

Al₂O₃ 비드를 가지는 방전관의 전계 및 대장균 제거 특성

이태관[†] · 이동훈*

계명대학교 환경대학 · *환경관리공단 유역관리처

(2006년 1월 27일 접수, 2006년 6월 20일 채택)

Electric Field Simulation and Removal Characteristics of *Escherichia coli* for Discharge Tube with Al₂O₃ Bead

Tae-Gwan Lee[†] · Dong-Hoon Lee*

Department of Environment Science, Keimyung University · *Environmental Management Corporation

ABSTRACT : The simulation of electric field distribution of discharge tube with globular Al₂O₃ and the removal characteristic of *Escherichia coli* by the discharge tube with globular Al₂O₃ were estimated. The removal characteristic of *Escherichia coli* was related to the input voltage because the electric field is increased according to input voltage. As the passing amount of test water in discharge tube is increased, the removal ratio of *Escherichia coli* was increased because passing numbers of electric field section is increased. As the particle size of globular Al₂O₃ increased, the removal time of *Escherichia coli* was shortened due to the dielectric polarization of globular dielectric Al₂O₃. Also, the removal efficiency of *Escherichia coli* for the discharge tube with globular dielectric Al₂O₃ was higher than that of the discharge tube without it.

Key Words : *Escherichia coli*, Dielectric, Discharge, Al₂O₃ Bead

요약 : 본 연구에서는 구형 Al₂O₃를 갖는 방전관에 대한 전기분포의 시뮬레이션과 대장균 제거 특성을 조사하였다. 구형 Al₂O₃를 갖는 방전관을 이용한 대장균의 제거 특성을 실험한 결과 인가전압이 증가하면 전계도 증가를 하게 되는데 대장균의 제거 특성은 인가전압 즉 전계강도에 관계가 있음을 알 수 있었다. 그리고 방전관의 시험수 통과량이 증가하면 단위 시간당 전계영역의 통과횟수가 증가하기 때문에 대장균의 제거율이 증가하는 경향을 보였다. 또한 구형 Al₂O₃의 직경이 증가하면 유전체의 유전분극이 높아져 전계가 증가하기 때문에 전반적인 대장균 제거시간이 줄어드는 것을 알 수 있었고 구형 유전체를 갖는 방전관의 대장균 제거율은 유전체가 없는 경우보다 훨씬 높게 나타났다.

주제어 : 대장균, 유전체, 방전, 알루미늄 비드

1. 서론

물(水)은 공기와 더불어 지구상의 모든 생명체가 반드시 필요로 하는 물질중의 하나이다. 그러나 인간의 산업화, 공업화 과정에서 발생된 대기 오염 물질과 각종 폐기물 중에서 인체에 유해한 성분들이 수중으로 흘러 들어가면서 화학적 반응과 생물학적 작용에 의하여 지표수와 지하수는 지속적으로 오염이 심해지고 있다.^{1~5)} 자연발생적인 오염원의 양보다 훨씬 많은 인위적 오염원이 강과 하천 등으로 흘러 들어감으로써 인간 생활의 주변 환경은 매년 더 악화되고 있다. 그 결과 식수원의 수질 하향과 수중 유해 세균에 의한 질병 발생이 매년 증가 추세에 있고, 이와 관련한 내용을 언론, 환경단체 등의 다양한 매체를 통하여 쉽게 접할 수 있다. 이러한 환경사고 중에서 수질오염에 의한 사고의 경우 한 번

발생하게 되면 수많은 사람들이 오염원에 노출되어 폭 넓은 지역에서 많은 주민에게 고통과 발병이 발생하는 특성을 보여주고 있다.^{11~14)} 그러므로 수질오염에 의한 사고의 경우 그 파급 효과는 대단히 광범위하며 심각할 수 있다.^{15~17)} 따라서 먹는 물의 수질 기준은 모든 환경 기준 중에서 가장 엄격하게 설정되어야 하고, 향후 수질 환경 기준법은 환경오염의 심화로 더욱 강화되어야 한다고 사료된다. 그리고 현재 환경오염의 저감을 위하여 많은 연구 기관에서는 자외선을 이용한 대장균의 제거하거나 수표면의 고전계 방전을 이용하는 등의 방법으로 수중 유해물질의 제거에 많은 노력을 하고 있고, 관련 기술의 발전도 급속히 진행되고 있다.^{3~5)}

