

고전압 전기장을 이용한 하수처리장 방류수 중의 대장균군 소독에 관한 연구

이민규* · 정근식 · 감상규

제주대학교 토목환경공학전공, *부경대학교 응용화학공학부
(2008년 6월 16일 접수; 2008년 7월 2일 채택)

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

Min-Gyu Lee*, Geun-Sik Chung and Sang-Kyu Kam

Division of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
**Division of Applied Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea*

(Manuscript received 16 June, 2008; accepted 2 July, 2008)

Abstract

Using high voltage electric fields induced by high voltage AC (10-12 kV/cm, 20 kHz) and pulsed (20-30 kV/cm, 40 Hz) electric field generator 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 death rate of coliform group was increased with increasing electric field strength and treatment time. For AC and pulsed electric field generator, the critical electric field strength was 6 kV/cm and 2 kV/cm, respectively, and the critical treatment time was 5 min and 2 min, respectively, regardless of electric field strength. 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. The results obtained for the effects of discharge area, electric conductivity, pH and SS 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, but 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.

Key Words : Disinfection, Coliform group, High voltage electric field treatment, Effluent of sewage plant

1. 서 론

국내 하수도법에 의해 2003년부터 시행되고 있는

하수종말처리시설의 방류수 수질기준 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 있다¹⁾.

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 운영기술 축적 부족 등으로 소독 선정방법에 있어 애로점이 발생되고 있다. 선진국에서는 염소소독의 경우 DBPs의 위해성 문제점이 드러남에 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 Gossling²⁾에 의하여 처음으로 제안되었으며, 이후 Dovenspeck³⁾, Sale과 Hamilton^{4~6)}에 의하여 전기장에 의한 미생물의 사멸에 미치는 영향에 대한 연구가 시작되었다. Dovenspeck³⁾은 전기장의 세기에 따라 미생물의 사멸에 미치는 영향이 다르다는 것을 발견하였으며, Sale과 Hamilton^{4~6)}은 약 25 kV/cm 이상의 직류전기장에 의해 세균과 효모가 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 보고되었고^{7~9)}, Zimmerman¹⁰⁾ 및 Zimmerman 등¹¹⁾은 유전과피이론(dielectric breakdown theory)뿐만 아니라 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^{12~16)}, 이¹⁷⁾, 이와 박¹⁸⁾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 중에 있는 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 검토하는 것이다. 본 연구에서는 두 종류의 고전압 전기장 발생장치(고전압 교류 전기장 발생장치와 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.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료 및 실험장치

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

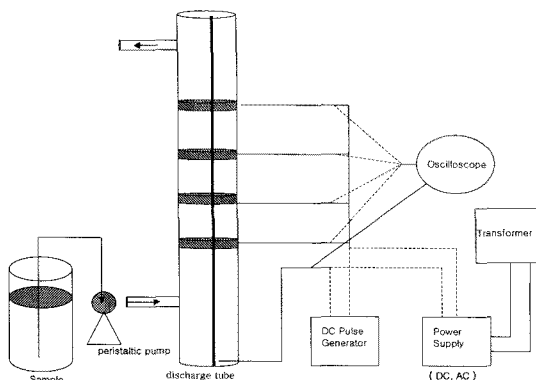
대장균군 소독효과를 검토하기 위하여 사용된 실험

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 ²⁺ (mg/L)	16.5~20.3
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	65.3~102.5
K ⁺ (mg/L)	26.7~35.9
Mg ²⁺ (mg/L)	7.5~10.2
Na ⁺ (mg/L)	29.3~40.1

험장치는 Fig. 1과 같으며, 이는 입력전압을 조절하는 Transformer, 입력전압으로부터 고전압을 유도하는 고전압 발생장치(Power supply, AC, DC용), 펄스 발생기(Pulse Generator, 고전압 발생장치가 DC용인 경우), 전압 등을 측정하기 위한 Digital Oscilloscope (TDS 3032, Tektronix), 고전압발생장치로부터 유도되는 고전압 전기장이 제공되는 방전관(Discharge tube), 시료탱크, 시료탱크로부터 방전관으로 시료를 일정 속도로 유입하는 Peristaltic pump 등으로 구성하였다.

