

Electric Field Analysis and Removal Characteristics of Escherichia Coli for Water Discharge Tube with Globular SiO₂

李東勳*

(Dong-Hoon Lee)

Abstract - This paper shows the simulation of electric field distribution and removal characteristics of *Escherichia coli* for water discharge tube with globular SiO₂. At the experiments of the removing *Escherichia coli* used the discharge tube with globular dielectric(SiO₂), because the electric field is increased when applied voltage is increased, the removed ratio of *Escherichia coli* was related with increasing of applied voltage. When a passing number of test water in water discharge tube is increased, the removed ratio of *Escherichia coli* is increased because passing number of territory with electric field is increased. When diameter of globular dielectric(SiO₂) is increased, the removed time of *Escherichia coli* was decreased because electric field for dielectric polalization of globular dielectric(SiO₂) was increased. Also, the removed ratio of *Escherichia coli* of the water discharge tube with globular dielectric(SiO₂) was measured higher than the removal ratio of the discharge tube without globular dielectric(SiO₂)

Key Words : *Escherichia coli*, Dielectric, Electric field, Discharge.

1. 서 론

물(水)은 공기와 함께 생명을 유지하는데 있어 반드시 필요한 물질이다. 그러나 인간의 경제 활동으로 인해 발생한 대기 오염 물질과 각종 폐기물 중에서 인체에 유해한 성분들이 수중으로 흘러 들어가면서 화학적 반응과 생물학적인 작용에 의해 지표수와 지하수는 지속적으로 오염의 정도가 심해지고 있고, 자연발생적인 오염원의 양보다 훨씬 많은 인위적 오염원의 강과 하천 등으로 흘러 들어감으로 인하여 인간 생활의 주변 환경이 매년 더 악화되고 있으며, 정부나 환경 운동 단체 및 각 언론 매체를 통하여 발표에 의하면 유해 세균에 의한 식중독의 사고는 매년 증가 추세에 있고, 식수원 등의 먹물의 수질 등급은 점차 낮아지고 있는 실정이라고 보고되고 있다. 그리고 지금까지 발생한 수질 오염으로 인한 관련 사고의 경우, 사고가 한 번 발생하게 되면 수많은 사람들이 오염원에 노출되는 특징으로 인해 폭 넓은 지역의 대다수 사람들에게 병이 유발되는 특징을 보여주고 있다. 그러므로 수질 오염에 의한 사고의 경우 그 파급 효과는 대단히 광범위하며 심각할 수 있다^[1-3]. 따라서 먹는 물의 수질 기준은 모든 환경 기준 중에서 가장 엄격하게 설정되어 있으며, 향후 수질 환경 기준법은 계속되는 환경 오염의 심화로 인하여 더욱 강화되어야 할 것으로

사료된다. 이러한 수질 환경 기준의 강화가 요구되는 시점에 수질 오염원의 처리를 위한 연구는 기업등의 관련 연구 기관을 중심으로 급속히 진행중에 있다^[4]. 본 논문은 이러한 수질 환경 기준법의 강화에 맞추어 수질 오염원의 개선 방법으로서 구형 유전체(SiO₂)를 갖는 수방전관 내에 구형 유전체의 유전 분극에 의한 고전계 발생 특성과 수(水)방전 에너지에 의한 의해 물이 방전 영역에서 알칼리수 및 산성수 등의 이온화 물질로 변화하는 특성을 이용하여 수중 유해 세균 중에서 수질 오염 측정의 우선 항목인 대장균(*Escherichia coli*)의 제거 특성에 대하여 조사한 것이다. 그리고 본 실험 장치는 기존의 수중 유해 세균 제거 방식 즉, 오존 발생기에서 발생하는 인체에 유해한 오존(O₃)을 수중으로 직접 투입하거나 인위적으로 염소(Cl₂) 가스나 불소 가스(F₂)를 수중으로 직접 투입하는 방식의 경우에 문제시되는 처리후 배출 가스에 의한 2차적인 오염 문제를 걱정하지 않아도 된다는 점에서 상당히 큰 장점이 있다. 그리고, 오존 가스, 염소 가스 및 불소 가스를 투입하는 경우에는 투입 가스를 물 속으로 용존시키는데, 많은 시간과 추가 설비 장치가 필요로 하는 문제점이 있다. 하지만 본 실험 방식의 경우는 방전관 내부의 수중에 고전계만을 직접 수중 세균에 인가하는 방식이기 때문에 기존의 수중 세균 처리 방식의 문제점인 처리 시간과 추가 설비, 설비 장소, 운전비, 및 2차 오염원의 문제를 해결할 수 있다. 그리고 수중 세균을 처리하는데 있어서 기존 방식보다 매우 빠른 속속성이 있다는 장점과 기존의 배출 가스에 의한 2차 오염을 걱정하지 않아도 된다는 점으로 인해 가정이나 대용량 급식소의 저수조, 냉각탑에 존재하는 리스테리아 등의 다양한 장소에 분포하는 유해 수중 세

* 正 會 員 : (株)미래워터에어텍 代表,
慶南大學校 電氣工學科 工學博士
接受日字 : 2003年 9月 19日
最終完了 : 2003年 12月 30日

균의 제거에 쉽게 적용할 수 있는 특징이 있다. 또한 재활용 가능한 하수를 정화하거나 하수를 처리하여 바다로 흘려보내는 방류수의 법정 규정치인 대장균수 3000[cfu/ml]이하로 처리하는 장치로도 사용이 가능한 특징이 있다¹⁹⁻²¹⁾.