본 논문은 이러한 수질 기준법의 강화에 맞추어 수질 오염원의 개선 방법의 하나로서, 구형 유전체(Al₂O₃)를 갖는 수중 방전관을 이용하였다. 이 방전관에 전원을 인가하게 되면 구형 유전체 사이에 강한 유전분극 즉 전계가 형성되는데, 이 때 발생하는 강한 전계를 이용하여 시험수 내부 대장균(*Escherichia coli*) 제거 특성을 조사하였다. 그리고 방전관

[†] Corresponding author

E-mail: 2323444@hanmail.net

Tel: 018-582-3444

Fax: 061-691-8804

내부 전계분포도 해석하였다.⁶⁻⁹⁾

2. 시뮬레이션

2.1. 유전체 비드의 유전분극 특성

유전체 분극에서 일반적인 유전 분극의 세기는 두 점전하가 갖는 대전 전하량의 전계 강도(V/m)의 특성에 의존한다. 이러한 특성은 쿨롱의 법칙과 이 법칙과 관련된 전계(E)와 전하량(Q) 그리고 정전용량(C)과 관련된 수식에 의해 설명할 수 있다. 즉 Fig. 1과 같이 전극에 인가된 전압에 의해 대전된 직렬의 다중 점전하의 특성을 다음의 수식들로써 설명할 수 있다.

$$F = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} \quad (1)$$

(비례상수: $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 거리: R , 전하: Q)

$$E = K \frac{Q}{R^2} \quad (2)$$

$$Q = CV \quad (3)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{s}{d} \quad (4)$$

식 (1)은 쿨롱의 법칙으로 두 정전하 Q_1 과 Q_2 의 대전 전하량의 크기와 성질에 따라 두 전하 사이의 힘의 관계 즉, 인력과 척력이 결정되는 것을 의미하고, 식 (2)는 단일 정전하의 전계 강도를 나타내며, 식 (3)은 기본적으로 정전하의 대전 전하량은 콘덴서에 인가된 전압과 콘덴서의 용량에 비례하고 있음을 나타내고 있다. 그리고 식 (4)는 콘덴서의 정전용량을 나타내는 식으로 고정 상수인 진공의 유전율(ϵ_0)과 비례 상수인 전극 사이에 인가되는 물질의 비유전율(ϵ_r) 그리고 마주보는 전극 면적(s)과 반비례 상수인 거리(d)로 나타내어진다. 이와 같은 기본 조건들에 의하여 대칭형 전극에 대한 유전체구의 유전 분극 특성을 설명할 수 있다. Fig. 1과 같은 형상의 경우 대전 전하의 유전 분극에 의한 전계 강도는 인가전압에 정비례하는 특징이 있다. 그러나 유전체구의 크기가 변화하면 전극과 유전체구 또는 유전체구 상호간에 마주보는 면적(s)과 거리(d)가 가변적으로 되고, 이 때문에 전계 강도(V/m)가 유전체구의 크기에 대하여 일정한 비례 관계를 갖지 않는 특징이 있다. 이와 같이 유전체의 형상적 특징으로 인하여 식 (4)와 같이 비유전율(ϵ_r)에 대한 전계 강도(V/m) 또한 일정한 상수에 따른 비례 관계식으로 나타내기 힘들며, 이에 대한 설명은 다음의 전계 시뮬레이션 결과들의 비교 분석을 통하여 이해할 수 있다. 그리고 시뮬레이션 결과를 살펴보면 전극 양단에 전압을 인가할 경우, 전극에 접촉되어 있는 유전체구는 전극면의 전하와 반대

의 성질을 갖는 전하들이 모이고, 이 유전체구의 반대쪽에는 이와 동일한 양(量)의 반대 성질의 전하가 유전체구에 대전되게 된다. 이러한 전하가 직렬로 겹쳐 있으면 앞서 설명한 형태와 동일한 대전 형태가 반복적으로 나타나는 특징을 보인다. 이 때 유전체구와 유전체구 사이 또는 전극과 유전체구의 접점 부근에는 앞서 설명한 복합적인 이유 때문에 강한 점전계가 형성된다. 이와 같은 점전계의 세기는 유전체구의 물리적 성질인 비유전율의 크기와 밀접한 관계를 갖게 된다.