전기장 발생 장치는 두가지 형태의 전기장 발생장치 즉 고전압 펄스 발생장치와 고전압 교류(AC)

**Fig. 1.** Schematic diagram of experimental set-up for high voltage AC & pulsed (DC) electric field treatment.

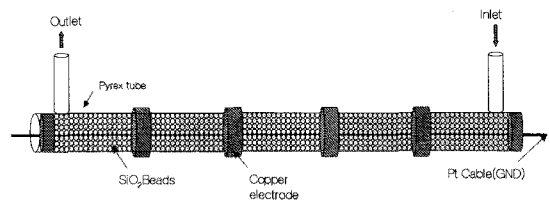
전기장 발생장치를 사용하였다. 고전압 펄스 전기장 발생장치는 직류(DC) 고전압 발생부와 펄스 발생기로 구성되어 있으며, 이때 발생하는 직류 펄스는 최대 30 kV의 전압과 40 Hz를 갖도록 설계되었고, 파형은 monopolar exponential decay pulse이다. 고전압 교류 전기장 발생장치는 입력전압에 따라 최대 인가전압 12 kV, 20 kHz의 주파수를 갖을 수 있도록 주문 제작하여 사용하였다.

Fig. 2는 방전관 내·외부의 구조를 나타낸 것이다. 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 SiO₂를 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.

2.2. 실험 방법

시료탱크에 들어 있는 방류수를 peristaltic pump를 이용하여 방전관으로 이송하여 방전관이 완전히 채워진 후(이 때 방류수 부피는 120 mL), 고전압 전기장 장치의 주요 인자인 전기장의 세기, 처리시간, 방전면적과 방류수 수질 인자인 pH, 이온강도 및 SS의 영향을 검토하였다.

전기장의 세기 및 처리시간이 미생물 사멸에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 고전압 교류 전기장 발생장치는 전기장의 세기 10~12 kV/cm 그리고 주파수 20 kHz의 조건에서, 고전압 펄스 전기장의 경우는 전기장의 세기 20~30 kV/cm 그리고 주파수 40 Hz의 조건에서 처리시간을 1~60분으로 조절(peristaltic pump를 이용하여 방전관내로 이송되는 유속을 2~120 ml/min 조정)하여 실험을 수행하였다. 방전면적, pH, 이온강도 및 SS의 영향은 고전압

**Fig. 2.** The structure of a discharge tube.

교류 전기장 발생장치로부터 유도되는 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 이용하여 검토하였다. 방전면적에 따른 영향은 방전관 외부에 부착된 4개의 Cu 전극을 순차적으로 차단하여(즉, 방전면적을 26.4~105.6 cm²로 변화시켜) 검토하였고, pH는 0.1N-H₂SO₄/NaOH로 방류수의 pH를 5~9로 변환시켜 살펴보고 있으며, 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 검토하였다. 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 살펴보았다. 이상의 모든 실험은 각각 5회 반복하여 그 결과를 산술평균하였다. 본 연구에 사용된 실험 조건을 Table 2에 요약하였다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기장 세기와 처리시간에 따른 영향

Jung 등¹⁹⁾은 *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens*의 사멸속도는 전기장의 세기 또는 처리시간에 대해 식

(1)과 같은 1차 속도식을 따르며, 고전압 전기장에 의한 미생물의 사멸율은 임계 전기장 세기 E_c 이상에서 전기장의 세기가 증가할수록 지수적으로 증가한다고 하였다.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k_E(E - E_c) = -k_t(t - t_c) \quad (1)$$

여기서 N_0 는 초기 균수, N 은 t 시간에서 균수, t_c 는 미생물을 사멸하기 위해 필요한 최소 처리시간인 임계처리시간, E_c 는 전기장의 세기, k_t 및 k_E 는 미생물의 사멸속도상수이고, E_c 는 미생물의 생존율(N/N_0)이 1.0이 되는 값으로 미생물이 사멸하기 시작하는 임계 전기장의 세기를 나타낸다.