2. 시뮬레이션

2.1 구형 유전체의 유전 분극 특성

구형 유전체의 분극 현상은 각각의 유전체구를 각각의 대전 구전하로 가정하여 놓고, 이 각각의 구전하들 표면에 충전된 양과 음의 전하 상호간의 대전적 현상으로 해석하는 방법과 유전체구에 인가된 전압에 의한 전계(E)와 유전체 내부 유전율과의 관련 방정식으로 전계 집중 현상을 해석하는 방법이 있다. 본 논문과 같이 방전관 내부에 유전체구가 충전된 형태에 전압이 인가될 경우에 발생하는 유전체구의 표면 전계 집중을 해석의 경우는 후자의 관계식을 이용하는 것이 일반적이다. 즉, 전계(E)를 전압(V)과 거리(d), 그리고 전기력선속밀도(D)와 물질의 비유전율(ϵ_r)과의 상관 수식으로 전계를 해석하는 것이다. 그리고 이 수식들의 상호 관계를 살펴보면, 다음과 같은 특징이 있다.

첫째로, 수식 2.1과 같이 전계(E)는 전극 사이의 거리(d)로 인가 전압(V)을 나눈 것으로 이야기할 수 있는데, 이 수식의 경우는 방전 공간 영역의 내부 물질의 유전적 특성은 고려하지 않는 수식이므로 본 실험과 같이 수중에 구형의 유전체가 존재하는 경우에는 이 수식만으로 방전 영역의 전계 집중 현상을 해석한다는 것은 매우 부적절하다고 할 수 있다. 그러므로 이 경우에 있어서는 수식 2.2와 같이, 전계(E)에 대한 전기력선속밀도(D)와 물질의 비유전율(ϵ_r)의 상호간의 상관 관계식의 도입이 반드시 필요하게 된다. 그리고 본 실험의 전계 시뮬레이션 결과의 경우, 방전관 내외부에 존재하는 전극에 반복적이거나 펄스 형태 또는 일정한 전압을 인가할 경우에 있어서 각 경우의 전계(E) 해석 결과는 방전관에 인가된 최대 전압에서 전계를 나타낸 것으로 인가 전압이 상대적으로 낮아지게 되면, 수식 2.1에 의해 비례적으로 감소하는 특징을 나타낸다. 그리고 방전 영역 내부 물질의 비유전율(ϵ_r)이 상승하거나 감소할 경우에는 해석된 전계가 고정이기 때문에 상대적으로 전기력선속밀도(D)도 증가하거나 감소하는 특징으로 나타나게 된다.

둘째로, 이상과 같은 유전체와 전기력선속밀도(D)의 상관 관계로 나타나는 전계의 특징으로 인해, 본 실험에 사용된 구형 유전체를 충전한 방전관 내부의 방전 현상은 인가 전압과 전극 사이의 방전 거리가 일정할 경우, 유전체구의 비유전율이 상승하면, 전기력선속밀도가 증가하거나 감소하게 되는데, 본 방전관 내부의 중요한 전계 해석 지점에서 보면, 수중에서 구형 유전체와 구형 유전체가 만나는 지점과 수중에서 구형 유전체와 방전관 내면이 만나는 지점으로 크게 나누어 볼 수 있다. 이 중에서 구형 유전체와 구형 유전체가 수중에서 만나는 부분의 전계 특성 물의 유전율(약 80)을 기준으로 해서 살펴보면, 두 개의 유전체구가 물의 유전율과 비슷해질수록 전계 집중의 정도는 각 물질간의 상대적 유전비(比)가 비슷해지면 일정한 비율로 전계가 줄어드는 특징을