2.2. 전위 해석

Fig. 1은 전자계 해석 프로그램 Flux II-D를 이용하여 실제 실험에 앞서 수(水)중에서 구(球)형 유전체를 갖는 방전관 내에 전압을 인가하였을 때의 전위 분포에 대한 시뮬레이션을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 상부와 하부 전극 간격은 실제 방전관의 전극 형상 및 간격을 모의한 12 mm로 설계되어 있고, 구형 유전체가 존재하는 내부 공간의 상부와 하부 간격은 10 mm로 설계하였으며, 시뮬레이션에서 적용된 유전체구의 지름은 $\varnothing 5$ mm이다. 그리고 이 구형 유전체의 비유전율은 5로 설정하고 그 때의 수중 전위분포의 특성을 알기 위하여 Fig. 1의 상부면에는 0 V, 하부면에는 10 kV의 전압을 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다.^{3,4)} 전위 해석 결과, 전극 형상이 평판 전극일 경우 일반적으로 평등 전계에 의하여 전위 분포가 평행한 균등 전위분포를 나타내지만 비유전율 약 12인 유전체(Al₂O₃) 비드가 지름 2 mm인 원통형 방전관 내부에 존재함으로써 균등한 평등 전계의 분포가 아닌 비대칭형 전계 분포를 나타내었다. 그 결과 방전관 내부의 구형 유전체가 서로 접하는 부분, 즉 방전관과 구형 유전체가 만나는 부분에서 등전위 경계층이 휘어지는 현상을 시뮬레이션 결과에서 알 수 있었다. 그러므로 이러한 부분에서 고전계가 형성되기 때문에 시험수가 방전관 내부를 통과할 때 대장균의 제거율이 향상될 것으로 판단된다.⁵⁾

2.3. 전계 해석

Fig. 2(a)는 시뮬레이션을 위한 전처리 과정에서 해석 영역을 삼각셀로 분할한 형상으로, 수중방전 구간에서 구형 유전체(Al₂O₃) 비드가 서로 접하는 부분의 정확한 해석을 위해 셀을 조밀하게 나눈 모습이다.

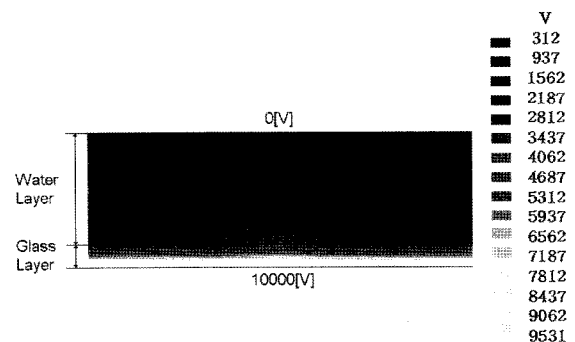


Fig. 1. Simulation of electric potential distribution.

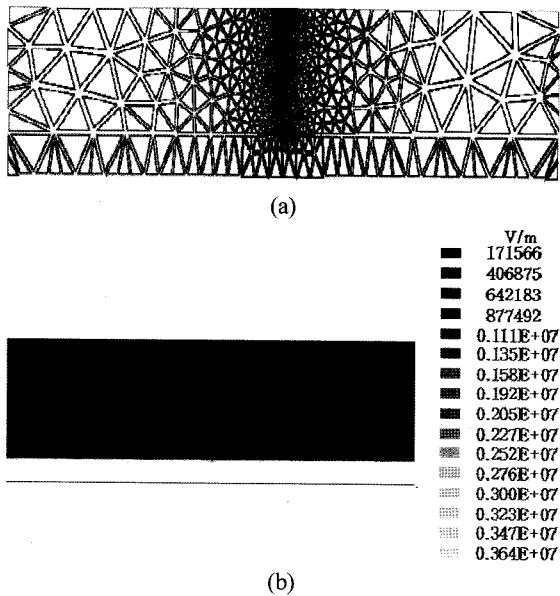


Fig. 2. Simulation of electric field distribution.

