

자외선·오존 살균소독장치의 유체시뮬레이션 및 대장균 제거 특성

황인아*, 이현수**
한국원자력연구소*, 마산대학**

The Hydraulic simulation and removal characteristics of Escherichia Coli for Ultraviolet rays · Ozone sterilization apparatus

Hwang In-Ah*, Lee Hyun-Soo**
Korea Atomic Energy Research Institute*, Masan College**

Abstract - The simulation of Hydraulic pressure distribution of discharge tube with globular beads and the removal characteristic of *Escherichia coli* by the discharge tube with globular beads 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.

1. 서 론

물은 공기와 함께 생명을 유지하는데 있어 반드시 필요한 물질이다. 그러나 인간의 경제 활동으로 인하여 발생된 대기 오염 물질과 각종 폐기물 중에서 인체에 유해한 성분들이 수중으로 흘러 들어가면서 화학적 반응과 생물학적 작용에 의하여 지표수와 지하수는 지속적으로 오염의 정도가 심해지고 있으며, 자연발생적인 오염원의 양보다 훨씬 많은 인위적 오염원이 강과 하천 등으로 흘러 들어감으로써 인간 생활의 주변 환경은 매년 더 악화되고 있다. 그 결과 식수원의 수질 등급 하향과 수중 유해 세균에 의한 질병 발생 등은 정부, 환경보호 단체 및 각 언론 매체를 통하여 발표, 보도되고 있다. 지금까지의 여러 상황으로 살펴보면, 수질 오염 사고의 경우 한 번 발생하게 되면 수많은 사람들이 오염원에 노출되어 폭 넓은 지역에서 많은 주민에게 고통과 질병을 발생시키는 특징을 갖고 있다. 그러므로 수질오염에 의한 사고의 경우 그 파급 효과는 대단히 광범위하며 심각하다. 따라서 먹는 물의 수질 기준은 모든 환경 기준 중에서 가장 엄격하게 설정되어 있으며, 향후 수질 환경 기준법은 환경오염의 심화로 인하여 더욱 강화될 것으로 사료된다. 이렇게 수질 환경 기준이 강화되는 현 시점에서 환경오염의 저감을 위하여 많은 연구 기관에서 노력을 하고 있고, 관련 기술의 발전도 급속히 진행되고 있다. 본 연구는 이러한 수질 기준법의 강화에 맞추어 수질 오염원의 개선 방법으로써 구형의 유전체(SiO₂)를 갖는 수중 방전관 내의 유체시뮬레이션과 구형 유전체에 의한 유전 분극에 의해 물이 오존수, 알칼리수 및 산성수 등 이온화 물질로 변화하는 특성을 이용하여 수중 유해 세균 중에서 수질 오염 측정의 우선 항목인 대장균(*Escherichia coli*)의 제거 특성에 대하여 연구하였다.

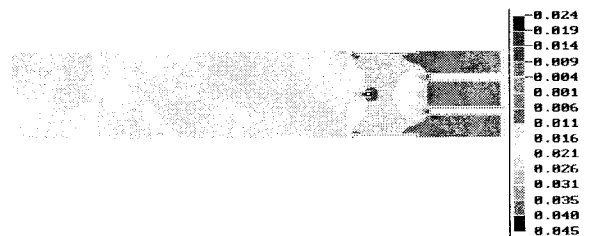
2. 유체분포 시뮬레이션

전압인가에 따른 반응기 내의 유체압력분포 변화를 알아보기 위하여 유체압력분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 반응기내의 일정한 압력은 플라즈마 방전 상태를 안정하게 유지시키기 때문에 중요하다. 그림 1 (a), (b), (c)는 유체유출입 장치 내에서 전원과 전력에 따른 1500 l/min의 유체압력분포 변화를 나타낸 것이다.

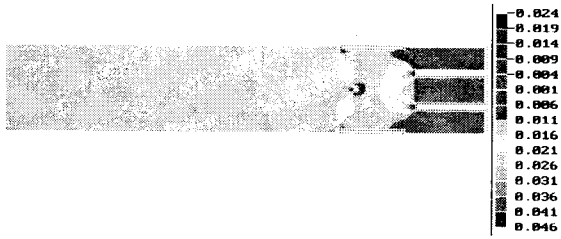
그림 1의 좌측은 유체의 유입부이고, 중앙의 원형 흰색은 선전극, 선전극 상·하측면의 흰색 직사각형은 평판전극이다. 우측의 청록색 사각형은 촉매 설치부를 의미하고, 촉매설치로 인하여 유체유출입 장치 내의 플라즈마 반응기에서 20 %정도 공기의 흐름을 막을 것으로 가정하고 이것을 흰색블록으로 설정하였다.