나타내고, 그와 반대의 경우는 강한 전계 집중이 수중에서 유전체구와 유전체구가 만나는 지점에 발생하게 된다. 그리고 유전체 비드와 방전관이 만나는 지점의 경우는 3가지의 물질 즉, 방전관과 유전체구 그리고 물이 서로 만나는 경우로 앞의 설명보다 복잡한 현상을 보이게 된다. 물과 방전관이 고정된 유전율을 가지고 있고, 유전체구의 유전율을 변수라고 가정하여 살펴보면, 최대 전계가 발생하는 조건은 다음과 같다. 방전관 비유전율이 약 3.7이고, 물의 비유전율이 약 80이라고 정의하면 유전체구의 비유전율은 앞의 두 물질에 대해 상대적인 비율이 같은 약 17.3일 경우와 약 1730의 비유전율을 가지는 경우에 최대 전계 집중 현상을 얻을 수 있는 특징이 있다. 다시 말해서 (방전관 3.7):(유전체구 17.3) = (유전체구 17.3):(물 80) 또는 (방전관 3.7):(물 80) = (물 80):(유전체구 1730)의 비(比)로 각 물질의 상대적 비유전율이 비율이 일정 비례의 관계일 경우에 3중점에서 전기력선속 밀도(D)가 최대로 증가되고, 이 때 최대 전계가 발생하게 된다. 이상과 같은 다양한 조건들에서 방전관 내부 공간의 전계 집중 현상을 이용한 대장균 제거에서 유전체구의 비유전율은 전반적으로 3에서 18정도의 비유전율을 가질 때, 수중 대장균의 제거에 유리할 것으로 판단되어진다. 그리고 유전체구의 크기가 증가할 경우는 전극과 유전체 비드, 또는 유전체 비드 상호간에 마주보는 면적(s)은 늘어나게 되고, 전반적인 유전체간 상호 거리(d)가 줄어드는 형태가 된다. 결과적으로 수식 2.3에서 알 수 있는 바와 같이, 각 유전 물질의 접촉부에서의 정전용량(C)이 늘어나게 된다. 그리고 이러한 이유로 인하여 일정한 고정 비율은 아니지만 상대적으로 전계 세기[kV/cm]가 유전체구의 크기가 작은 경우보다 크게 나타나게 된다. 그러므로 유전체 비드의 크기와 유전율이 변화하는 경우에 있어서는 면적(s), 거리(d), 그리고 비유전율(ϵ_r)에 대한 전계 세기(V/m)를 일정 상수를 가지는 함수로서 나타낼 수 있게 된다. 기존의 전계 해석 프로그램들은 이러한 다양한 조건에서의 현상들을 적절한 함수식을 이용하여 운영하고 있고, 이상의 설명과 관련된 수식들을 아래에 나타내었다.

$$E = \frac{V}{d} \tag{2.1}$$

$$E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \tag{2.2}$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{s}{d} \tag{2.3}$$

2.2 전위 해석

그림 1은 전자계 해석 프로그램 Flux II-D를 이용하여 실제 실험에 앞서, 수(水)중에서 구(球)형 유전체를 갖는 두께가 2[mm]인 방전관(pyrex) 외부면에 부착된 전극과 방전관 내부 중심에 위치하는 내부 전극에 전위차를 10,000[V] 인가한 경우에서 방전관 길이 방향 즉, 수류 방향의 단면이 내부 백금 전극을 축으로 하는 부분의 전위 분포를 해석한 결과이다. 본 단면의 경우, 대칭 구조의 형태이므로 단면의 절반만을 해석하여도 무난하다. 한편, 그림 1에서 상부와 하부 전극 간격은 12[mm]로 되어 있고, 구형 유전체(SiO₂)가 존재하는

내부 공간의 상부와 하부의 간격은 10[mm]이며, 시뮬레이션에 사용된 유전체구(SiO₂)의 외경은 5[mm]이다. 그리고 이 구형 유전체(SiO₂)의 비유전율은 일반적인 유리의 비유전율인 ε 3.7로 설정하였다. 이상과 같은 조건에서 수중 전위 분포의 특성을 알기 위하여 그림 1에서 상부면 즉, 방전관 내부의 중심부 즉, 수중 백금 전극부는 0[V], 하부면 즉, 방전관 외부면 전극에는 10,000[V]의 전압을 인가하여 해석을 실시하였다. 해석 결과를 살펴보면, 비유전율 3.7인 구형 유전체(SiO₂)가 방전관(pyrex) 내부에 존재함으로써 방전관 내부의 구형 유전체가 서로 접하는 부분 또는, 방전관과 구형 유전체가 만나는 부분의 전위 분포가 특정 부분에서 전위가 휘어지는 특징을 알 수 있다.