본 연구에서는 고전압 교류 전기장 장치(10~12 kV/cm, 20 kHz) 및 펄스(DC) 전기장 장치(20~30 kV/cm, 40 Hz)로부터 유도되는 고전압 전기장 세기의 처리시간을 달리 하였을 때 대장균 생존율을 식 (1)에 적용하여 검토한 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 이로부터 구한 E_c 사멸속도 상수(k_E) 및 결정계수(r^2)를 Table 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 전기장 세기가 증가함에 따라 대장균 사멸율은 증가하고, 또한 일정한 처리시간에서 전기장 세기에 따른 대장균 대수 생존율은 직선적으로 감소하여 식 (1)에 잘 부합됨을 알 수 있었다. 외삽하여 구한 각 전기장의 E_c 는 각각 6 kV/cm, 2 kV/cm를 나타냈다. 그리고 Table 3에서 보여지는 바와 같이 처리시간이 증가할수록 대장균의 사멸속도 상수는 크게 증가함을 알 수 있었다. 즉, 고전압 교류 전기장의 경우 10분에서 60분으로 처리시

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		26.4~105.6 cm ²
pH	High voltage AC electric field generator	5~9
Effluent	Ionic strength (electric conductivity)	4.0~9.0 mS/cm with NaCl, KCl, CaCl ₂ and MgCl ₂
		SS

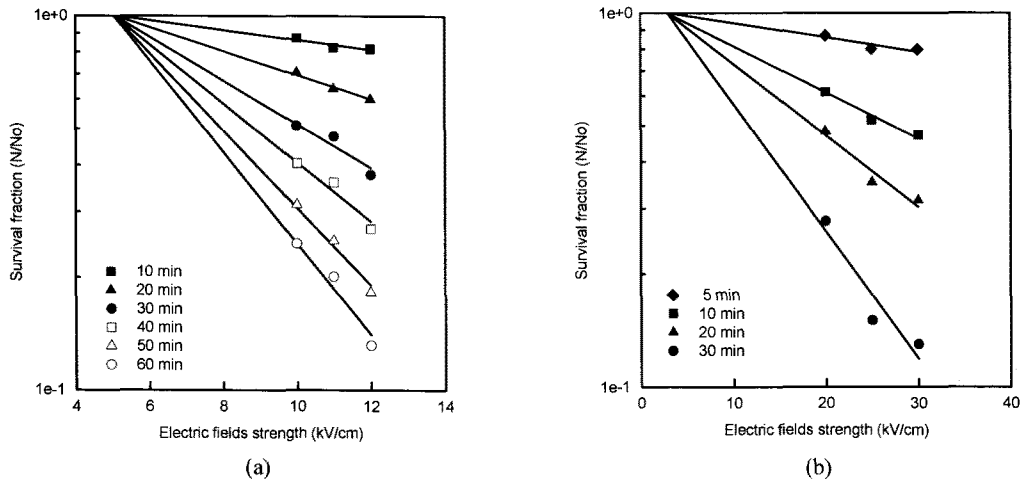


Fig. 3. Survival fraction of coliform group as a function of electric field strength with different treatment time applications for high voltage AC (a) and pulsed (b) electric field generator (N_0 : 6,500±500 CFU/ml, pH 6.8±0.2, Temp.: 20±1°C, Discharge area: 105.6 cm²).

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

간이 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.

