

# 수중 방전을 이용한 유해 세균 검출 분석 연구

( A study on Harmful Bacillus Detection used discharge in water )

조국희\* · 김영배\* · 조문수\* · 박보현\*\* · 신광철\*\*\* · 이동훈\*\*\*\*

(한국전기연구원\* · (주)오쓰리테크\*\* · (주)태양엔지니어링\*\*\* · 미래워터에어텍\*\*\*\*)

(Kook-Hee Cho · Young-Bae Kim · Moon-Soo Cho · Bo-Hyun Park · Kwang-chul Shin · Dong-Hoon Lee)

## Abstract

In this research, we used discharge tube without dielectric bead or with dielectric beads(SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, or ZrO<sub>2</sub>) for removal of Escherichia coli. At the result of experiments, the removal characteristics of Escherichia coli appeared relation ratio to input voltage. Because, the electric field of discharge tube is increased when input voltage is increased. And, discharge tube used dielectric bead(ZrO<sub>2</sub>), the removal characteristics of Escherichia coli was better than cases of else.

## 1. 서 론

산업사회의 고도성장으로 대기 및 수질 등의 생활 환경 오염이 점차 시급한 문제로 대두되고 있다. 세계 각국에서는 환경 보호를 위해 규제와 행정 지도가 이루어지고 있을 뿐만 아니라, 환경 오염의 원인이 되는 오염 물질의 제거나 발생원의 저감을 위한 대책 마련이 시급한 실정에 있다.

한편 최근 지구 온난화의 영향으로 고온 다습한 여름 뿐만 아니라 겨울에도 이상 기후에 의해 우리 생활 주변의 물과 공기는 전염성이 강한 유해 세균을 내포하고 있다. 오염의 범위가 확대되면 집단 취락 시설에서 심각한 대장균이나 리스테리아 같은 유해 세균 감염이 발생된다. 그리고 실제 세균으로 인한 감염 사고가 발생하지 않아도 항상 지형적인 대량의 감염원을 내포하고 있으며, 특히 매년 여름이 되면 더욱 문제시되고 있다.

이에 수중 유해 세균을 저감하기 위해 본 실험실에서 수중 방전관을 자체 제작하여 수중 방전관의 유전체의 변화와 전압, 수유량에 따른 유해 세균의 변화를 조사하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 실험장치 및 개략도

그림 1은 실험 장치의 전체 구성 및 흐름을 나타낸 개략도이다. 실험 장치의 각 구성을 살펴보면, 우선 1차측 입력전압을 조절시 방전관 두 전극사이의 2차측 출력 전압이 6[kV]~12[kV]로 가변 할 수 있는 고압 전원

부, 일차측 입력 전압을 조절하여 수량을 1[ℓ]~7[ℓ]까지 가변 할 수 있는 수(水)펌프, Pyrex로 제작된 수방전관, 수(水)유량을 표시하는 수량계, 그리고 시험수를 담아주는 수조로 구성 되어 있다. 그리고 고전압 인가를 위한 고전압 전원 장치의 2차측의 출력 주파수는 약 14.5[kHz]이고, 수방전관과 수(水)부하에 대해 최대 출력 전압이 약 15[kV]가 되도록 전원을 직접 제작 하였다.

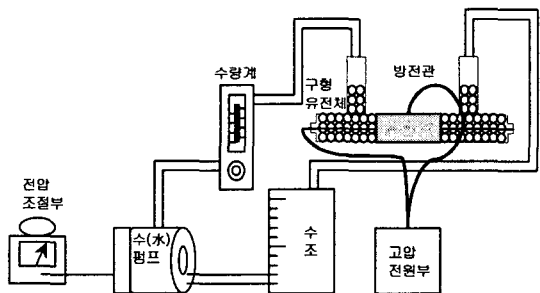
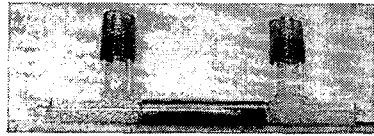


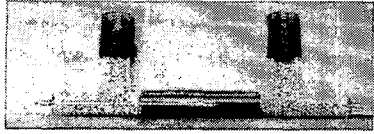
그림 1 실험 장치의 개략도

Fig. 1 The experimental schematic

그림 2는 본 실험에 사용된 방전관의 실제 사진이다. 방전관은 수류의 흐름과 수중의 균일한 전계 분포를 고려하여 동축 실린더형 방전관(외경 : Ø24[mm], 내경 : Ø20[mm], 길이 264[mm])으로서, 방전관 내부에는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>로 제작된 구형 유전체(Ø4.0[mm]) 비드가 충전되어 있고, 이 방전관의 내부 전극은 SUS304 (Ø1[mm])를 선(線)전극으로 되어 있으며, 외부 전극은 동(銅)테이프를 전극을 구성하였다.