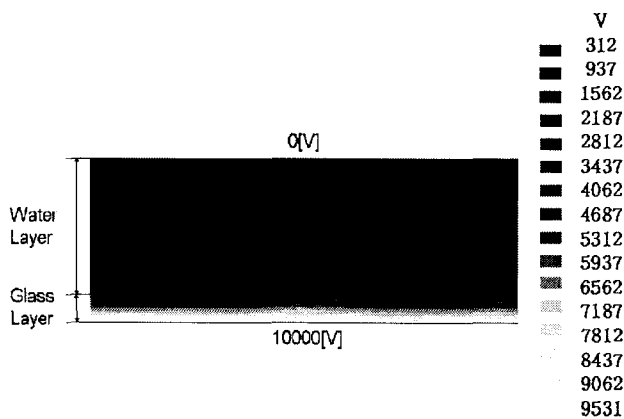


그림 1 전위 분포 시뮬레이션
Fig. 1 Simulation of electric potential distribution

그림 2는 전위 및 전계 해석을 위한 시뮬레이션의 전처리 과정을 나타낸 것이다. 해석 영역을 삼각셀의 형태로 분할하는데 있어서 각 셀의 형태는 예각 삼각형을 반드시 가져야 하는 데, 이는 둔각 삼각형의 경우에 있어서 각 꼭지점에서 같은 거리에서의 점이 자신의 셀 내부에 존재하는 것이 아니라 외부의 다른 삼각셀 내부에 존재하게 되기 때문에 해당 삼각형은 에너지가 없는 공간으로 되고, 다른 하나의 삼각셀은 내부의 한 지점에는 이중의 에너지 2개가 존재하는 것으로 되기 때문에 삼각셀과 삼각셀의 에너지 유출입을 벡터적으로 해석함에 있어 전체적인 해석이 불가능한 상태가 된다. 그리고 그림 2의 가운데 어두운 부분은 수중 방전 구간의 유전체가 존재하는 부분으로, 전위 및 전계 해석의 정확도를 높이기 위해 관련 셀(cell)이 미소한 부분까지 세밀하게 분할한 모습을 보여준다.

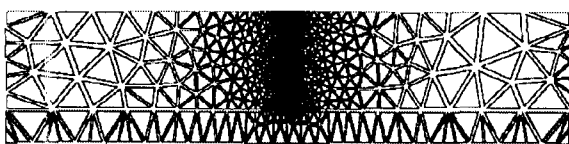


그림 2. 시뮬레이션을 위한 셀(cell) 분할
Fig. 2 Simulation of electric field distribution

2.3 전계 해석

그림 3은 구형 유전체(SiO₂)를 수방전관 내부에 충전하였을 경우의 전계 분포를 해석한 결과이다. 구형 유전체가 방전관에 충전되지 않은 부분과 충전된 부분의 해석 결과를 비교하면, 유전체구가 충전된 경우의 전계는 방전관과 유전체구가 맞닿는 부분, 유전체구 부근의 수중부 그리고 유전체구의 표면에서 강한 전계가 발생됨을 알 수 있었다, 즉, 인가 전압이 10[kV]일 때, 최대 전계가 약 36[kV/cm]가 발생하게 되고, 구형 유전체의 표면과 유전체구 부근 수중의 전계는 약 8[kV/cm] 정도 전계가 집중됨을 알 수 있으며, 방전관과 구형 유전체가 맞닿는 부분에서는 약 23[kV/cm]정도의 강한 전계가 집중되는 것을 해석을 통하여 알 수 있다.

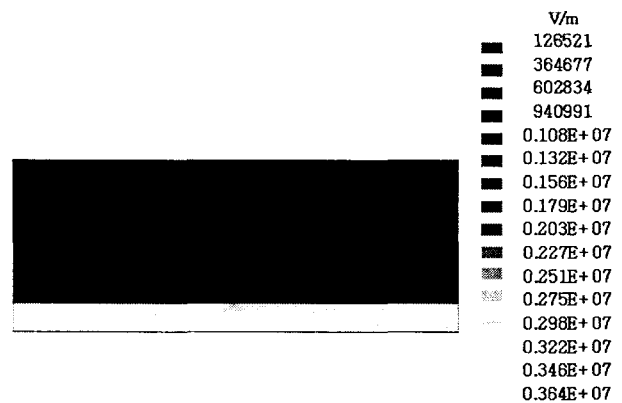
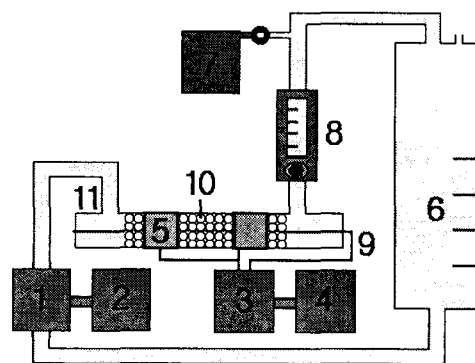


그림 3 전계 분포 시뮬레이션
Fig. 3 Simulation of electric field distribution

3. 실험 장치 및 결과



- 1 수(水)펌프 2 슬라이드스 3 고압전원부
- 4 슬라이드스 5 외부 전극 6 수조
- 7 시료채취부 8 수량조절부 9 내부 전극
- 10 구형 SiO₂ 11 수(水)방전관