Fig. 2(b)는 유전체(Al_2O_3) 비드 $\varnothing 5$ mm를 수방전관 내부에 설치하였을 때의 전기 분포를 전산 해석한 결과이다. 해석 결과 방전관 내부의 구형 유전체가 맞닿는 부분 및 근처 영역에서 강한 전계가 발생하는데, 인가전압이 10 kV일 때, 최대 전계는 방전관과 구형 유전체가 맞닿는 부분에서 약 36.4 kV/m를 나타내었고, 구형 유전체가 서로 맞닿는 부분에서는 약 10 kV/m의 전계가 형성되는 것으로 나타났다. 해석결과 시험수를 방전관에 통과시킬 때, 유전체에 의하여 고전계가 형성되므로 대장균 제거에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 $\varnothing 3.5$ mm이하의 비드를 사용할 경우에는 비드 $\varnothing 5$ mm보다 수중에서 전하분극이 잘 일어나지 않는 결과를 나타내었는데, 이는 비드의 직경이 줄면서 수식 (3), (4)에 나타난 바와 같이 전극과 비드 또는 비드와 비드 사이에 서로 마주보는 단면적이 줄어들어 전계집중이 상대적으로 약해지기 때문이다. 그리고 비드의 지름이 약 $\varnothing 3.5$ mm보다 작을 경우는 시험수가 흘러가야 하는 방전관 내부 비드 사이의 공간이 상당히 많이 줄어들어 압력손실이 많이 발생하는데, 결과적으로 수(水)펌프의 용량을 증가시켜야 하는 문제가 있어 실험 조건에서는 적절하지 않다고 사료된다.⁵⁾

3. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 본 실험에 사용한 방전관의 형상을 투시도로 나타낸 것으로 수중전극, 외부전극, 알루미늄 비드, 수중전극 지지틀 위한 마개 등으로 구성되어 있다.

Fig. 4는 전체 실험 장치를 나타낸 사진으로 전극이 부착된 수방전관, 수유량을 표시하는 수량계, 시험수를 모아두는 수조, 고압 전원부, 수(水)펌프와 시료 채취부 등으로 구성되어 있고, 방전관의 구조는 유리로 제작된 원통형 방전관(내경: $\varnothing 24$ mm, 길이: 250 mm)으로서 방전관 내부에는 유전체 비드(직경: $\varnothing 5$ mm, Al_2O_3 , ϵ_r : 12)가 채워져 있으며,

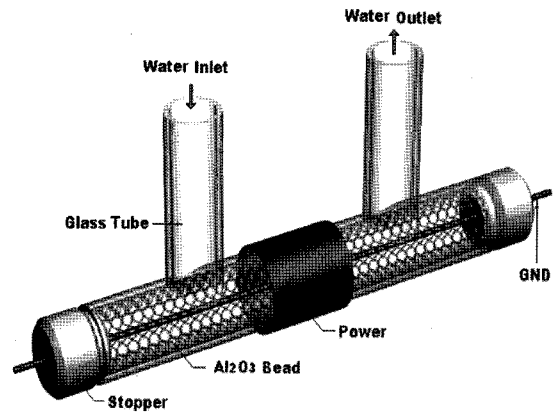
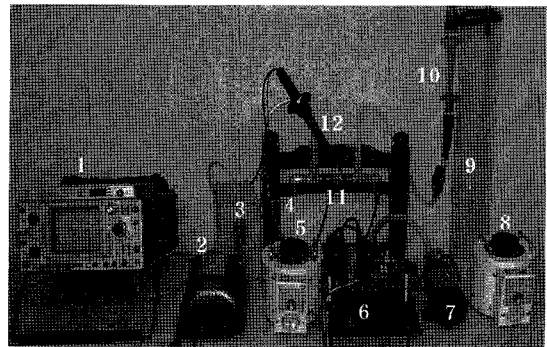


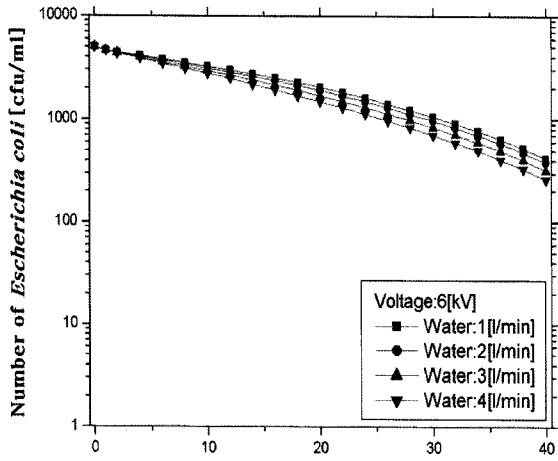
Fig. 3. Figure of discharge tube.