(a) 방전관 + SiO<sub>2</sub>



(a) 방전관 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



(a) 방전관 + ZrO<sub>2</sub>

그림 2 구형 유전체 비드가 충전된 방전관  
Fig. 2 The discharge tube with spherical dielectric beads

## 2.2. 실험 방법

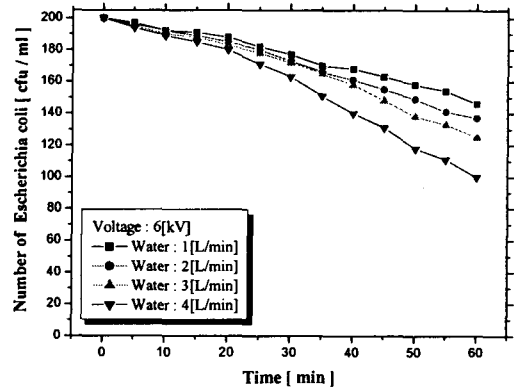
본 실험에서는 대장균을 젓당 배지법으로 대장균을 증식 및 배양하여 4~5[°C]의 온도로 냉장 보관하면서 지속적으로 실험에 사용 하였다. 실험상의 시험수 수량은 2[l]이고, 이 시험수 내의 대장균이 200개체수가 유지되도록 배양된 대장균을 물속에 희석하여 사용하였다. 한편 시험수는 수(水) 펌프에 의해 순환되도록 설계되었다.

실제 실험 결과를 분석하기 위해서 초기 대장균의 개체수를 확인하였으며, 초기 대장균의 개체수가 고전압 전원, 수유량, 구형 유전체의 종류에 대한 각각의 실험 조건에서 어느 정도 대장균의 개체수가 늘거나 줄어들었는지를 확인하였다. 여러 수중 세균 개체 측정 방법 중 본 실험과 같이 많은 결과 데이터의 상호 비교 처리를 필요로 하는 실험에 있어서는 시간적, 경제적인 측면을 고려해야 하므로, 국내외적으로 상용배지로 많이 사용되고 있는 3M Petrifilm(E.coli Count Plates, 3M Co. USA) 제품을 사용하였다.

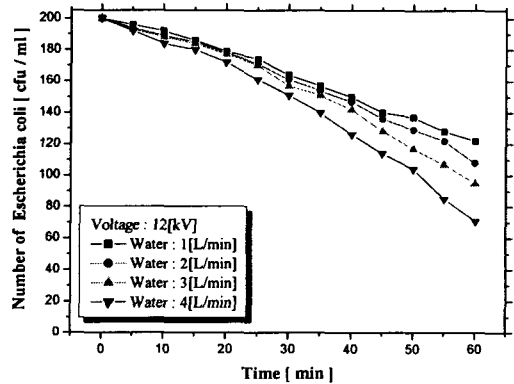
본 실험에서는 구형 유전체의 종류(SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>), 인가전압(6~12[kV]), 수유량(1~4[l/min]), 그리고 처리시간(5분단위로 60분간) 등의 다양한 변수에 대해 수중 대장균의 제거 특성 실험을 하였다. 그리고 본 실험 결과 그래프들은 각 실험 조건을 3회 이상 반복 실시하여 나온 결과 데이터의 상호 비교 및 분석을 통하여 작성 된 것이다.

## 2.3. 실험결과 및 고찰

그림 3 (a), (b) 는 방전관 내부에 시험수만 존재하는 경우로 인가 전압이 6[kV], 12[kV]일 때, 수유량 변화에 대한 시험수 내부의 대장균 제거 특성 결과를 나타낸 그래프이다. 실험 결과를 살펴 보면, 수 유량이 증가되면 시험수의 단위 시간당 방전관 내부 순환 횟수가 각각 수유량에 비례하여 증가하게 되므로 방전관 내부에 형성되는 고전계 영역에 시험수 내부의 대장균이 접촉할 기회가 증가하게 되어, 그 결과 수중 대장균의 제거량이 더욱 증가됨을 알 수 있다.