고전압 전기장에서 대장균군 대수 생존율을 다른 전기장에서 처리시간에 따른 함수관계를 Fig. 4에 나타내었으며, 이로부터 구한 파라미터, 즉 임계 처리시간(t_c), 사멸속도 상수(k_E) 및 결정계수(r^2)를 Table 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 처리시간이 증가함에 따라 대장균군 사멸율은 증가함을 알 수 있었고, 또한 일정한 전기장 세기에

서 처리 시간에 따른 대장균군 대수 생존율은 직선적으로 감소하여 식 (1)에 잘 부합됨을 알 수 있었고, 외삽하여 구한 각 전기장의 t_c 는 각각 5분, 2분으로 전기장의 세기에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 이러한 결과는 Jung 등¹⁹⁾이 보고한 고전압 펄스 전기장을 이용하여 우유 중의 *E. coli*, *Ps. fluorescens* 및 *B. stearothermophilus*의 살균시 전기장의 세기가 증가함에 따라 감소한다는 결과와 차이를 보였다. 이러한 결과는 사용 전기장의 세기, 펄스의 종류, 처리시간, 매질의 특성 등 다양한 요인에 기인하는 것으로 사료된다. 그리고 Table 4에서 보여지

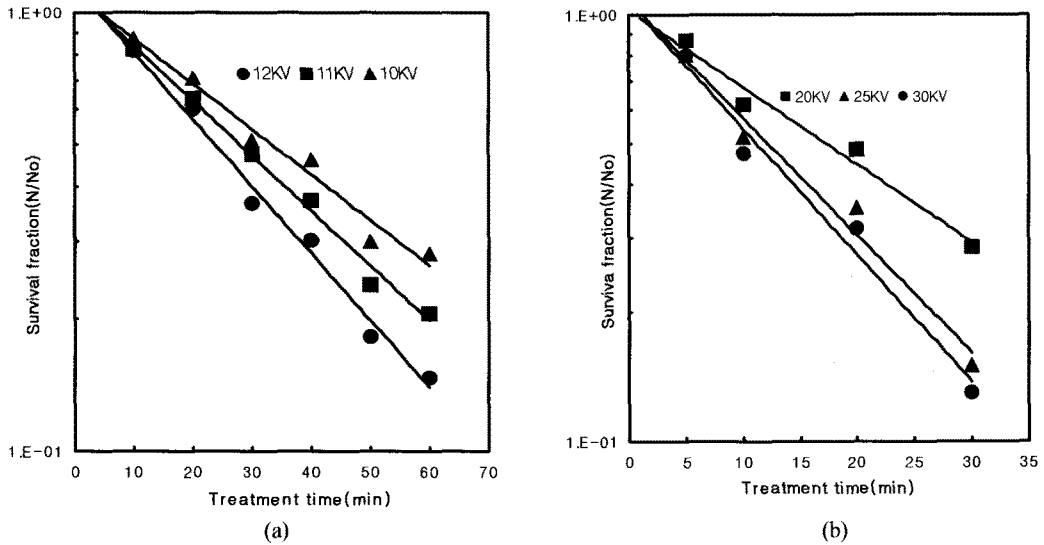


Fig. 4. Survival fraction of coliform group as a function of treatment time with different electric field strength applications for high voltage AC (a) and pulsed (b) electric field generator (N_0 : 6,500±500 CFU/ml, pH 6.8±0.2, Temp.: 20±1°C, Discharge area: 105.6 cm²).

Table 4. The values of critical treatment time (t_c) and death rate constant (k_d), 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_d	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

는 바와 같이 전기장의 세기가 증가할수록 대장균군의 사멸속도 상수 k_d 는 크게 증가함을 알 수 있었다. 즉, 고전압 교류 전기장의 경우 10 kV/cm에서 12 kV/cm로 증가함에 따라 k_d 는 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. 5는 본 연구에 사용된 교류 전기장과 펄스 전기장의 30분 처리시간에서 전기장의 세기에 따른 대장균군 사멸율을 비교한 것이다. 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 대장균군에 전달되는 에너지 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 즉, 교류 전기장의 경우 20 kHz의 주파수 펄스를 사용하였고, 펄스(직류) 전기장의 경우 40 Hz의 펄스를 사용하였으며, 또한 사용한 전기장에 따라 펄스의 폭도 차이가 나기 때문인 것으로 사료된다.