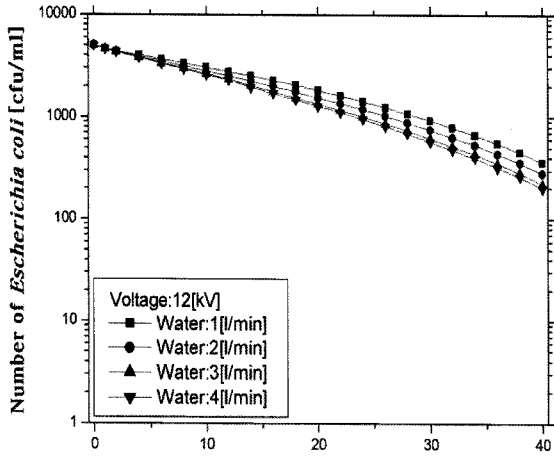
- | | | |
|-------------|-------------|------------|
| 1. 오실로스코프 | 2. Air 펌프 | 3. Air 조절부 |
| 4. 인제터 | 5. 전원전압조절 | 6. 전원 장치 |
| 7. 수(水)펌프 | 8. 수(水)량 조절 | 9. 수조 |
| 10. 수(水)유량계 | 11. 방전관 | 12. 전압 분압기 |

Fig. 4. Experimental device.

이 방전관의 외부와 중심부에 전극이 설치되어져 있다. 그리고 두 전극 사이에 20 kHz, 6~12 kV의 교류 전압이 인가되는 동안 방전관을 통과한 시험수 5 L에 존재하는 대장균의 제거 특성을 조사하였으며, 시험수는 수(水)펌프에 의해 연속적으로 순환(By-pass)이 되도록 구성하였다. 시험수는 일반 지하수에 초기 대장균수를 1 mL당 약 5,000개 정도의 개체가 존재하도록 정류수와 세균의 농도비를 조절하여 실험에 사용하였다. 그리고 대장균의 제거 특성을 알기 위하여 시험용 대장균 배양지인 3M Petrifilm(Coliform Count Plate, 3M Co., USA)을 사용하였으며 매 5회 이상의 평균 결과값을 데이터화하여 실험결과로 이용하였다. 그리고 방전관은 물의 흐름과 균일한 수중 전기 분포를 고려하여 동축 실린더형을 사용하였다. 수(水)중의 전극은 수중 방전시 전극 재료의 수소 이온화 경향을 고려하여 백금선을 사용하였으며, 실험에 사용한 전원은 최대 정격 전력 150 W, 주파수 20 kHz, 최대 출력 전압 20 kV의 전원을 사용하였다. 그리고 수중오존을 측정하기 위해 시험수에 오존과 반응하는 지시약을 녹인 후, 시험수 전후단의 자외선 투과량을 상호비교를 분석하는 수질분석기(975-MP 20)를 사용하였다. 이외의 다양한 파라미터로 처리 시간에 대한 인가전압, 수(水)유량 그리고 구형 유전체의 크기 등의 파라미터에 대하여 실험을 실시하였다.



(a) Source : 6kV



(b) Source : 12kV

Fig. 5. Removal characteristics of *Escherichia coli* to voltage and flow ratio without bead.

4. 결과 및 고찰

4.1. 수(水)방전관의 유량과 전압에 대한 대장균 제거 특성

Fig. 5(a)는 인가전압 6 kV, Fig. 5(b)는 인가전압 12 kV 일 때, 시험수의 순환(By-pass)유량 1, 2, 3, 4 L/min, 전극 간격 12 mm, 구형 유전체를 사용하지 않았을 경우의 처리 시간에 대한 수중 대장균 제거특성을 로그(Log)형태의 그래프로 나타낸 것이다. 실험결과 인가전압 증가에 매우 낮은 제거특성을 나타내었고, 인가전압 고정시 순환에 의한 시험수의 전계영역을 통과한 횟수 즉 유량을 증가할 경우 대장균의 제거율이 증가하는 특성을 보였다.