(a) 방전관 인가 전압 6(kV)



(b) 방전관 인가 전압 12(kV)

그림 3 인가 전압과 수유량에 대한 대장균 제거 특성  
Fig. 3 The removal characteristics of Escherichia coli vs input voltage and water flow ratio

한편 그림 3 (b)의 인가 전압이 12[kV]일 때를 살펴보면 반응기 내부에 시험수만 인가함에 있어서, 인가 전압이 6[kV]에서 12[kV]로 증가할 경우에는 시험수 중의 대장균이 크게 제거 되지 않음

을 알 수 있다. 또한 수유량이 4[l/min]일 때 대장균의 감소가 가장 크나 수펌프의 가동시 필요한 소비전력과 수중 대장균의 제거율을 상호 고려할 경우, 실험에서 방전관의 수유량은 3[l/min] 정도로 유지하는 것이 전체적인 시스템 운영 측면에서 적절한 것으로 사료된다.

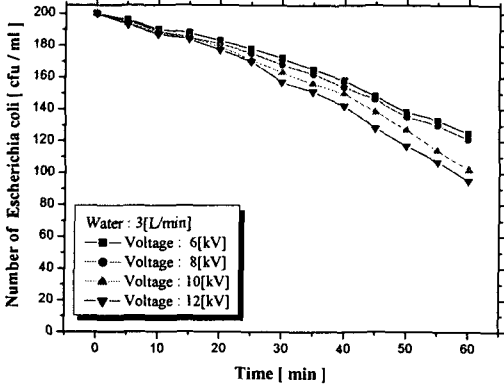
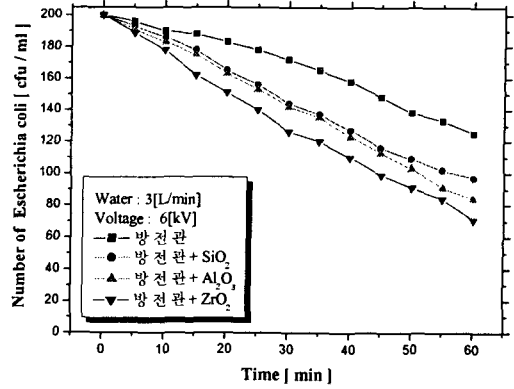


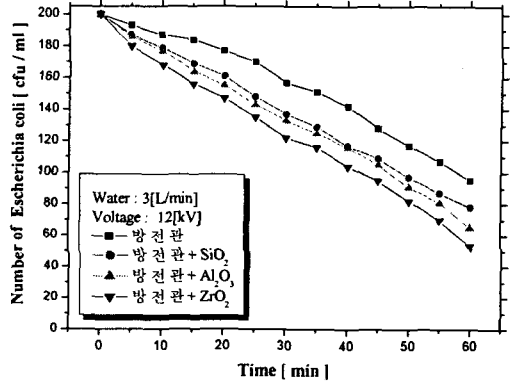
그림 4 인가 전압에 대한 대장균 제거 특성  
Fig. 4 The removal characteristics of Escherichia coli vs input voltage

그림 4는 방전관 내부에 시험수만 존재하는 경우로 수유량이 3[l/min]일때, 전압을 각각 6, 8, 10, 12[kV]로 인가한 후 시험관 내부의 대장균 제거 특성 결과를 나타낸 그래프이다. 인가 전압이 일정하게 증가하면 시험수 내부의 대장균 제거량도 증가하는 경우를 보인다. 이는 대장균 같이 수 [μm] 전후의 크기를 가진 세균에 수[V/μm]의 전계가 인가되므로 세균의 세포막이 파괴되거나 쇼크에 의해 대부분 사멸하기 때문이다. 10[kV]에서 대장균 수가 급격히 사멸하는 것을 알 수 있으며 이는 인가 전압이 상승할수록 더 많은 대장균을 사멸시킬 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 인가 전압의 상승은 전원장치의 절연내력과 변압기 자체의 출력 용량이 증가해야 한다는 문제점과 방전관 자체의 절연내력을 충분히 고려해야 하므로 낮은 전압으로 고효율의 수중 대장균의 제거 결과를 얻을 수 있는 시험 조건을 찾는 것이 필요하다. 그러므로 고효율의 수중 대장균 제거 특성을 찾기 위해 다양한 파라메타에 대한 실험이 반드시 필요하다.