그림 4 실험 장치도
Fig. 4 Experimental schematic

그림 4는 실험 장치의 전반적인 구성도를 나타낸 것이다. 장치의 구성을 살펴보면, 전극이 부착된 수방전관, 수유량을 표시하는 수량계, 시험수를 모아두는 수조, 고압 전원부, 수(水)펌프와 시료 채취부 등으로 구성되어 있고, 방전관의 구조는 파이렉스로 제작된 원통형(외경: $\varnothing 24[\text{mm}]$, 길이: $250[\text{mm}]$)으로서 방전관 내부에는 구형 유전체($\varnothing 5[\text{mm}]$, SiO_2 , $\epsilon_r: 5$)가 충전되어 있으며, 이 방전관의 외부면에는 동판 전극이 부착되어 있고, 중심부에는 백금 선전극이 취부되어 있다. 그리고 두 전극 사이에 $20[\text{kHz}]$, $6\sim 12[\text{kV}]$ 의 교류 전압이 인가되는 동안 방전관을 통과한 시험수 2[l]내에 존재하는 대장균의 제거 특성을 조사하였다. 시험수는 수(水) 펌프에 의해 순환되도록 제작하였고, 시험수는 일반 식수에 초기 대장균수를 1[ml]당 약 5,000마리의 개체가 존재하도록 물과 세균의 농도비를 조절하여 제조하였으며, 이렇게 제조된 시험수를 이용하여 실험을 실시하였다. 대장균의 제거 결과를 측정하기 위해서 시험용 대장균 배양지인 3M Petrifilm (Coliform Count Plate) 제품을 사용하였다. 그리고 방전관은 물의 흐름과 균일한 수중 전계 분포를 고려하여 동축 실린더 형을 사용하였고, 수(水)중의 백금 전극은 수중 방전시 전극 재료의 수소 이온화 경향에 의해 부식되는 것을 막기 위해 사용되었다. 실험에 사용한 전원은 최대 정격 전력 $150[\text{W}]$, 주파수 $20[\text{kHz}]$, 최대 출력 전압이 $20[\text{kV}]$ 인 전원을 사용하였는데, 인가 전압이 $6[\text{kV}]$ 일 때의 소비 전력은 약 $12[\text{W}]$ 로 측정되었고, 인가 전압 $12[\text{kV}]$ 에서는 소비 전력이 약 $20[\text{W}]$ 로 측정되었다. 그리고 처리 시간, 인가 전압, 수(水)유량 그리고 유전체구의 크기 등의 다양한 파라미터에 대해 실험을 실시하였다.

3.1 수(水)방전관의 유량과 전압에 대한 대장균 제거 특성

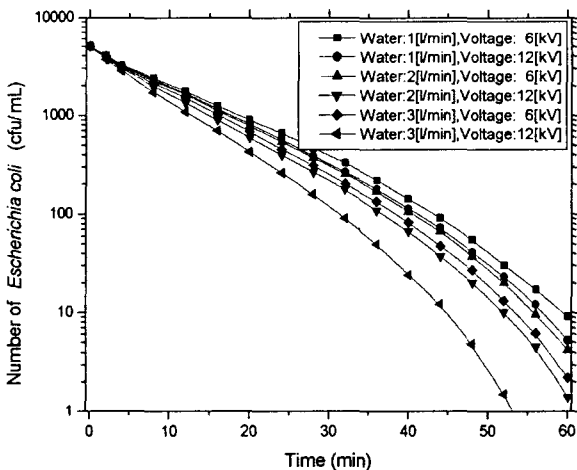


그림 5 유량과 전압에 대한 대장균 제거 특성
Fig. 5 The removal characteristics of *Escherichia coli* to voltage and flow ratio

그림 5는 인가 전압 $6[\text{kV}]$ 와 $12[\text{kV}]$, 수유량 1, 2, 3[l/min], 전극 간격 $12[\text{mm}]$ 그리고, 직경 $5[\text{mm}]$ 인 구형 유전체(SiO_2)를 방전관에 충전한 경우에 방전 시간 경과에 따른 방전관 내의 수중 대장균의 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과,

인가 전압이 높을수록 제거율이 높게 나타났고, 전체 수량이 2[l]로 일정할 경우, 물의 단위 시간당 수유량이 많을수록 제거율이 전반적으로 증가됨을 알 수 있었다. 이는 전압이 상승하면 수중 전계가 동시에 상승하기 때문에 제거율이 높아진 것으로 대장균과 같은 세균의 경우에 세균 자체에 인가된 전압이 약 $3[\text{V}]$ 이상일 때, 세균의 핵이나 세포막이 전계나 전류에 의해 파괴되어 사멸되기 때문이다. 그러므로 세균의 크기가 $10^{-6}[\text{m}]$ 전후일 경우에는 약 $3[\text{kV/m}]$ 이상의 전계가 세균에 인가된다고 하면 세균을 충분히 사멸시킬 수 있는 조건이 된다. 그리고 앞의 시뮬레이션의 결과를 참고하여 살펴보면, 방전관에 $10[\text{kV}]$ 의 전압을 인가할 경우에 유전체구 부근의 거의 모든 영역의 전계 수치가 $3[\text{kV/m}]$ 이상이 되는 결과를 나타내므로, 방전관 내의 대장균이 대부분 시간이 지남에 따라 사멸될 것을 예상할 수 있다. 그림 5를 살펴보면, 수조 내부 전체 물의 양과 인가 전압이 일정하고, 수유량만이 증가할 경우의 실험 결과를 살펴보면, 이 경우에 단위 시간당 방전관 통과 횟수가 증가하게 되는데, 결과적으로 방전관 내의 수중 대장균이 고전계 영역과 접촉할 확률이 높아진다. 즉, 동일 전압 및 전계에 대해 수유량이 증가할 경우, 수중 대장균의 제거율은 증가되는 결과를 나타내게 된다. 그림 5는 이러한 결과를 나타내고 있는 일 예이다. 그러나 시험수의 수유량 2[l/min], 전압 $12[\text{kV}]$ 인 경우가 수유량 3[l/min], 전압 $6[\text{kV}]$ 인 경우보다 대장균의 제거 특성이 좋게 나오는데, 이것은 어느 일정 이상의 수유량의 범위에서는 상대적으로 수유량보다 인가 전압에 의한 전계의 영향이 더 크게 작용됨을 의미한다.

