

PE2) SiO₂ 비드를 가지는 방전관의 전계 및 대장균 제거 특성

이동훈

환경관리공단 유역관리처

1. 서 론

물(水)은 공기와 함께 생명을 유지하는데 있어 반드시 필요한 물질이다. 그러나 인간의 경제 활동으로 인해 발생된 대기 오염 물질과 각종 폐기물 중에서 인체에 유해한 성분들이 수중으로 흘러 들어가면서 화학적 반응과 생물학적인 작용에 의해 지표수와 지하수는 지속적으로 오염의 정도가 심해지고 있으며, 자연발생적인 오염원의 양보다 훨씬 많은 인위적 오염원의 강과 하천 등으로 흘러 들어감으로 인하여 인간 생활의 주변 환경은 매년 더 악화되고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 최근의 수질환경기준법은 2008년, 2013년을 기준으로 더욱 강화되는 추세이다. 이렇게 수질기준이 강화되는 현 시점에 환경오염 저감을 위해 많은 연구 및 기술의 발전도 급속히 진행되고 있다. 본 논문은 이러한 수질 기준법의 강화에 맞추어 수질 오염원의 개선 방법으로서 구형 유전체(SiO₂)와 인젝터를 갖는 수중 방전관의 내부 구형 유전체의 유전 분극에 의해 발생하는 전계 분포 특성과 수(水)방전에 의해 수중 유해 세균들 중에서 수질 오염 측정 대상 항목인 대장균(*Escherichia coli*)의 제거 특성에 대하여 조사하였다.

2. 시뮬레이션

2.1. 구형 유전체의 유전 분극 특성

구형 유전체구의 분극 현상은 다음과 같은 특징이 있다.

첫째로, 전계(E)는 전극 사이의 거리(d)로 인가전압(V)을 나눈 것으로, 이 수식의 경우는 방전 공간 영역의 내부 물질의 유전 특성은 고려하지 않는 수식이므로 본 실험과 같이 수중에 유전체구가 존재하는 경우에는 이 수식만으로 방전 영역의 전계 집중 현상을 해석한다는 것은 부적절하다고 할 수 있다. 그러므로 이 경우에 있어서는 전계(E)에 대한 전기력 선속밀도(D)와 물질의 비유전율(ϵ_r)의 상호간의 상관 관계식의 도입이 반드시 필요하게 된다. 본 실험과 같이 방전관 내외부에 존재하는 전극에 반복적이거나 펄스 형태의 고정된 전압의 인가할 경우에는 각각의 전계 세기(E)는 인가 전압에 대해 일정하게 증가하는 값이 되고, 방전 영역 내부 물질의 비유전율(ϵ_r)이 상승하거나 감소할 경우에는 상대적으로 전기력 선속밀도(D)도 증가하거나 감소하는 특징으로 나타나게 된다.

둘째로, 이상과 같은 전계의 특징으로 인해 본 실험에 상용된 유전체 비드를 충전한 방전관 내부의 방전은 인가 전압과 전극 사이의 방전 거리가 일정할 경우 유전체구의 비유전율이 상승하면, 유전체 비드와 비드가 만나는 지점의 경우는 두 개의 유전체 물질 즉, 물과 유

