

유전체를 이용한 수처리장치의 전계시뮬레이션 및 수처리 특성

황인아*, 이현수**, 한병성***
 한국원자력연구소*, 마산대학**, 전북대학교***

Electric Field Simulation and Characteristics of Water Treatment Apparatus using Dielectrics

In-Ah Hwang*, Hyun-Soo Lee** and Byung-Sung Han***
 KAERI*, MaSan College**, CheonBuk Univ.***

Abstract : The simulation of electric field distribution of discharge tube with globular ZrO_2 and the removal characteristic of *Escherichia coli* by the discharge tube with globular ZrO_2 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 particle size of ZrO_2 beads increased, the removal time of *Escherichia coli* was shortened due to the dielectric polarization of ZrO_2 beads.

Key Words : Electric Field, Discharge Tube, *Escherichia coli*, Dielectric Polarization

1. 서론

지하수를 수원으로 이용하는 생활용수 특히, 식수의 경우에는 지금까지 거의 모두 염소소독으로 처리하고 있다. 염소소독은 염소가 일시에 수중으로 용해되어 시간이 지남에 따라 소독효과가 떨어지고, 냄새 등이 수반되며 바이러스, 세균, 효모, 사상균 등의 제거에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 수돗물은 대장균, 일반세균, 잔류염소에 대한 검사를 매주 실시하고 있으나, 간이상수도 등은 매 분기별로 1회 이상 실시하고 있다. 또한 수돗물에서 바이러스가 검출된 이후 염소 소독을 강화하고 있으며 이러한 경우 염소와 물 속의 유기물질이 결합하여 발암 물질인 트리할로메탄(THM)의 생성 가능성이 높아질 것이라는 지적이 있는 바와 같이 염소를 과다하게 투입하여 소독하면 트리할로메탄이 더 발생하게 된다. 이와 같이 염소소독의 단점과 당수시간 경과에 따른 효과적인 대장균의 제거를 위하여 많은 연구기관에서 연구가 진행 중에 있다. 본 연구는 이러한 수질 환경 오염원의 개선을 위한 한 방법으로서 수질기준의 하나인 수중 대장균을 적정 대장균 개체수 이하로 처리하기 위하여 구형 지르코니아(ZrO_2)를 갖는 단층 절연 수방전관에 고전압을 인가한 후 물속의 대장균에 대한 제거 특성을 조사한 것으로서, 구형 지르코니아를 갖는 절연 수방전관에 고전압을 인가하면 방전관 내의 구형 지르코니아들의 상호 접촉부에서 유전분극에 의한 고전계가 형성되므로 수(水)방전에 의하여 물이 오존 성분과 알칼리 및 산성 등의 이온화된 물질로 수질이 변화하기 때문에 이러한 특성을 이용하여 수중 대장균의 제거를 시도하였다.

2. 시뮬레이션

2.1 시뮬레이션 영역

그림 1은 시뮬레이션을 위한 전처리 과정에서 해석 영역

을 삼각셀로 분할한 것으로서 수방전 구간의 구조물이 서로 접하는 곳에서 해석상 수렴 정도의 정확성을 위하여 세밀하게 셀을 분해하여 시뮬레이션 하였다.

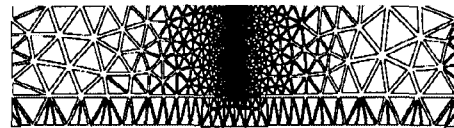


Fig. 1. Simulation of cell distribution.