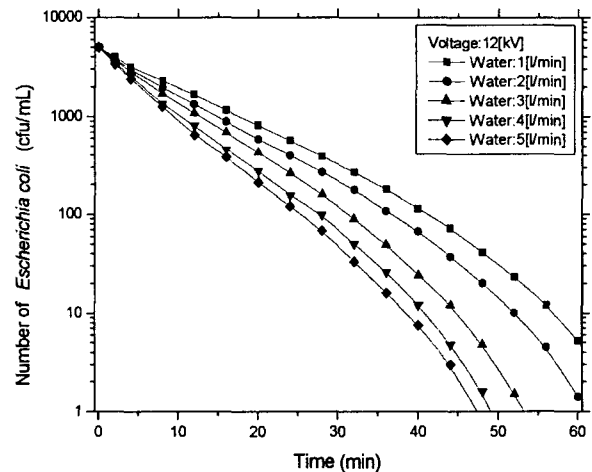


그림 6. 유량 변화에 대한 대장균 제거 특성
Fig. 6 The removal characteristics of *Escherichia coli* to flow ratio

그림 6은 인가 전압 $12[\text{kV}]$, 수유량 1~5[l/min], 전극 간격 $12[\text{mm}]$ 그리고, 구형 유전체 직경이 $5[\text{mm}]$ 일 때, 방전 시간에 대한 수중 대장균의 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과를 살펴보면, 그림 5의 결과에서의 수유량의 영향과 동일하게 수유량이 증가할수록 방전관 내의 수중 대장균의 제거율이 점차적으로 상승하는 경향을 보이고 있다. 하지만 수유량을 지속적으로 증가할 경우에 일정하게 비례적으로 방전관 내부의 수중 대장균의 제거량이 증가되는 특성은 나타나지

않고 있다. 이는 수유량이 증가함에 따른 대장균의 제거 특성이 방전 조건 및 방전관의 내부 조건에 따라 포화 경향을 나타내기 때문이다. 그러므로 본 유전체구를 충전한 방전관의 수중 대장균 제거 실험의 경우에 수유량은 대장균의 제거 시기의 단축이라는 점을 기준으로 보면, 약 3~4[l/min] 정도의 수유량이 본 실험에서 적절한 수유량이라고 사료된다.

3.2 유전체(SiO₂)구의 사용에 따른 수중 대장균 제거 특성

그림 7은 인가 전압 12[kV], 수유량 3[l/min], 전극 간격 12[mm], 구형 유전체 직경이 2[mm], 3.5[mm], 5.0[mm]일 때, 방전 시간에 대한 수중 대장균의 제거 특성을 나타낸 것이다. 구형 유전체의 크기가 상대적으로 크질수록 수중 대장균의 제거 특성이 좋아지는 특징을 나타냈다. 이는 방전관의 내부에 충전된 구형 유전체의 직경이 큰 경우가 상대적으로 작은 경우보다 전계가 강하게 형성되기 때문이다. 하지만 구형 유전체가 상대적으로 커지게 되면, 방전관의 외경이 고정일 경우에 상대적으로 유전체구의 충전 갯수에 큰 제한을 받게 되고, 동일 체적당 방전관 내부 점전계가 수가 상당히 줄어들어 발생하는 문제점이 있다. 그리고 구형 유전체의 크기가 너무 작은 경우에는 수류의 흐름을 막기 때문에 충분한 수류를 흘리는데 있어서 큰 문제가 될 수 있다. 그러므로 본 실험과 같이 방전관 내부에 물을 흘리면서 유전체구 표면에서의 고전계 발생을 원하는 경우에는 앞의 문제점을 동시에 고려하여 적절한 방전관의 크기와 유전체구를 선정해야 한다. 그리고 다양한 파라미터에 대한 실험을 통해 최적 조건을 찾아야 한다고 사료된다.