전체구가 존재함으로 상대적으로 물의 유전율(약 80)을 기준으로 해서 보면, 물의 유전율과 비슷해질수록 전계 집중의 정도는 일정한 비율로 줄어들게 되고, 그와 반대의 경우는 강한 전계 집중이 유전체구와 구가 만나는 지점에 발생하게 된다. 그리고 유전체 비드와 방전관이 만나는 지점의 경우는 3가지의 물질 즉, 방전관과 유전체구 그리고 물이 만나는 경우로 앞의 설명보다 복잡한 현상을 보이게 된다. 물과 방전관을 고정 파라미터로 보고 유전체구의 유전율이 변수일 경우로 가정하여 살펴보면, 방전관 비유전율(약 3.7)과 물의 비유전율(약 80)에 대해 유전체구의 비유전율이 상대적인 중간 비율인 약 17.3일 경우와 약 1730의 비유전율을 가지는 경우에 최대 전계 집중 현상을 얻을 수 있게된다. 다시 말해서 (방전관 3.7):(유전체구17.3) = (유전체구17.3):(물 80) 또는 (방전관 3.7):(물 80) = (물 80):(유전체구 1730)로 각 물질의 상대적 비유전율이 비율이 일정 비례의 관계일 때 3중점에서 전기력선속 밀도가 증가하여 최대 전계가 발생하게 된다. 앞서 기술한 다양한 방전관 내부 공간의 전계 집중의 특과 실을 따져보면, 전반적으로 넓게 보면 유전체구의 비유전율이 3에서 18정도 이내의 조건에서 본 실험의 수중 대장균의 제거에 유리할 것으로 판단되어진다. 그리고 유전체구의 크기가 증가할 경우는 전극과 유전체 비드 또는 비드 상호간에 마주보는 면적(s)은 늘어나게 되고, 전반적인 유전체간 거리(d)도 줄어드는 형태가 된다. 결과적으로 각 유전 물질의 접촉부에서의 정전용량(C)은 늘어나게 되고, 일정한 비율은 아니지만 상대적으로 전계 세기(V/m)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 함수로 나타낼 수 있게 된다. 기존의 전계 해석 프로그램들은 이러한 다양한 조건에서의 현상들 적절한 함수식으로 사용하고 있다. 다음은 이상의 설명과 관련된 수식을 나타낸 것이다.

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{식2.1}),$$

$$E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (\text{식2.2}),$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{s}{d} \quad (\text{식2.3})$$

2.2. 전위 및 전계 해석

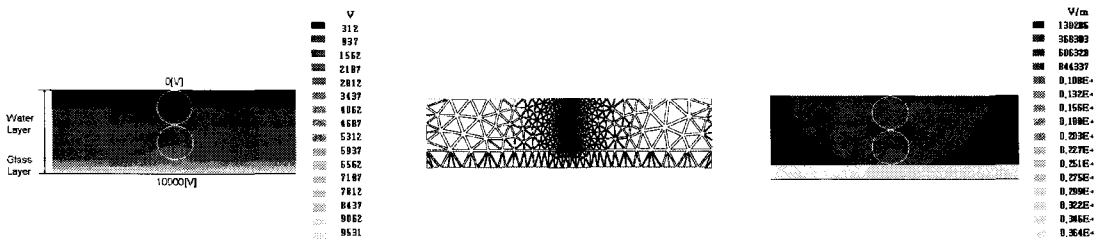


Fig. 1. 전위분포 해석결과. Fig. 2. 시뮬레이션을 위한 셀 분해. Fig. 3. 전계분포 해석결과.

그림 1은 전자계 해석 프로그램 Flux II-D를 이용하여 실제 실험에 앞서, 수(水)중에서 구(球)형 유전체극 갖는 두께 2[mm]인 방전관(pyrex) 외부에 부착된 전극과 내부 전극에 전

위차를 10,000[V]인가한 경우, 방전관 길이 방향의 단면 전위분포를 해석한 결과이다. 그림 1에서 상부면은 0[V], 하부면에는 10,000[V]의 전압을 인가하여 해석을 실시하였다. 비유전율을 3.7인 구형 유전체가 방전관(pyrex) 내부에 존재함으로써 방전관 내부 구형 유전체가 서로 접하는 부분 또는, 방전관과 구형 유전체가 만나는 부분의 전위 분포가 휘어지는 특징이 있음을 알 수 있다.

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 하는데, 이는 셀과 셀의 힘의 관계에서 셀의 해석 결과가 셀의 내부의 지점과 지점과의 에너지 유출입 관계로 해석하기 때문이다.

