문에 싫은 내색 한번 없이 성심성의껏 가르쳐주신 청정화학공학과 목영선 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

학업에 열중할 수 있도록 도와주시고 성원해 주신 광역수자원관리본부 본부장님과 과장님, 동료 직원들에게 감사를 드리며 특히 이번에 결실을 같이 맺게 된 오순미님과 급수수질과 동료직원들에게 깊은 감사를 드립니다.

그리고 이 길을 시작할 수 있도록 조언하여 주신 황경수 선배님과 네가 힘들어 할 때 옆에서 끊임없이 도와준 내 가장 친한 친구인 김승훈님 정말 고맙습니다.

그 동안 공부한다고 소홀했던 가정을 인내와 사랑으로 굳건하게 지켜준 내 사랑하는 아내 김윤정님과 같이 시간을 보내지 못해도 아빠를 이해해 주고 힘을 준 우리 집 희망의 두 기둥인 제훈과 혁준, 그리고 저의 사랑하는 네 분 누나와 매형들과 그 가족들, 막내 사위에게 많은 사랑을 주신 장모님께 이 조그마한 결실을 드립니다.

지금 여기까지 오는 데 까지 많은 시간이 필요했습니다. 저 혼자서는 도저히 오지 못할 길을 여러분이 도움이 있었기에 오게 되었습니다. 이제 저를 도와주신 여러분들이 사랑을 가슴속 깊이 새겨놓고 저의 또다른 목표를 향해 다시 험난한 바다에 희망이 돛을 올리고 출발하려고 합니다.

다시 한번 저에게 관심과 사랑을 주신 모든 분들에게 머리숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

2004년 7월.....