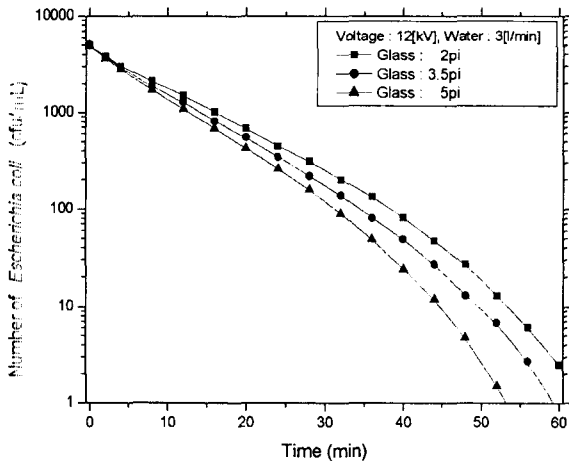


그림 7 구형 유전체의 크기에 대한 대장균 제거 특성
Fig. 7 The removal characteristics of *Escherichia coli* to globular dielectric

한편, 본 실험에 사용된 방전관의 외경의 설계는 외경이 증가할 경우에 방전 거리가 상대적으로 증가하는 결과를 가져와 방전관의 크기에 따른 일정 전계를 유지하기 위해서 방전관에 인가하는 전압을 수식 2.1에서 알 수 있는 바와 같이 거리(d)에 대해 비례적으로 증가해야 하는 문제가 발생한다. 그리고, 이 경우에 있어서는 고전압 전원의 출력 전압을

방전관의 외경의 크기의 증가에 따라 비례적으로 증가시켜야 하는 문제점을 동시에 가진다. 그러므로 방전관 내부의 수중 대장균의 제거에 필요한 전계와 단위 시간당 수유량 그리고, 고전압 전원 장치의 출력 전압과 용량 등의 다양한 점들을 고려하여 방전관의 외경을 24[mm], 내경을 20[mm]로 설계하였다. 그리고 이러한 실험 조건에서 대장균이 완전 제거될 때까지의 방전 시간은 구형 유전체의 직경이 5[mm]인 경우가 직경이 2[mm]일 때보다 약 10분 정도 처리 시간이 단축되는 결과를 나타내었다.

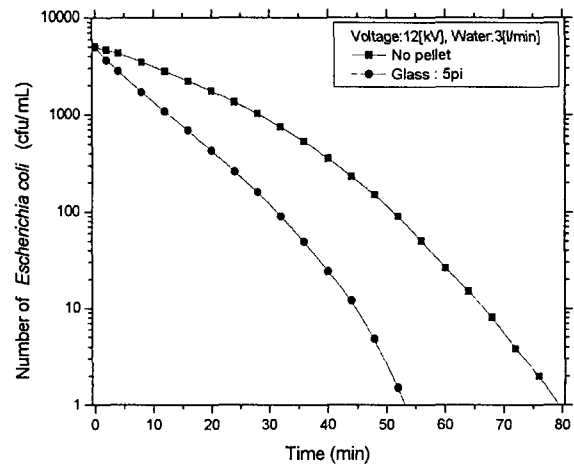


그림 8. 구형 유전체의 유무에 대한 대장균 제거 특성
Fig. 8 The removal characteristics of *Escherichia coli* to existence of globular dielectric

그림 8은 인가 전압 12[kV], 수유량 3[l/min], 전극 간격 12[mm]의 조건에서 직경 5.0[mm]인 구형 유전체를 방전관 내부에 충전한 경우와 구형 유전체를 충전하지 않은 경우의 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과를 살펴보면, 세균이 완전히 제거되는 시점은 직경 5.0[mm]의 구형 유전체를 사용한 경우에는 약 53분 정도 소요되는 특징을 나타내었고, 구형 유전체를 사용하지 않은 경우는 약 80분 정도의 시간이 소요되는 특징을 나타내었다. 이것은 유전체구를 사용할 경우, 유전체의 형상과 물성에 따라 강한 유전 분극 특성이 나타나기 때문에 대장균의 제거 특성이 좋아지는 것을 의미한다.

5. 결 론

구형 유전체(SiO₂)를 충전한 수방전관을 이용한 수중 대장균의 제거 특성 실험 결과는 다음과 같다

첫째로, 전압의 영향을 살펴보면, 인가 전압이 높은 경우가 낮은 경우보다 전계가 비례적으로 증가함으로 인해 방전관 내부 수중 대장균의 제거 특성이 우수하게 나타났다.

둘째로, 유량의 영향을 살펴보면, 수조 내의 시험수를 순환하는 방식의 경우, 단위 시간당 시험수의 방전관 통과 횟수를 증가된다. 그러므로 수유량 증가시 수중 대장균이 고전계 영역 즉, 구형 유전체의 상호간의 접합 영역, 방전관과 구형 유전체

가 만나는 영역 또는 수중 고전계 영역과 접촉할 기회가 증가되어지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 높아지는 결과를 나타내었다.

셋째로, 구형 유전체의 직경이 2[mm], 3.5[mm], 5.0[mm]인 경우에 처리 시간에 대한 수중 대장균 제거 특성을 측정 한 결과를 살펴보면, 유전체의 직경이 큰 경우의 전계가 상대적으로 직경이 작은 유전체구의 전계보다 높게 나타나기 때문에 수중 대장균의 제거 시간이 단축됨을 알 수 있었다. 그리고 방전관 내부에 유전체구를 충전한 경우가 유전체구를 충전하지 않는 경우보다 수중 대장균 제거에 소요되는 시간이 약 30[%] 정도 단축되는 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] 이동훈, 박재윤, 이현수, "전자계 촉매형 플라즈마 반응기의 질소 산화물 제거 특성", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 15, No.6, pp. 634-640, June 2002.