그림 5 (a), (b)는 방전관에 각각의 구형 유전체 (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>)를 충전한 후, 수유량 3[l/min]일때 전압을 각각 6, 12[kV]로 인가한 후 수중 대장균 제거 결과를 나타낸 그래프이다. 결과에



(a) 방전관 인가 전압 6(kV)



(b) 방전관 인가 전압 12(kV)

그림 5 방전관에 대한 수중 대장균 제거 특성  
Fig. 5 The removal characteristic of Escherichia coli vs discharge tube

서 보면 유전체 비드를 충전한 경우 방전관 내부에 비드를 충전하지 않은 경우보다 대장균 제거 효율이 상당히 향상된 것을 알 수 있었다. 그리고 충전된 유전체 중에서는 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>)가 가장 우수함을 알 수 있었다. 이는 표 1과 같이 ZrO<sub>2</sub>의 비유전율이 가장 우수하기 때문에 같은 전압에서 방전 전계가 높기 때문에 대장균 제거 효율이 높은 것으로 사료된다.

표 1 비유전율

Table 1 relative dielectric constant

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	물	pyrex
비유전율 ε <sub>r</sub>	4	9	12	80	4

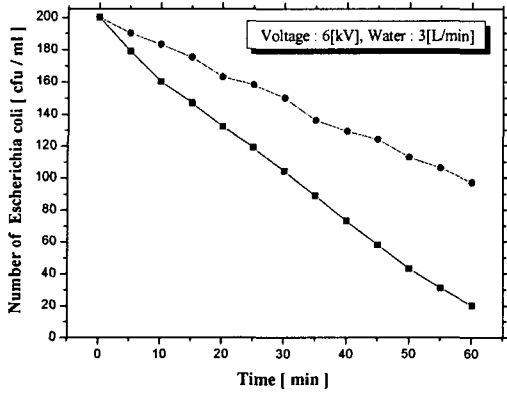


그림 6 방전 면적 및 소비 전력에 대한 수중 대장균 제거 특성

Fig. 6 The removal characteristics of Escherichia coli vs discharge area and consumption power

그림 6은  $ZrO_2$ 의 유전체가 충전된 동일한 방전관 2개를 사용하여 수중 대장균 제거 특성 결과를 나타낸 그래프이다. 실험 결과를 살펴보면, 수중 대장균 제거 결과가 방전관 1개 사용할 때 보다 약 2배의 결과를 보인다. 이는 방전 면적이 2배로 되면서 방전 소비 전력도 2배가 되어, 제거 효율이 2배로 증가하기 때문이다. 방전 면적이 일정하게 증가하면서 동시에 방전 소비전력을 비례적으로 증가할 경우, 수중대장균의 최종 처리시간이 상호 비례적인 관계로 나타나는 특성이 있다.

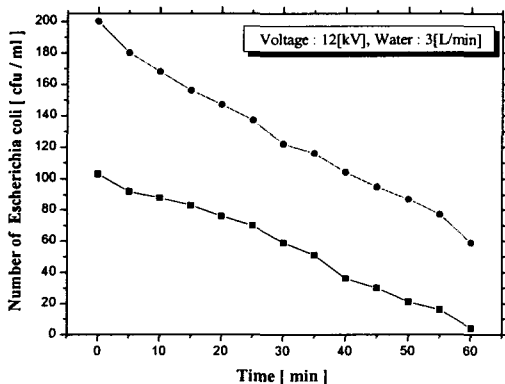


그림 7 대장균 개체수에 대한 수중 대장균 제거 특성

Fig. 7 The removal characteristics of Escherichia coli vs population of Escherichia coli

그림 7은  $ZrO_2$ 의 유전체가 충전된 동일한 방전관에 수중 대장균 개체수를 2배의 차이를 두고 실험한 결과 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 수중 대장균 수가 줄어드는 효율 즉 기울기는 동일한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이는 수조속의 시험수량이 동일 할 경우 방전관이 같으면 세균량에 관계없이 효율이 동일한 것으로 사료된다.