그림 3은 구형 유전체를 방전관 내에 취부했을 경우 전계분포 해석결과이다. 방전관 내부의 구형 유전체가 맞닿는 부분, 수중 그리고 유전체구 표면에서 강한 전계가 형성되었다. 방전관 인가전압이 10[kV]일 때, 최대 전계는 약 36[kV/m]가 되고, 구형 유전체의 표면과 수중에서의 전계는 약 8[kV/m] 정도가 발생됨을 알 수 있으며, 방전관과 구형 유전체가 맞닿는 부분에서는 약 23[kV/m]정도의 강한 전계가 집중하는 것을 해석을 통하여 알 수 있다.

3. 실험 결과

그림 4의 실험 장치는 전극이 부착된 수방전관, 수유량을 표시하는 수량계, 시험수를 모아 두는 수조, 고압 전원부, 수(水)펌프와 시료 채취부 등으로 구성되어 있고, 방전관의 구조는 파이렉스로 제작된 원통형 방전관(외경: \varnothing 24[mm], 길이: 250[mm])으로서 방전관 내부에는 구형 유전체(\varnothing 5[mm], $\text{SiO}_2, \epsilon_r: 5$)가 넣어져 있으며, 이 방전관의 외부면에는 구리판 전극이 부착되어 있고, 중심부에는 백금 선전극이 설치되어져 있다. 그리고 두 전극 사이에 20[kHz], 6~12[kV]의 교류 전압이 인가되는 동안 방전관을 통과한 시험수 2[ℓ]에 존재하는 대장균의 제거 특성을 조사하였으며, 시험수는 수(水)펌프에 의해 순환되도록 제작하였다. 시험수는 일반 지하수에 초기 대장균수를 1[ml]당 약 5,000마리의 개체가 존재하도록 물과 세균의 농도비를 조절하여 제조하였고, 이를 이용하여 실험하였다. 그리고 대장균의 제거 결과를 알기 위하여 시험용 대장균 배양지인 3M Petrifilm(Coliform Count Plate) 제품을 사용하였다. 그리고 방전관은 물의 흐름과 균일한 수중 전계 분포를 고려하여 동축 실린더형을 사용하였다. 수(水)중의 백금 전극은 수중 방전시 전극 재료의 수소 이온화 경향에 의해 부식되는 것을 막기 위해 사용되었으며, 실험에 사용한 전원은 최대 정격 전력 150[W], 주파수 20[kHz], 최대 출력 전압이 20[kV]인 전원을 사용하였다. 이외의 다양한 파라미터로는 처리 시간, 인가 전압, 수(水)유량 그리고 유전체구의 크기 등이다.

그림 5는 방전관의 내·외부의 구조를 나타낸 그림이다. 방전관은 시험수의 유출입부, 내부 백금 전극과 전극 지지대, 방전관 외부면의 동(銅)전극, 그리고 외경 \varnothing : 5[mm], 비유전율(ϵ_r): 12인 ZrO_2 비드를 충전한 외경: \varnothing 24[mm], 길이: 300[mm]인 파이렉스 관으로 구성되어 있다.



- | | |
|------------|------------|
| 1 오실로스코프 | 2 Air 펌프 |
| 3 Air 조절부 | 4 인젝터 |
| 5 전압조절부 | 6 고압전원 |
| 7 수(水)펌프 | 8 수유량조절부 |
| 9 수조 | 10 수(水)유량계 |
| 11 수(水)방전관 | 12 전압분압기 |

Fig. 4. 실험장치 사진.

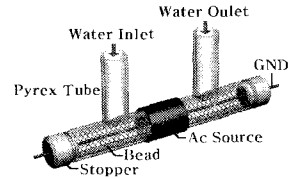
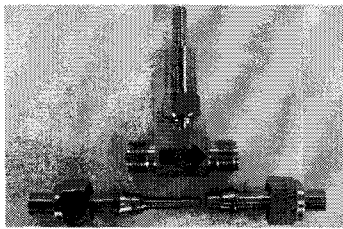
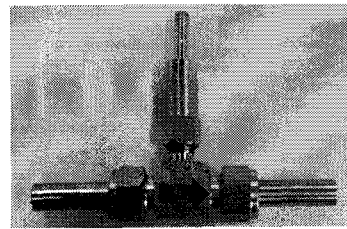


Fig. 5. 방전관의 사진.