2.2 전위 시뮬레이션

그림 2는 전계 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. 그림 2에서 상부와 하부 전극 간격은 12mm로 되어 있고, 구형 유전체가 존재하는 내부 공간의 상부와 하부 간격은 10mm이며, 시뮬레이션에서 적용된 유전체구의 지름은 ϕ 5mm이다. 그리고 이 구형 유전체의 비유전율은 5로 설정하고 그 때의 수중 전위분포의 특성을 알기 위하여 그림 2의 상부면에는 0V, 하부면에는 10kV의 전압을 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 전위 시뮬레이션 해석 결과 전극 형상이 평판 전극일 경우 일반적으로 평등 전계에 의하여 전위 분포가 평행한 균등 전위 분포를 나타내지만 비유전율 5인 구형 유전체가 두께 2mm인 원통형 방전관(pyrex) 내부에 존재함으로써 균등한 평등 전계의 분포가 아닌 비대칭형 전계 분포를 나타내었다. 그 결과 방전관 내부의 구형 유전체가 서로 접하는 부분, 방전관과 구형 유전체가 만나는 부분에서 등전위 경계층이 휘어지는 현상을 시뮬레이션 결과에서 알 수 있었다. 그러므로 이러한 부분에서 고전계가 형성되기 때문에 시형수가 방전관 내부를 통과 할 때 대장균의 제거율이 향

상될 것으로 판단된다.

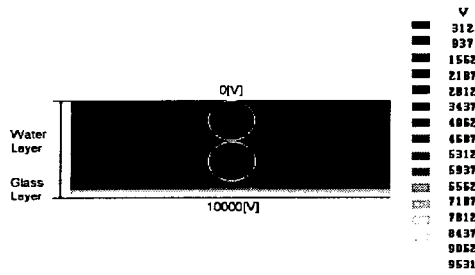


Fig. 2. Simulation of electric potential distribution.

2.3 전계 시뮬레이션

그림 3은 구형 유전체를 수방전관 내부에 취부하였을 때 전계 분포를 시뮬레이션한 결과이다. 해석 결과 방전관 내부의 구형 유전체가 맞닿는 부분에서 강한 유전 분극 현상이 발생하는데, 이로 인하여 방전관에 인가된 전압이 10kV일 때, 최대 전계가 약 36kV/m을 나타내었고, 구형 유전체가 서로 맞닿는 부분에서는 약 10kV/m의 전계를 나타내었으며, 방전관과 구형 유전체가 맞닿는 부분에서는 약 23kV/m 정도의 전계가 집중하는 것으로 나타났다. 따라서 시험수를 방전관에 통과시킬 때, 유전체에 의하여 고전계가 형성되므로 대장균이 보다 많이 제거될 것으로 사료된다.

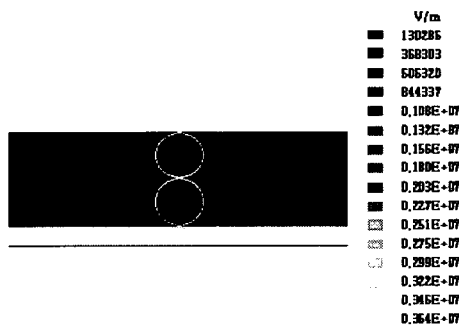


Fig. 3. Simulation of electric field distribution.

3. 실험장치 및 방법

실험 장치는 전극이 부착된 수방전관, 수류량을 표시하는 수량계, 시험수를 모아두는 수조, 고압 전원부, 수펌프와 시료 채취부 등으로 구성되어 있고, 방전관의 구조는 그림 4와 같이 유리로 제작된 원통형 방전관(pyrex, 내경: \varnothing 24mm, 길이:250mm)으로서 방전관 내부에는 구형의 지르코니아(직경: \varnothing 5mm, ZrO_2 , ϵ_r :5)가 넣어져 있으며, 이 방전관의 외부와 중심부에 원통형과 선 전극이 설치되어 있다. 그리고 대장균의 제거 특성을 조사하기 위하여 대장균 증식을 위한 배양지로 사용되고 있는 3M Petrifilm(Coliform Count Plate, 3M Co., USA)제품을 사용하였고, 방전관은 수류의 흐름과 균일한 수중 전계 분

포를 고려하여 동축 실린더형을 사용하였다. 수(水)중의 선전극은 수중 방전시 전극 재료의 수소 이온화 경향을 고려하여 백금선을 사용하였고, 사용한 전원의 최대 정격 전력은 150W, 출력 주파수는 20kHz, 최대 출력 전압이 20kV인 고전압 전원을 사용하였다.