4.2. 수(水)방전관의 구형 Al₂O₃에 대한 대장균 제거 특성

Fig. 6는 전압 12 kV, 유량 1~5 L/min, 전극 간격 12 mm, 유전체 비드의 직경이 5 mm일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 비드를 사용할 경우의 효과를 살펴보기 위해 Fig. 5(b)의 결과와 비교하면 매우 큰 차이를 확인할 수 있다. 그리고 유량이 많을수록 앞의 실험 결과와 같이 다소 제거율이 증가하는 것으로 나타났다. 이

는 시험수가 빨리 순환될 경우 즉 유량을 증가시킬 경우 단위 시간당 방전관을 통과하는 횟수가 증가되기 때문에 수중 대장균이 고전계 영역과 접촉할 확률이 상대적으로 증가하기 때문으로 사료된다.^{3,4)}

Fig. 7은 비드의 크기에 따른 대장균의 제거특성을 나타낸 것으로 유전체 비드의 크기가 증가할수록 대장균의 제거 시간이 짧아지는 것으로 나타났는데 본 실험에서 방전관의 내경이 일정하게 고정되어 있고 비드 직경이 3 mm 이하에서는 방전관내 물의 흐름이 급격히 막혀 수펌프에 무리가 가해져 시스템 운영에 문제가 발생하였고, 비드 직경이 10 mm 내외가 되면 반응기의 직경도 매우 커져야 하는데, 이 경우 비드 상호간에 전계가 집중되는 지점의 수가 줄어드는 등으로 인해 관련 기술적 특성인 전계 집중 현상을 충분히 이용할 수 없어 시스템이 전반적으로 비효율적이 되었다. 이러한 결과는 다양한 비드의 크기에 대한 전계해석 및 실제 물이 흐르는 실험을 통해 그 결과에서 얻을 수 있었는데 최종적으로 가장 적절한 비드의 크기는 4.5~5.0 mm 정도인 것으로 나타났다.^{3~5)}

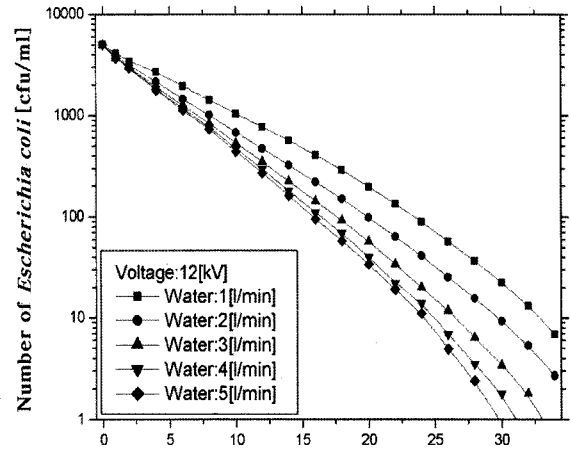


Fig. 6. Removal characteristics of *Escherichia coli* to voltage and flow ratio with bead.

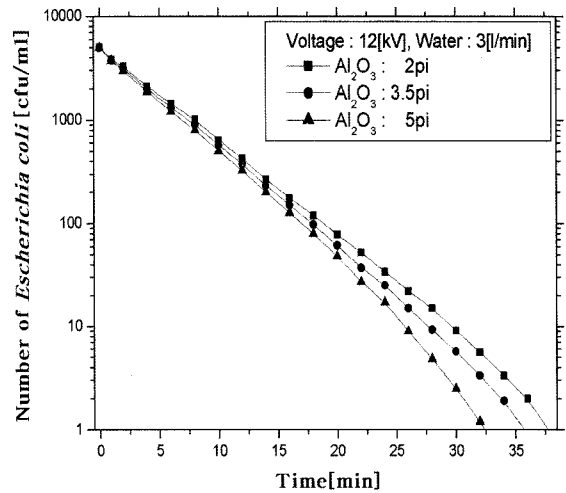


Fig. 7. Removal characteristics of *Escherichia coli* to size of bead.