그림 6은 방전관 내부로의 공기버블 주입을 위한 인젝터의 조립 전과 조립 후 사진이다. 인젝터의 내부에 화살표 방향으로 물이 흐를 경우, 벤투리관(Venturi tube)이나 기화기 등에서 볼 수 있는 바와 같이 인입부와 인출부의 압력차에 의해 외부 공기가 자동으로 빨려 들어가 물과 공기가 자연스럽게 혼합되는 기능을 가지고 있는데 그림의 상부에 강제 공기 주입용 펌프가 설치되어 사용된다.



(a) 조립전



(b) 조립후

Fig. 6. 인젝터 내부 및 외부 사진.

3.1. 유량, 전압 및 공기 주입에 대한 대장균 제거 특성

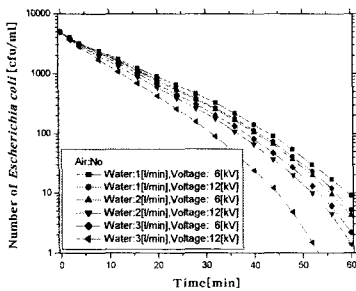


Fig. 7. 인가전압과 유량에 대한 대장균 제거특성.

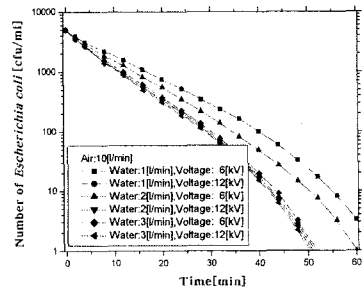


Fig. 8. 공기, 인가전압과 유량에 대한 대장균 제거특성.

그림 7은 전압 6[kV]와 12[kV], 유량 1, 2, 3[l/min], 전극 간격 12[mm], 구형 유전체 비드의

직경이 5[mm]일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 그림 8은 그림 7의 실험조건에 공기 주입장치인 인젝터를 부착하여 실험한 결과이다. 그림 7 그래프를 보면, 전압이 높고, 물의 유량이 많을수록 대장균의 제거율이 우수하게 나타났다. 이는 전압 상승시 수중 전계가 동시에 상승하기 때문이고, 유량에 대해서는 펌프 회전수가 높을수록 시험수가 빨리 순환되어 단위 시간당 방전관 통과 횟수가 증가되기 때문이다. 따라서 수중 대장균이 고전계 영역과 접촉할 확률이 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 높아지는 것으로 사료된다. 그러나 시험수의 유량 2[l/min], 전압 12[kV]인 경우가 유량 3[l/min], 전압 6[kV]인 경우보다 대장균 제거특성이 좋게 나온 것은 어느 일정 이상의 유량이 되면 상대적으로 유량보다는 전압의 영향을 더 받기 때문으로 사료된다.

그림 8과 그림 7의 실험결과를 비교하면, 공기를 주입한 그림 8의 경우, 수중에서 미세 오존 및 이산화 물질의 발생 증가와 수중 부분 전계 영역의 증가로 인해 대장균이 최대 약 20%정도 처리 시간이 줄어드는 것으로 나타났다.

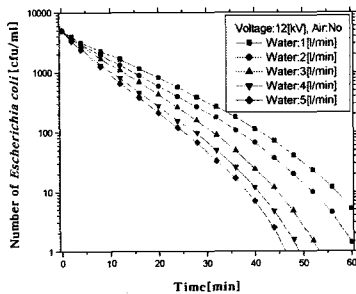


Fig. 9. 유량에 대한 대장균 제거특성.