3.2. 방전면적 변화에 따른 영향

고전압 교류 전기장 발생장치(12 kV/cm, 20 kHz)

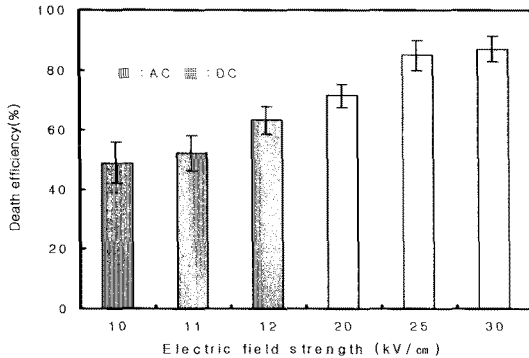


Fig. 5. Comparison of death efficiency of coliform group with electric field strength induced by high voltage AC (20 kHz) and pulsed electric field generator (40 Hz) at treatment time of 30 min (N_0 : $6,500 \pm 500$ CFU/ml, pH 6.8 ± 0.2 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$, Discharge area: 105.6 cm^2).

를 Fig. 2에 있는 동일한 면적을 가지는 Cu 전극(외부전극, 각각 26.4 cm^2)에 각각 연결하고, 반응관 외부에 부착된 Cu 전극을 순차적으로 차단하여 Cu 전극의 방전면적을 변화시켜 대장균군의 사멸율을 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 상기 고전압 교류 전기장을 각각의 Cu 전극에 각각 1개, 2개, 3개, 4개 연결하여 방전면적을 26.4, 52.8, 79.2 및 105.6 cm^2 로 변화시켰을 때 대장균군 사멸율의 평균치는 각각 10.3%, 20.5%, 57.8%, 89.3%로 방전면적에 따라 거

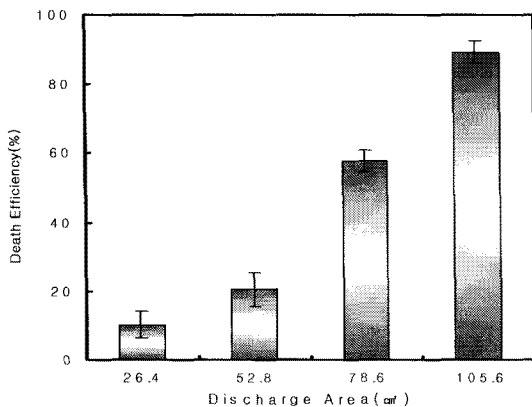


Fig. 6. Effect of copper electrode discharge area on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 60 min (N_0 : $7,300 \pm 300$ CFU/ml, pH 6.9 ± 0.2 , Temp.: $20 \pm 1^\circ\text{C}$).

의 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 증가하는 것으로 사료된다. 또한, 이러한 결과는 Cu 전극을 2개 연결하였을 때 대장균(*E. coli*)의 사멸율은 1개 연결하였을 때 보다 거의 2배로 증가한다는 이²⁰⁾의 결과와 일치하고 있다. 이러한 특성을 이용하여 반응관의 형태를 변화시킬 경우 처리시간을 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 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^{8,15,21)}, 또한 이온강도를 구성하는 이온의 종류에 따라 미생물의 사멸율은 다르다고 보고되고 있다^{15,22)}.

본 연구에서는 고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용하여 대장균군의 사멸율에 미치는 전기전도도의 영향을 검토하기 위해 방류수의 전기전도도에 1가 양이온(Na^+ , K^+)을 가지는 NaCl 및 KCl과 2가 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+})을 가지는 전해질인 CaCl_2 및 MgCl_2 으로 일정량씩 주입하여 전기전도도를 4.0~9.0 mS/cm로 변화시키고, 처리시간을 20분으로 하였을 때 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