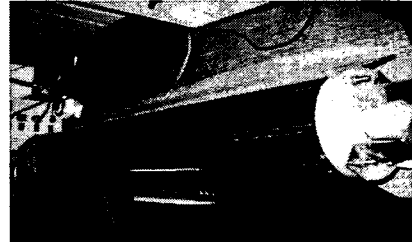


Fig. 4. Discharge Tube.

4. 결과 및 검토

그림 5는 전압 6~12kV, 유량 1, 2, 3//min, 전극 간격 12mm, 구형 유전체인 지르코니아의 직경이 5mm인 경우 전압과 유량에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 동일 유량에 대한 전압 변화의 경우 전압이 높을수록 제거 특성이 좋게 나타났다. 이는 전압이 상승하면 수중 전계가 동시에 상승하기 때문에 제거율이 높아진 것으로 사료된다. 또한 동일 전압에 대한 유량 변화의 경우 시험수가 펌프에 의해 순환되기 때문에 펌프의 회전 속도가 높으면 유량이 증가하여 단위 시간당 방전관 통과 횟수가 증가하므로, 수중 대장균이 고전계와 접촉할 확률이 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 증가하는 것으로 사료된다.

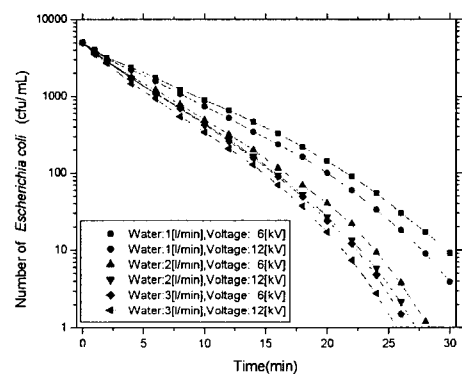


Fig. 5. Removal characteristics of *Escherichia coli* to voltage and flow ratio.

그림 6은 전압 12kV, 유량 1~5//min, 전극 간격 12mm, 지르코니아의 직경이 5mm인 경우 시간 경과에 대한 수중 대장균의 제거 특성을 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 수중 대장균이 제거되기까지의 시간은 짧아지는 경향을 보였으나 유량을 지속적으로 증가시켜도 유량에 따른 대장균의 제거 특성은 비례적이지 않았다.

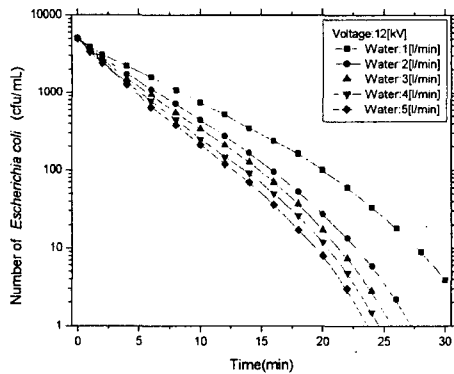


Fig. 6. Removal characteristics of *Escherichia coli* to flow ratio.

그림 7은 전압 12kV, 유량 3l/min, 전극 간격 12mm, 지르코니아의 직경이 2mm, 3.5mm, 5mm인 경우 시간경과에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 구형 유전체의 크기가 클수록 수중의 대장균 제거 특성이 좋은 것으로 나타났다. 그리고 전압이 높아질수록 전계가 상승하여 시험수 내의 대장균의 제거율이 높아지나 방전관의 전극 사이 거리가 제한적이므로 방전관의 내부 직경과 방전관의 절연 내력을 고려하여 인가전원의 전압은 12kV로 제한하였다. 또한, 동일 실험 조건에서 대장균이 완전히 제거될 때까지의 시간을 살펴보면 지르코니아의 직경이 5mm일 때, 수중 대장균의 제거 시간이 직경 2mm일 때 보다 약 4분 정도 단축되는 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 지르코니아의 직경이 증가하면 지르코니아의 상호 접촉부에서의 전계의 세기가 직경이 작은 경우보다 높게 나타나기 때문이다.