최대 유량 1500 l/min, 출구 압력이 0 Pa일 때 전력에 따른 유체유출입 장치의 유입부에서 압력의 변화는 거의 없었고, 평판 전극의 양쪽 끝단 부분에서 압력이 약간 낮아졌다. 전극사이의 주 방전 영역에서 압력은 유체유입부의 초기 압력 0.026 Pa보다 낮은 0.016 Pa이었으나 전력이 인가되어도 유체의 압력분포에는 변화가 없으므로 방전 영역의 방전상태에는 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다.

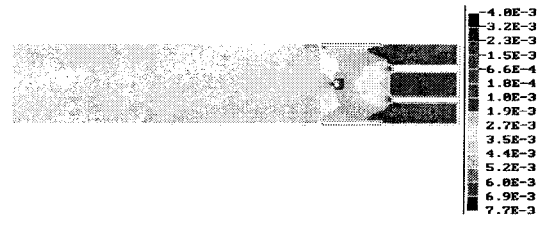
따라서, 방전 영역의 신뢰도 측면에서 방전 영역 내의 압력분포를 일정하게 하는 것이 좋으므로 평판 전극을 가스 유입부쪽으로 2 mm정도 이동시키거나 선전극을 가스 출구쪽으로 2 mm정도 이동시키면 더욱 일정한 압력분포로 인하여 안정된 방전이 유지될 것으로 사료되었다.



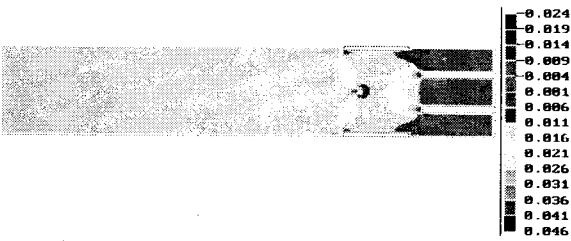
(a)



(b)



(c) unit : Pa

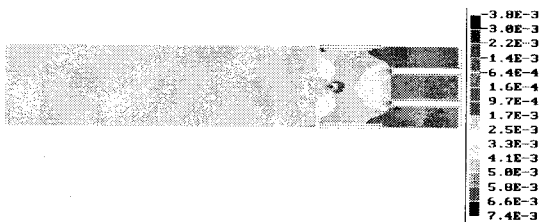


(c) unit : Pa

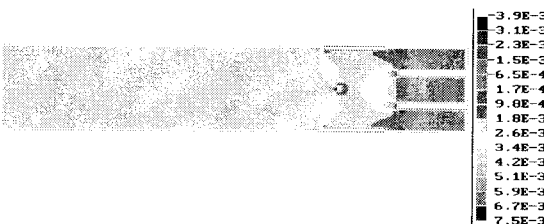
Fig. 1. Pressure distribution on power and flow amount 1500 l/min
 (a) 0 W (b) AC power 10 W (c) DC power 10 W

그림 2는 유량이 700 l/min일 때 전력에 대한 유체압력 분포를 나타낸 것이다. 유량이 1500 l/min에서 700 l/min으로 약 60 % 감량하였을 경우에도 전극 사이의 주 방전 영역에서 압력은 유체 유입부의 초기 압력 0.0041 Pa보다 낮은 0.0025 Pa이었다. 그러나 방전 영역에서 유체 압력 분포 변화는 인가전력에 따라 변화가 없으므로 방전 상태에는 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다.

따라서 방전의 신뢰도 측면에서 방전 영역 내의 압력 분포를 일정하게 하는 것이 좋다. 그러므로 평판 전극을 유체 유입부쪽으로 2 mm 정도 이동시키거나 선전극을 유체 출구쪽으로 2 mm 정도 이동하면 더욱 안정된 압력 분포를 나타낼 것으로 판단되었다.



(a)



(b)

Fig. 2. Pressure distribution on power and flow amount 700 l/min
 (a) 0 W (b) AC power 5 W (c) DC power 10 W

3. 실험

그림 3의 실험 장치는 전극이 부착된 수방전관, 수유량을 표시하는 수량계, 시험수를 모아두는 수조, 고압 전원부, 수(水)펌프와 시료 채취부 등으로 구성되어 있고, 그림 4는 실험에 사용된 방전관이 설치되어 있는 외형으로서 방전관의 구조는 파이렉스유리로 제작된 원통형 방전관(내경: 24mm, 길이: 500mm)으로서 방전관 내부에는 구형 유전체(직경: 5.0mm, SiO₂, ε: 5)가 넣어져 있으며, 이 방전관의 외부와 중심부에 전극이 설치되어져 있다.