그림에서 보여지는 바와 같이 이온의 종류에 관계없이 전기전도도가 증가할수록 사멸율이 증가하며, 양이온의 원자수가 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 대장균군의 사멸율은 2가 양이온을 갖는 CaCl_2 와 MgCl_2 는 각각 47.1~72.4%, 48.9~70.6%, 1가 양이온을 갖는 NaCl과 KCl은 각각 42.8~60.2%, 43.7~58.2%의 사멸율을 보였다. 이러한 결과는 인산 완충용액의 이온강도를 증가하였을 때 *Saccharomyces cerevisiae*이 증가하였다는 신¹⁹⁾의 결과와는 일치하고 있으나

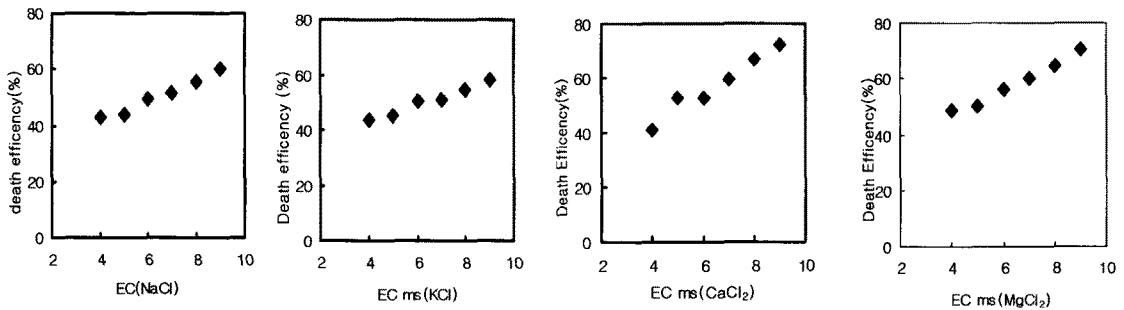


Fig. 7. Effect of electric conductivity (EC) on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 20 min (N_0 : 7,800±600 CFU/ml, pH 7.0±0.1, Temp.: 20±1°C, Discharge area: 105.6 cm²). The initial effluent EC was adjusted to 4.0~9.0 mS/cm with NaCl, KCl, CaCl₂, and MgCl₂.

Vega-Mercado 등²¹⁾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 신¹⁵⁾ 및 electropermeation 시 같은 전하량을 갖는 이온들에 의해 영향을 받지 않는다고 보고한 Ho와 Mittal²²⁾와 같은 경향을 보임을 알 수 있었다.

3.4. pH의 영향

미생물 세포들은 외부 환경에 관계없이 proton pump에 의하여 cytoplasmic pH를 중성에 가깝게 유지하고 있으나, 고전압의 전기장이 세포에 인가되면 세포가 형성되면서 세포막의 투과성이 증가하게 되고, 세포막은 삼투압의 불균형을 일으켜 세포내로의 H⁺ 이온의 유입속도가 커지고 이로 인해 cytoplasmic pH가 감소하게 되고 이 때 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^{23,24)}.

고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용하여 대장균군의 사멸율에 미치는 pH의 영향을 검토하기 위해 방류수의 pH를 1.0/0.1 N H₂SO₄/NaOH로 5~9로 조절하고, 처리시간을 30분으로 하여 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다.

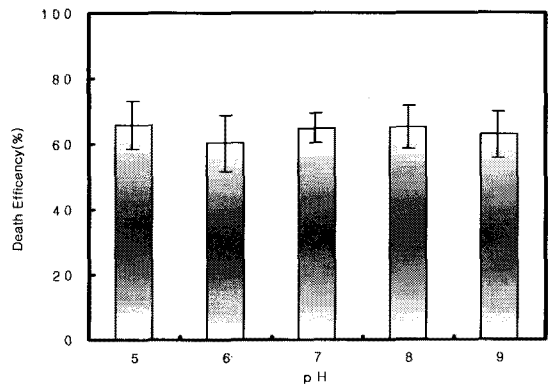


Fig. 8. Effect of effluent pH on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 30 min (N_0 : 6,800±400 CFU/ml, EC: 2.5±0.5 mS/cm, Temp.: 20±1°C, Discharge area: 105.6 cm²).