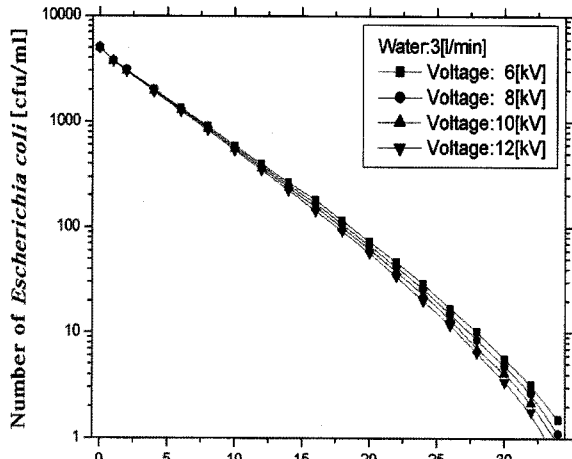


Fig. 8. Removal characteristics of *Escherichia coli* to voltage of discharge tube with bead.

Fig. 8은 유량을 3 L/min로 일정하게 유지하고 인가전압에 대한 대장균의 제거 특성을 나타낸 것으로 앞서 기술한 본 실험결과를 전체적으로 비교하여 보면 상대적으로 유량 및 유전체 비드의 크기가 인가전압보다 대장균의 제거에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 9는 유전체 비드의 사용 유무에 대한 대장균의 제거 특성을 나타낸 것으로 유전체 비드를 사용하지 않을 경우 최종 처리시간이 약 72분 정도가 소요되었고, 유전체 비드를 사용할 경우 약 33분정도에서 시험수 내부 대장균이 완전 사멸되는 특성을 나타내었다.^{3~8)}

Fig. 10은 인가전압 12 kV, 유량 3 L/min의 조건에서 비드 사용 유무에 대한 시험수 내부의 수중 오존 농도를 측정한 것이다. 실험결과 유전체 비드를 사용할 경우 비드 부근의 강한 전계에너지로 인해 물이 이온화되어 수중에서 강한 산화제인 오존이 생성됨을 알 수 있고, 시험수 내의 대장균의 사멸은 강한 전계뿐만 아니라 수중에서 생성된 오존 등의 산화 및 환원 물질에 의해 이루어지고 있음을 알 수 있다.^{8~10)}

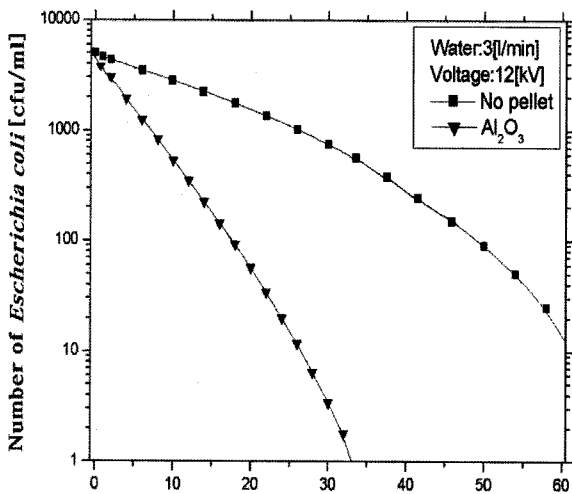


Fig. 9. Removal characteristics of *Escherichia coli* to use of bead.

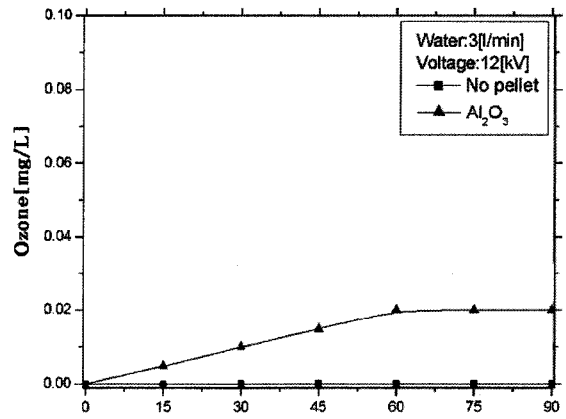


Fig. 10. Generation characteristics of ozone.