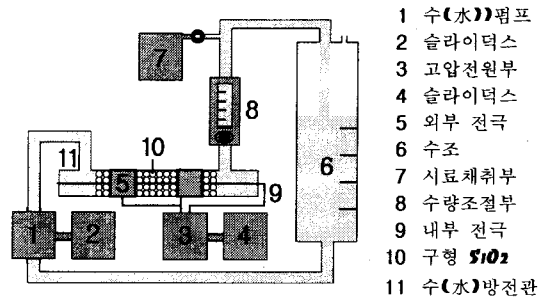


Fig. 3. Experimental schematic

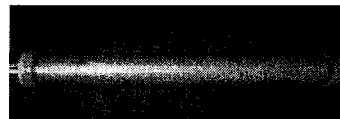


Fig. 4. Outward appearance of discharge tube

그리고 두 전극 사이에 20μ, 6-12μ의 교류 전압이 인가되는 동안 방전관을 통과한 시험수 2l에 존재하는 대장균의 제거 특성을 조사하였으며, 시험수는 수(水)펌프에 의해 순환되도록 제작하였다. 시험수는 일반 지하수에 초기 대장균수를 1μ당 약 5,000개의 개체가 존재하도록 물과 세균의 농도비를 조절하여 제조하였고, 이를 이용하여 실험하였다. 그리고 대장균의 제거 특성을 알기 위하여 시험용 대장균 배양지인 3M Petrifilm(Coliform Count Plate, 3M Co., USA)을 사용하였다. 그리고 방전관은 물의 흐름과 균일한 수중 전계 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 150W, 주파수 20kHz, 최대 출력 전압 20kV의 전원을 사용하

었다. 이외의 다양한 파라미터로는 처리 시간에 대한 인가전압, 수(水)유량 그리고 구형 유전체의 크기 등을 파라미터로 하여 실험하였으며 모든 실험은 10회씩 반복하여 실행하였다.

4. 실험결과

4.1 수(水)방전관의 유량과 전압에 대한 대장균 제거 특성

그림 5는 전압 6~12kV, 유량 1, 2, 3l/min, 전극 간격 12mm, 구형 유전체의 직경이 5.0mm일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 전압이 높을수록, 물의 유량이 많을수록 제거율이 좋은 것으로 나타났다. 이는 전압이 상승하면 수중 전계가 동시에 상승하기 때문에 제거율이 높아진 것이고, 유량에 대해서는 펌프의 회전수가 높을수록 시험수가 빨리 순환되어 단위 시간당 방전관 통과 횟수가 증가되어 유량이 증가하기 때문이다. 따라서 수중 대장균이 고전계 영역과 접촉할 확률이 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 좋아지는 것으로 사료된다. 그러나 시험수의 유량 2l/min, 전압 12kV인 경우가 유량 3l/min, 전압 6kV인 경우보다 제거특성이 좋게 나온 것은 어느 일정 이상의 유량이 되면 상대적으로 유량보다는 전압의 영향을 더 받기 때문으로 사료된다.

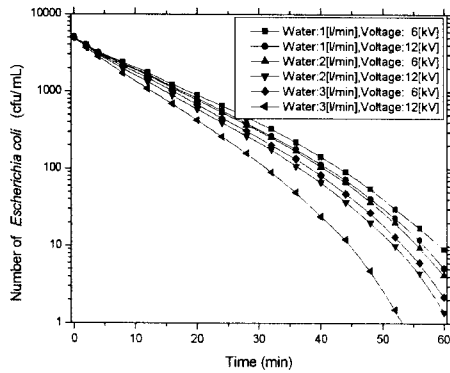


Fig. 5. Removal characteristics of *Escherichia coli* to voltage and flow ratio

그림 6은 전압 12kV, 유량 1~5l/min, 전극 간격 12mm, 구형 유전체의 직경이 5.0mm일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 수중 대장균의 제거율은 점차적으로 상승하는 경향을 보였으나 유량을 지속적으로 증가시켜도 일정하게 비례적인 대장균의 제거 특성은 나타나지 않았고, 유량이 증가함에 따라 대장균의 제거율이 줄어드는 경향을 나타내었다.

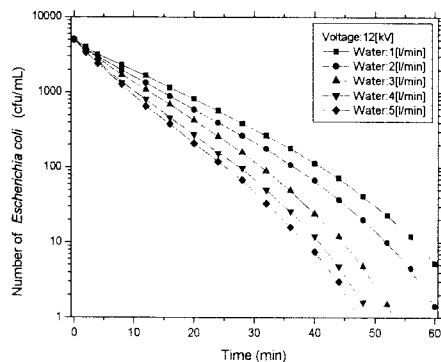


Fig. 6. Removal characteristics of *Escherichia coli* to flow ratio

4.2 수(水)방전관의 구형 SiO₂에 대한 대장균 제거 특성

그림 7은 전압 12kV, 유량 3l/min, 전극 간격 12mm, 구형 유전체의 직경이 2.0mm, 3.5mm, 5.0mm일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 구형 유전체의 크기가 클수록 수중의 대장균 제거 특성이 좋은 것으로 나타났다. 그러나 방전관의 전극 사이 거리가 제한적이므로 방전관의 내부 직경과 인가 전원의 전압을 고려해야 할 필요가 있다. 본 실험 조건에서 대장균이 완전히 제거될 때까지의 처리 시간을 살펴보면, 구형 유전체의 직경이 5.0mm인 경우가 직경이 2mm일 때 보다 약 10분 정도 대장균의 제거 시간이 단축되는 결과를 알 수 있었다. 이것은 유전체의 직경이 클수록 전계세기는 직경이 작은 경우 보다 전계세기가 높게 나타나기 때문이다.