그림에서 보여지는 바와 같이 대장균군 사멸에 미치는 pH의 영향은 뚜렷한 경향을 보이지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 20 kV/cm의 낮은 전기장 세기에서는 pH나 온도에 관계없이 미생물의 불활성화를 초래한다고 보고한 Vega-Mercado 등²¹⁾의 결과와 일치하고 있다. 그러나 Vega-Mercado 등은 전기장의 세기가 40~55 kV/cm에서는 pH가 중성에서 산성쪽으로 갈수록 사멸율은 증가하였다고 보고하였고, 신¹⁵⁾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 현

저하게 증가하였다고 보고하였다. 본 연구결과를 타 연구자의 결과와 비교해 보면 본 연구에서 사용된 전기장은 대장균군의 사멸에 pH가 영향을 미칠 정도의 강한 전기장이 아니기 때문인 것으로 판단된다.

3.5. SS의 영향

시료 중에 존재하는 고형물은 미생물 사멸에 크게 영향을 미친다고 보고하고 있다¹³⁾. 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, 24 mg/ℓ로 변화시키고 처리시간을 30분으로 하였을 때 대장균군 사멸 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 상기 SS에 대해 각각 89%, 64%, 46%, 41%의 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.

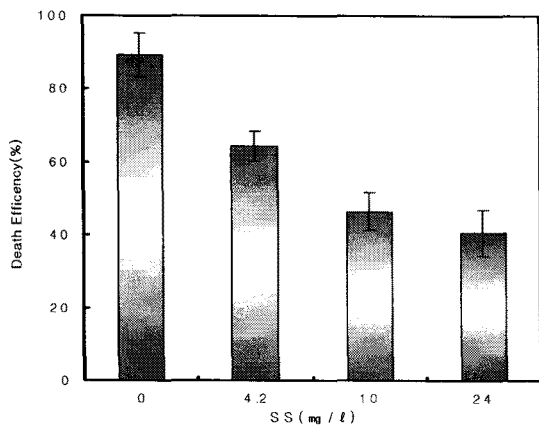


Fig. 9. Effect of SS (mg/ℓ) on death efficiency of coliform group by high voltage AC electric field treatment (12 kV/cm, 20 kHz) at the treatment time of 30 min (N_0 : 7,600±400, EC: 2.5±0.5 mS/cm, Temp.: 20±1°C, Discharge area: 105.6 cm²).

4. 결론

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.

전기장 세기 및 처리시간이 증가함에 따라 대장균군 사멸율은 증가하였으며, 교류 및 펄스 전기장의 임계 전기장의 세기(E_c)는 각각 6 kV/cm, 2 kV/cm 이었고, 임계처리시간(t_c)는 각각 5 분, 2분으로 전기장의 세기에 관계없이 일정한 값을 나타내었으며, 교류 전기장에 비해 펄스 전기장의 경우가 더 높은 대장균군 사멸율을 보였으나 전기장의 세기에 따라 직선적으로 비례하지 않았다.

고전압 교류 전기장(12 kV/cm, 20 kHz)을 사용한 경우에 Cu 전극 방전면적과 직선적으로 비례하여 대장균군 사멸율이 증가하는 경향을 보였으며, 전기전도도의 영향에서는 전기전도도를 구성하는 이온의 종류에 관계없이 전기전도도가 증가할수록 사멸율이 증가하였고, 양이온의 원자가가 클수록 사멸율은 증가하는 경향을 보였으나 같은 이온가 사이에서는 거의 변화가 없었다. pH의 영향은 본 연구에서 검토된 pH 5~9의 범위내에서는 사멸율에 영향이 없었으며, SS의 영향은 SS가 증가할수록 대장균군에 전달된 전기 에너지를 차단하여 사멸율은 현저히 감소하는 경향을 보였다.