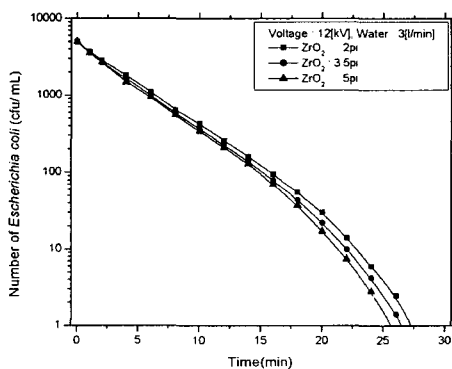


Fig. 7. Removal characteristics of *Escherichia coli* to globular dielectric.

그림 8은 전압 12kV, 유량 3l/min, 전극 간격 12mm의 조건에서 직경 5mm인 지르코니아의 사용 유무에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 대장균이 완전히 제거되기까지의 시간을 살펴보면 유전체를 사용한 경우 약 25분 정도 소요되었으나 유전체를 사용하지 않은 경우 약 80분 정도

의 시간이 소요되었다. 구형의 지르코니아와 같은 유전체를 사용할 경우에는 구형 유전체의 물성 및 형상적 특성에 의해 강한 유전 분극이 나타나므로 유전체를 사용하지 않은 경우보다 수중 대장균의 제거 특성이 더 우수하게 나타난 것으로 사료된다.

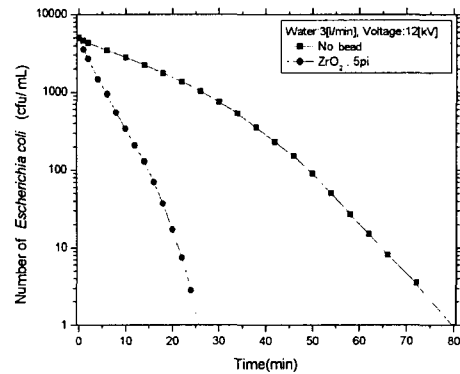


Fig. 8. Removal characteristics of *Escherichia coli* to existence of globular dielectric.

5. 결론

시뮬레이션 결과 방전관 내부의 구형 유전체가 서로 접하는 부분, 방전관과 구형 유전체가 만나는 부분에서 등전위 경계층이 휘어지는 현상을 알 수 있었다. 수중 대장균의 제거 특성 실험 결과에서 전압의 영향은 전압이 높을수록 전계가 비례적으로 증가하기 때문에 수중 대장균의 제거 특성이 우수하게 나타났다. 또한, 유량의 영향을 살펴보면 시험수가 순환 방식으로 방전관을 통과하기 때문에 단위 시간당 방전관 통과 횟수가 증가하면 유량이 증가하게 되므로 수중 대장균이 수중의 고전계 영역 즉, 지르코니아가 서로 맞닿는 부근의 전계 집중에 의하여 고전계의 영향을 받는 기회가 많아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 향상되었다. 구형 지르코니아 직경이 2mm, 3.5mm, 5mm인 경우 반응 시간에 대한 수중 대장균 제거 특성을 측정된 결과, 지르코니아의 직경이 큰 경우 전계 세기는 직경이 작은 경우보다 수중에서 전계 세기가 높게 나타나기 때문에 수중 대장균의 제거율이 상승함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Chiu, Y.C., Chang, C.N., Lin, J.G., and Huang, S.J., "Alkaline and Ultrasound Pretreatment of Sludge before Anaerobic Digestion," *Water Sci. Technol.*, 36, pp.155, 1997
- [2] Mizuno, A., "Industrial Application of Non-thermal Discharge Plasma in Environmental Technologies," 12th Int. symp. High Voltage Eng., pp.48, 2001