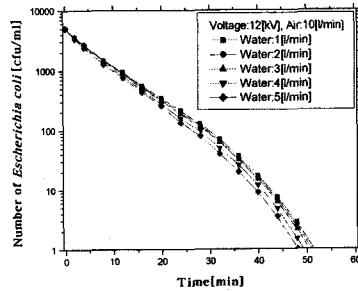


Fig. 10. 공기와 유량에 대한 대장균 제거특성.

그림 9는 전압 12[kV], 유량 1~5[l/min], 전극 간격 12[mm], 구형 유전체의 직경이 5[mm]일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 유량이 증가시 대장균의 제거율은 점점 상승하는 경향을 보였으나 유량을 지속적으로 증가시켜도 비례적으로 대장균의 제거특성은 나타나지 않고, 제거율이 포화의 경향을 나타내었다.

그림 10은 전압 12[kV], 유량 1~5[l/min], 전극 간격 12[mm], 구형 유전체의 직경이 5[mm], 공기 주입량이 10[l/min]일 때, 시간 경과에 대한 수중 대장균 제거특성을 나타낸 것이다. 그림 9의 실험결과와 비교해 보면, 공기를 투입한 그림 10의 경우, 수중에서 공기 주입으로 인한 이산화 물질의 발생과 방전 구간의 부분 전계의 확대로 인해 대장균의 제거가 전반적으로 더욱 용이한 것으로 나타났다. 하지만 유량이 상대적으로 증가할 경우에는 공기 주입에 의한 영향이 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다.

3.2. 구형 유전체 크기에 대한 대장균 제거 특성

그림 11은 전압 12[kV], 유량 3[l/min], 전극 간격 12[mm], 구형 유전체 직경이 2[mm], 3.5[mm], 5.0[mm]일 때, 시간에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 구형 유전체 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 완전 제거될 때까지의 처리 시간을 살펴보면, 구형 유전체의 직경이 5[mm]인 경우가 직경이 2[mm]일 때보다 약 10분 정도 대장균의 제거 시간이 단축되는 결과를 알 수 있었다.

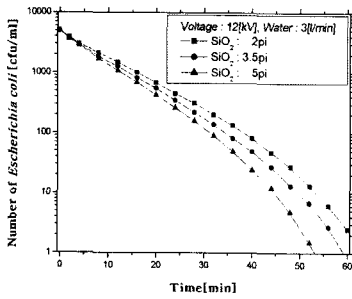


Fig. 11. 구형 유전체 크기에 대한 대장균 제거특성.

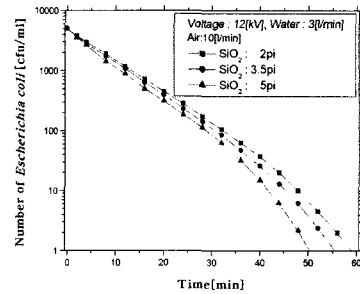


Fig. 12. 공기와 구형 유전체 크기에 대한 대장균 제거특성.

그림 11은 전압 12[kV], 유량 3[l/min], 전극 간격 12[mm]의 조건에서 직경 2.0, 3.5, 5.0[mm]인 구형 유전체의 사용 유무에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험결과 세균이 완전히 제거되는 시점을 살펴보면, 직경 2.0[mm]의 구형 유전체를 사용한 경우에는 수중 대장균을 완전 처리하는데 약 70분 정도의 처리시간이 필요함을 알 수 있었고, 직경 5.0[mm]의 구형 유전체를 사용한 경우는 약 53분 정도 소요됨을 알 수 있었다. 즉 비드의 크기가 큰 것이 대장균의 제거에 유리함을 실험적으로 알 수 있다. 하지만 비드의 크기는 방전관의 내경의 설계와 큰 관계를 가지므로 이를 주의해서 설계해야 한다.