참고 문헌

- 1) 배영석, 송민형, 정경훈, 권동식, 이기공, 2004, 하수 염소 소독시 소독부산물 발생 특성, 한국물환경학회지, 20(3), 275-280.
- 2) Gossling B. S., 1960, UK Patent 845,743.
- 3) Dovenspeck H., 1960, German Patent 1,237, 541.
- 4) Sale A. J. H., Hamilton W. A., 1967, Effects of high electric fields on microorganisms I. Killing of bacteria and yeasts, Biochim. Biophys. Acta, 148, 781-788.
- 5) Sale A. J. H., Hamilton W. A., 1967, Effects of high electric fields on microorganisms II. Mechanism of

- action of the lethal effect, *Biochim. Biophys. Acta*, 148, 789-800.
- 6) Sale A. J. H., Hamilton W. A., 1968, Effects of high electric fields on microorganisms III. Lysis of erythrocytes and protoplasts, *Biochim. Biophys. Acta*, 163, 37-43.
 - 7) Hulsheger H., Niemann E. G., 1980, Effects of high-voltage pulses on *E. coli* K12, *Radiat. Environ. Biophys.*, 18, 281-288.
 - 8) Hulsheger H., Potel J., Niemann E. G., 1981, Killing of bacteria with electric pulses of high field strength, *Radiat. Environ. Biophys.*, 20, 53-65.
 - 9) Hulsheger H., Potel J., Niemann E. G., 1983, Electric field effects on bacteria and yeast cells, *Radiat. Environ. Biophys.*, 22, 149-162.
 - 10) Zimmermann U., 1986, Electrical breakdown, electroporation and electrofusion, *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.*, 105, 176-256.
 - 11) Zimmermann U., Arnod W. M., Mehrle W., 1988, Biophysics of electroinjection and electrofusion, *J. Electrostat.*, 21, 309-345.
 - 12) 김경탁, 1998, 고전압 펄스 전기장 처리에 의한 사과주스의 미생물 불활성화와 저장중 품질변화, 박사학위논문, 중앙대학교, 서울.
 - 13) 정관재, 1999, 고전압 펄스 전기장을 이용한 우유의 살균, 석사학위논문, 연세대학교, 서울.
 - 14) 문권주, 2000, 고전압 펄스 전기장을 이용한 tyrosinase의 불활성화에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교, 서울.
 - 15) 신정규, 2000, 고전압 펄스 전기장에 의한 *Saccharomyces cerevisiae*의 불활성화 원리, 석사학위논문, 연세대학교, 서울.
 - 16) 이희규, 소명환, 2000, 고전압 펄스에 의한 전기 살균에서 임펄스 전압 파형의 영향, *산업식품공학*, 4(3), 136-140.
 - 17) 이동훈, 2004, 구형 SiO₂를 갖는 수방전관의 전계 해석 및 대장균의 제거특성, *전기학회논문집*, 53C(2), 103-108.
 - 18) 이동훈, 박재운, 2004, 구형 ZrO₂를 충전한 방전관의 수질 변환 및 대장균의 제거 특성, *전기학회논문집*, 53C(3), 143-148.
 - 19) Jung K. J., Shin J. K., Ha K. Y., Cho H. Y., Pyun Y. R., 2000, Pasteurization of milk by pulsed electric fields in a continuous system, 8th Int'l Cong. Eng. and Food, M-07.
 - 20) 이동훈, 2003, 고전압 수방전관내의 대장균 제거에 관한 연구, 박사학위논문, 경남대학교, 마산.
 - 21) Vega-Mercado H., Pothakamury U. R., Chang F. J., Barbosa-Canovas G. V., Swanson B. G., 1996, Inactivation of *E. coli* by combining pH, ionic strength and pulsed electric fields hurdles, *Food Res. Int'l*, 29(2), 117-121.
 - 22) Ho S. Y., Mittal G. S., 1996, Electroporation of cell membrane: a review, *Crit. Rev. Biotechnol.*, 16, 349-362.
 - 23) Padan E., Zilberstein D., Schuldiner S., 1981, pH homeostasis in bacteria, *Biochim. Biophys. Acta*, 650, 151.
 - 24) Booth I. R., 1975, Regulation of cytoplasmic pH in bacteria, *Microbio. Rev.*, 49(4), 359.