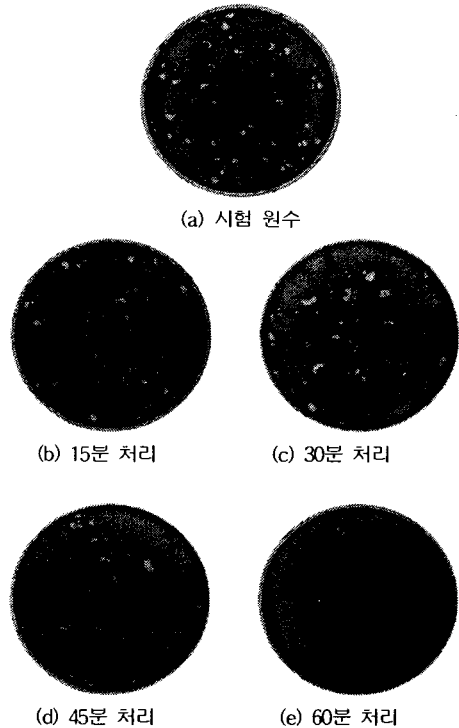


그림 8 3M petrifilm을 이용한 시험수 내의 대장균 개체수 확인

Fig. 8 Population of Escherichia coli inner test water using 3M petrifilm

그림 8은 앞의 그림 7 그래프에 나타나듯이 직경 4[mm]의  $ZrO_2$  비드가 채워진 방전관에 수유량 3[l/min], 전압 12[kV]를 인가할 때, 시험 수의 처리 시간에 대한 대장균의 제거 결과를 3M petrifilm으로 확인한 것이다. 수조의 시험 원수 2[l]속에 1[ml]당 대장균수가 약 100마리 정도의 개체수가 존재하도록 액체 배양기 내의 대장균을 물을 적절히 희석하여 제조하여 사용하였다. 전압이 인가되고 나서 일정한 비율로 대장균이 제거되는 특징을 나타내었다.

### 3. 결 론

### 참 고 문 헌

유전체 비드를 충전하지 않은 방전관과 충전한 방전관의 수중 대장균 제거 특성을 살펴보면 비드를 충전한 방전관이 제거 효율이 높은 결과를 나타냈으며, 구형 유전체 비드( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ )를 충전한 경우에는 비유전율이 높은  $\text{ZrO}_2$  비드를 충전한 방전관에서 높은 수중 대장균 제거 특성이 나타났다.

비드가 충전된 방전관에서 인가전압이 상승하면 방전관 내부에 전계 및 방전 전력이 증가하여 수중 대장균의 제거가 더 용이하였다. 수유량을 증가시키면 방전관에 순환되는 횟수가 증가하면서 단위 시간당 방전관 내부의 고전계 영역 부근에 수중 대장균이 영향을 받을 기회가 늘어나기 때문에 수중 대장균의 제거량이 향상되는 특성을 나타내었다.

수중 방전에서 유해 세균의 효과적인 제거를 위해서는 물의 저항 성분이 크기 때문에 방전 거리가 늘어나게 되면 인가전력은 물을 이온화시키기 보다는 상대적으로 물을 가열하는데 전력을 소비하게 된다. 그러므로 방전관 설계시 각각의 세균특성과 세균량을 고려하고, 가능한 방전 거리를 짧게 하는 것이 고전계를 가지는 수방전관의 수중 세균의 제거에 용이할 것으로 사료된다.

- [1] 조순행, "물 환경 개론", 東和技術, pp.15~195, 2001.
- [2] 김진규, "유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해 수 발생 특성", 조명전기설비학회논문지, Vol. 16, No. 4, pp.46~54, July 2002.
- [3] Y. V. Skvortsov, V. S. Komel'Kov, and N. M. Kuznetsov, "Expansion of a spark channel in a liquid," Sov. Phys. Tech. Phys., Vol. 5, pp.1100, 1961.
- [4] Yoshihiro Konishi, "A Novel Silent Discharge Type Ozonizer using Pulse Density Modulated High Frequency Inverter", IEEE pp. 764~772, 1999.
- [5] V. V. Vorob'ev, V. A. Kapitonov, E. p. Kruglyakov, and Y. A. Tsidulko, "Breakdown of water in a system with "diffusion" electrodes," Sov. Phys.-Tech. Phys., Vol. 25, pp.598, 1980.
- [6] Moon Been Chang, "Experimental Study on Ozone Synthesis via Dielectric Barrier Discharges", Ozone Science and Engineering, Vol.19, pp.241~254, 1997.
- [7] H.H.Lee et al., "Development of Ozone Generation System with High Concentration for Water Treatment", '99 J-K Joint Symposium on ED & HVE, pp.228-231, 1999
- [8] Kook-Hee Cho, "Development of the Ozone System with Multiple Discharge Gap for Clean Environment", 2000 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp. 104.1-104.4, 5-6 October, 2000.
- [9] Kook-Hee Cho, "Improvement of Ozone Concentration and Efficiency by a Superposition - Silent in Discharge Ozonizer", ICEE 2K, The International Conference on Electrical Engineering 2000, pp. 228-231, July, 2000.
- [10] 조국희, 김영배, "오존방전관 특성에 관한 연구", 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술대회 논문집, O-2, pp. 8-10, 2001. 4. 27