그림 12는 전압 12[kV], 유량 3[l/min], 전극 간격 12[mm], 공기 주입량 10[l/min]의 조건에서 직경 2.0, 3.5, 5.0[mm]인 구형 유전체 비드의 사용 유무에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 본 실험의 결과를 앞의 실험 결과와 비교해 보면, 약 10% 내외의 수중 대장균 제거 시간 단축이 일어남을 알 수 있다. 이전의 실험 결과들과 비교하면 큰 차이를 볼 수 없는데, 이는 수중 대장균의 제거에 있어서 공기 주입에 의한 영향이 상대적으로 전압, 유량 그리고 비드의 크기보다 다소 적게 작용함을 의미한다.

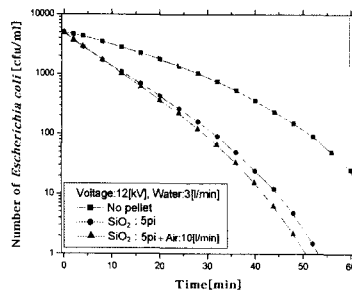


Fig. 13. 공기와 구형 유전체 유무에 대한 대장균 제거특성.

그림 13은 전압 12[kV], 유량 3[l/min], 전극 간격 12[mm]의 조건에서 비드가 없는 경우, 직경 5.0[mm]인 구형 유전체 비드가 있는 경우에 공기 주입의 유무에 대한 수중 대장균 제거 특성을 나타낸 것이다. 실험 결과 세균이 완전히 제거되는 시점을 기준으로 하여 살펴보면, 유전체 비드를 사용하지 않은 경우는 약 80분 이상의 처리 시간이 소요되는 결과를 나타내었고, 직경 5.0[mm]인 유전체 비드만 사용한 경우에는 53분 정도의 처리 시간이 소요되었다. 이 경우에 공기를 주입하면 전원 인가 후, 약 50분 정도에서 대장균이 모두 제거되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

전압이 높은 경우 전계는 비례적으로 증가하여 대장균의 제거특성이 우수하였고, 유량의 경우 시험수를 순환시켜 단위 시간당 시험수의 방전관 통과 횟수를 증가시키면 유량이 증가하데 되므로 수중 대장균이 고전계 영역 즉, 구형 유전체의 상호간의 접합부 부근의 전계 집중 현상에 의해 고전계와 접촉할 기회가 높아지기 때문에 수중 대장균의 제거율이 높아졌다. 또한, 구형 유전체의 직경이 큰 경우 전계 강도가 높기 때문에 수중 대장균의 제거시간이 단축됨을 알 수 있었다. 그리고 구형 유전체를 사용하는 경우 대장균 제거시간은 단축되었다. 그리고 전압 12[kV], 수유량 1[l/min]의 조건에 공기를 10[l/min]을 주입할 경우, 대장균 제거시간은 약 40% 내외의 단축되었다. 전압 12[kV], 직경 5.0[mm] 비드, 수유량이 3[l/min] 이상인 경우에 공기 10[l/min]을 주입하면, 수중 대장균의 제거시간이 약 10% 내외의 단축되는 결과를 가져왔다. 이러한 결과들을 전체적으로 살펴보면, 높은 인가 전압, 빠른 수유량, 큰 유전체의 경우, 공기 버블을 주입하면 수중 대장균의 제거에 유리한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 이동훈, 2003, 고전압 방전에 의한 이산화탄소의 제거 특성, 대한전기학회 추계학술대회.
- 이동훈, 2003, 수중 직접방전 전극의 최적전극형상설계, 대한전기학회 고전압 방전 응용 연구회 춘계학술대회, pp.60-63.
- 김용호, 홍상희, 1998, 교류 유전체장벽 코로나방전을 이용한 NO_x/SO_x 분해실험, 한국물리학회지 응용물리, 11, 393-400.
- 김진규, 2002, 유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해수 발생특성, 조명전기설비학회 논문지, 16(4), 46-54.