[2] 이동훈, 박재윤, 박상현, "고전압 방전에 의한 이산화탄소의 제거 특성", 대한전기학회 추계학술대회, Sep. 2002.

[3] 이동훈, 박재윤, 박상현, "자계를 이용한 질소 산화물의 제거 효과", 대한전기학회 전문대학 학술발표, June 2002.

[4] 이동훈, 박홍재, 박재윤, "수중 직접 방전 전극의 최적 전극 형상 설계", 대한전기학회 고전압 방전 응용 연구회 춘계학술대회, PP. 60-63, April. 2003.

[5] 김용호, 홍상희, "교류 유전체장벽 코로나방전을 이용한 NOx/SOx 분해 실험", 한국물리학회지 응용물리 11호, pp. 393-400, 1998.

[6] 이동훈, 조국희, "Ti-Si-Al형 세라믹 촉매 방전관의 오존 발생특성 연구", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, No.6, pp. 130-136, June, 2002.

[7] Woo Seok Kang, Yong-Ho Kim, and Sang Hee Hong, "Spatio-temporal images of single streamer propagation in dielectric barrier discharge", IEEE Transaction on Plasma Science, pp. 166-167, 2002.

[8] H. K. Joo, M. S. Jeon, and T. K. Lee, "Photocatalysts : Theory and Its Application", J. of Korean Soc. of Environmental. Eng., Vol. 21, No.6, pp. 1231, 1999.

[9] 이동훈, 박재윤, 박홍재, 고희석, 이현수, "구형 유전체 비드를 가지는 단층 절연 방전관의 H₂O₂ 농도 측정 및 전계 분포 시뮬레이션", 전기전자재료학회 영호남학술대회, pp. 44-47, August, 2003.

[10] 이동훈, 박홍재, 박재윤, 고희석, "구형 유전체 비드를 가지는 단층 절연 방전관의 수(水)오존 농도측정 및 전계 분포 시뮬레이션", 전기전자재료학회 영호남학술대회, pp. 40-43, August, 2003.

[11] 김진규, "유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해수 발생 특성", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, No.4, pp. 46-54, July 2002.

[12] 이동훈, 박재윤, 박홍재, "Ba-Ti-Si 세라믹 방전관의 오존 발생 특성", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 16, No.7, pp. 634-640, July 2003.

[13] 이동훈, 박재윤, 박홍재, 고희석, "대기중에서 구형 유전체의 전계 분포 시뮬레이션", 대한전기학회 논문지, Vol. 52, No.7, pp. 305-309, July 2003.

[14] Costas Tsouris, "A Pulseless Corona Discharge Process for the Oxidation of Organic Compounds in Water", American Chemical Society, Vol. 39, pp. 4408-4414, 2000.

[15] J.Tanaka, K.Hirano, A.Toyoda, "Ozone Treatment of Persistent Organic Chemical Wastewater", IEEE Trans, 7803-5406-6, 1999.

[16] Hiroshi NOGUCHI, Shigeo SATO, "Decomposition of Organic Substances in Water by Combined O₃/TiO₂/UV Process for the Reuse of Wastewater", Meidensha Corporation. 2001.

[17] Ilie Suarasan, Lctitia Ghizdavu, "Experimental characterization of multi-point corona discharge devices for direct ozonization of liquids", Journal of electrostatics Vol. 54, pp. 207-214, 2002.

[18] Igor V. Lisitsyn, Hiroaki Nomiya, "Streamer discharge reactor for water treatment by pulsed powr", Rev. Sci. Instum. Vol. 70, No.8, August 1999.

[19] B.Sun, M.Sato, "Non-uniform pulse discharge-induced radical production in distilled water", journal of Electrostatics, Vol. 43, pp. 115-126, 1998.

[20] N.M. Efremov, B.Yu. Adamiak, "Experimental Investigation of the Action of Pulsed Electrical Discharges in Liquids on Biological Objects", IEEE Trans. Vol. 28, No.1, 2000.

[21] Staehelin, J. and J. Hoigne, "Decomposition of Ozone in water: Rate of Initiation by Hydroxide Ion and Hydrogen Peroxide", Environ. Sci. & Technol., 1982.

저 자 소 개



이 동 훈 (李 東 勳)

1972년 2월 24일생. 1996년 경남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주) 미래위더에어텍 대표. 주관심분야 : 수방전 세균처리기, 전기집진기, 진공스위치(IPS, VDOC), 유방전 수소발생기, 가스 센서, 고전압 펄스 방전, 오존 발생 장치, 고주파 전원, 고전압 차단 설비.

Tel : 055) 232-3444, H.P : 018) 582-3444
E-mail : 2323444@hanmail.net