5. 결론

- 1) 전계 시뮬레이션 결과 유전체 비드 사이 및 방전관과 비드가 서로 닿는 부분에서 고전계가 형성되고 있어 이 부근을 시험수 내의 대장균이 지나갈 경우 사멸이 일어날 것으로 판단된다.
- 2) 유전체(Al_2O_3) 비드를 갖는 수방전관의 수중 대장균의 제거특성에 있어 인가전압을 높이면 전계치도 증가하는데, 이 경우 시험수 내의 대장균의 제거율도 증가하는 경향을 나타내었다.
- 3) 유량을 증가하면 단위 시간당 방전관을 통과하는 횟수가 증가되어 대장균이 고전계와 접촉 확률이 증가하여 제거율이 증가되었다.
- 4) 유전체 비드를 가지는 방전관에 전원을 인가하면 비드 부근의 강한 전계로 인해 물이 이온화되어 수중에서 오존이 발생하고, 이 결과 대장균 제거에 도움을 준 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 송원섭, 박상현, “ $BaTiO_3$ 슬러지 Packed bed형 반응기에서 NO_x 제거에 미치는 슬러지의 영향,” 전기전자재료학회논문지, **14**(10), 861~185(2001).
- 2) 이동훈, 김영배, “Ti-Si-Al형 세라믹 촉매 방전관의 오존 발생특성연구,” 조명전기설비학회논문지, **16**(6), 130~136(2002).
- 3) 이동훈, 이용무, “플라즈마 반응장치,” 특허 제 0479990호, March(2005).
- 4) 이동훈, 이용무, “플라즈마 반응장치,” 특허 제 0499980호, June(2005).
- 5) 이동훈 “수중방전/유중방전 겸용 플라즈마 반응장치,” 특허 제 0499917호, July(2005).
- 6) 이동훈, 박홍재, 박재윤, “수중 직접 방전 전극의 최적 전극 형상 설계,” 대한전기학회 고전압 방전 응용 연구회, pp. 60~63(2003).
- 7) 이동훈, 박재윤, 이현수, “전자계-촉매형 플라즈마 반응

- 기의 질소 산화물 제거 특성,” 전기전자재료학회 논문지, **15**(6), 634~640(2002).
- 8) 이동훈, 조국희, “Ti-Si-Al형 세라믹 촉매 방전관의 오존 발생특성 연구,” 조명전기설비학회 논문지, **16**(6), 130~136(2002).
 - 9) 김진규, “유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해수 발생특성,” 조명전기설비학회 논문지, **16**(4), 46~54(2002).
 - 10) 김용호, 홍상희, “교류 유전체장벽 코로나방전을 이용한 NO_x/SO_x 분해실험,” 한국물리학회지 응용물리, **31**(11), 393~400(1998).
 - 11) Mizuno, A., “Industrial Applications of Nonthermal Discharge Plasma in Environmental Technologies,” *12th Int. symp. High Voltage Eng.*, Bangalore, India, pp. 48~55 (2001).
 - 12) Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens, F., and Versraete, W., “Anaerobic Digestion of Ozonized Biosolids,” *Water Res.*, **34**, 2330~2336(2000).
 - 13) Ogata, A., Shintani, N., Mizuno, K., Kushima, S., and Yamamoto, T., “Decomposition of Ozone Using a Non-thermal Plasma Reactor Packed with Ferroelectric Pellets,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **35**(4)753~759(1999).
 - 14) 이동훈, 김종달, “선대 평판형 반응기의 NO₂ 생성에 미치는 O₂의 영향,” 대한전기학회 하계학술대회, 2050~2052(2000).
 - 15) 정재우, 이현돈, 전기일, 조무현, “무성 방전 공정의 오존 발생 특성에 관한 연구,” 대한환경공학회, **26**(3), (2004).
 - 16) 이동훈, 박홍재, 이현수, “구형 유전체 비드를 가지는 단층 절연 방전관의 수(水)오존 농도 측정 및 전계 분포 시뮬레이션,” 전기전자재료학회 영호남학술대회, pp. 40~43(2003).
 - 17) 박종섭, 최희철, 안규홍, 조재원, “촉매오존산화물 이용한 수용액상 자연유기물 분해,” 대한환경공학회, **24**(8), (2002).