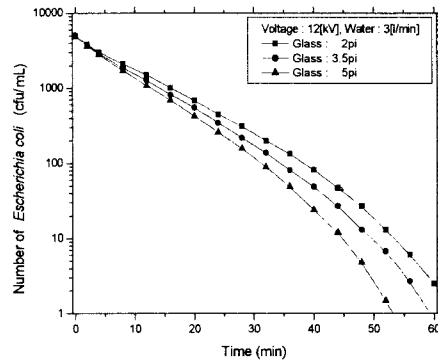


Fig. 7. Removal characteristics of *Escherichia coli* to globular dielectric

그림 8은 전압 12kV, 유량 3l/min, 전극 간격 12mm의 조건에서 직경 5.0mm인 구형 유전체의 사용 유무에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 세균이 완전히 제거되는 시간을 비교하면 직경 5.0mm의 구형 유전체를 사용한 경우는 약 53분 정도 소요되었으나, 구형 유전체를 사용하지 않은 경우는 약 80분 정도의 시간이 소요되었다. 이것은 유전체를 사용 할 경우 유전체의 형상과 물성에 따라 강한 유전분극이 발생하기 때문에 대장균의 제거특성이 좋은 것으로 나타났다.

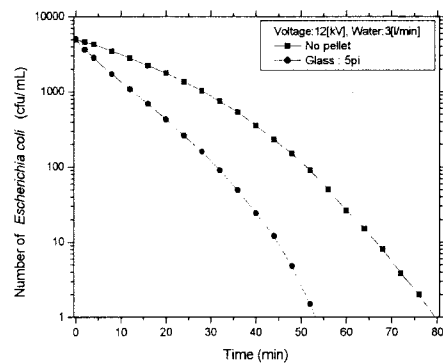


Fig. 8. Removal characteristics of *Escherichia coli* to existence of globular dielectric

5. 결 론

유체시물레이션 결과 구형 유전체가 서로 접하는 부분, 방전관과 구형 유전체가 서로 맞닿는 부분에서 고전계가 형성되므로 시험수를 방전관에 통과시켰을 때 시험수 내의 대장균이 보다 많이 제거될 것으로 판단되었다. 실험 결과 구형 유전체(glass)를 갖는 수방전관을 이용한 수중 대장균의 제거 특성에 있어 전압의 영향은 전압이 높을수록 전계가 비례적으로 증가하여 수중 대장균의 제거 특성이 우수하게 나타났다. 그리고 유량의 영향은 시험수를 순환시킴으로써 단위 시간당 시험수의 방전관 통과 횟수를 증가시키면 유량이 증가하므로 수중 대장균이 고전계 영역 즉, 전위와 전계시물레이션 결과와 같이 시험수는 구형 유전체 상호간의 접합부 부근의 전계 집중 현상에 의해 고전계와 접촉할 기회가 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 높아졌다. 또한, 구형 유전체의 직경이 2.0mm, 3.5mm, 5.0mm인 경우 반응 시간에 대한 수중 대장균 제거 특성을 측정 한 결과 유전체의 직경이 큰 경우 직경이 작은 유전체의 경우 보다 전계 강도가 높게 나타나기 때문에 수중 대장균의 제거시간이 단축됨을 알 수 있었다. 그리고 방전관내에 유전체를 사용하는 경우가 유전체를 사용하지 않는 경우 보다 대장균 제거에 소요되는 시간이 단축됨을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mizuno, A., "Industrial Application of Non-thermal Discharge Plasma in Environmental Technologies," 12th Int. symp. High Voltage Eng., pp.48-55(2001)
- [2] Haug, R.T., "Sludge Processing to optimize digestibility and energy production," JWPCF., 49, pp.1713-1721(1983)
- [3] Ogata, A., Shintani, N., Mizuno, K., Kushima, S., and Yamamoto, T., "Decomposition of Ozone Using a Nonthermal Plasma Reactor Packed with Ferroelectric Pellets," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 35(4) pp.753-759(1999)
- [4] Chiu, Y.C., Chang., C.N., Lin, J.G., and Huang, S. J., "Alkaline and Ultrasonic Pretreatment of Sludge before Anaerobic Digestion," *Water Sci, Technol.*, 36, pp.155-162(1997)