

## 구형 유전체비드를 가지는 단층절연방전관의 수(水)오존농도측정 및 전계분포 시뮬레이션

### The measurement of Ozone Concentration and Simulation of Electric Field Distribution at Dielectric Tube of one Layer with Globular Dielectric in Water

이동훈\*, 박재윤\*, 박홍재\*, 고희석\*, 이현수\*\*

Lee Dong Hoon\*, Park Jae Youn\*, Park Hong Jae\*, Koh Hee Seog\*, Lee Hyun Su\*\*

#### Abstract

In this paper, the electric field distribution in dielectric tube with one layer and spherical dielectric( $ZrO_2$ ) in water was simulated. The reactor was made up of the spherical dielectric that is diameter : 3.0[mm],  $ZrO_2$ ( $\epsilon_r:10$ ) and one glass plate of thickness(2[mm]),  $\epsilon_r(10)$  as electrode. The discharge gap was 8[mm]. To get more strong electric field, the dielectric constant should be higher comparatively. Using the spherical dielectric for water discharge in dielectric tube, the location of equipotential line was shifting from the interior to the exterior. At real water discharge experimental, ozone was measured higher dissolved ozone in water at condition of water rate(1[l/min]) and injector than condition of non-injector or 2~3[l/min]

**Key Words** : Dielectric, Electric field, Potential, Water discharge.

#### 1. 서론

최근 우리 사회는 급속한 산업 경제의 발달과 인구 증가로 인해 대기 및 수질 오염이 심각한 상황에 놓여 있으며 넓게는 국가간의 환경 문제로 인해 분쟁의 소지를 안고 있는 실정이다. 특히, 수질 및 대기 환경의 개선을 위해 더 많은 노력을 기울이고 있다.<sup>[1]~[3]</sup> 다양한 오염원들 중에서 지구 온난화 근원적인 원인 물질로 석유와 화석 연료가 대표적인데 이와 관련된 산업 활동 모든 분야가 이와 직·간접적으로 관련을 가지고 있으며, 결국 화학 에너지 소비의 증가와 연계되고 있다.<sup>[4]~[6]</sup> 그리고 이러한 에너지 소비형 산업 활동의 부산물로서 연소나 소각 과정에서 발생하는 질소 산화물, HC계열의 발암 물질, 휘발성 유기화합물(VOC)과 중화학 공업에서 배출되는 유사 유해 가스 및 난분해성 폐수 물질과 축산 폐수, 농약 등은 자연 환경의 리사이클에 의해 지구상의 지표수를 심각하게 오염시키고 있다.<sup>[7]~[10]</sup> 이러한 환경 오염원을 처리하는 방법들 중에 유전체

를 이용하는 고전압 방전법은 현재 오존의 발생, 물을 산성 또는 알칼리수로의 변환, 난분해성 유해 가스 처리, 수중 세균 처리 등에 다양한 분야에 사용되고 있다. 특히 전기적 방법으로 구형의 유전체를 사용하는 경우에 있어 구형 유전체의 고전압에 대한 전계 및 전위 분포 특성을 이해함에 있어 도움을 주고자 상용 전자계 해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션하였고,<sup>[11]~[12]</sup> 실제 수방전 실험을 통하여 수중 용존 오존량을 조사하였다.

#### 2. 시뮬레이션

##### 2.1 형상의 설계 및 초기 전위 분포 해석

그림 1은 수(水)중에서 지름( $\phi 3.0$ [mm]) 구(球)형 유전체를 가지는 단층의 절연성 유전체 내면의 형상과 고전압 전위 분포 예를 나타낸 것이다. 그림 1에서 상·하부 전극 간격은 8[mm]이고, 구형 유전체가 존재하는 구간의 상부와 하부 간격은 6[mm]이다

\* : 경남대학교 전기전자공학부

\*\* : 마산대학 컴퓨터전기공학부

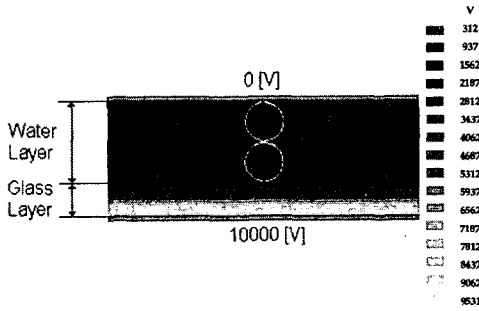


그림 1 시뮬레이션의 형상 및 초기 전위 분포

이 구형의 유리구의 비유전율이 10일 때 발생하는 수중 전위 및 전계 분포의 특성을 알기 위해 시뮬레이션을 시도하였다. 수중에서 상부면에는 0[V]을 인가하였고, 하부면에 10000[V]의 전압을 인가한 경우의 전위 시뮬레이션 해석 결과로 전극 형상이 평판 전극인 관계로 평등 전계에 의해 전위 분포도 평행의 전위 분포를 나타내는 특징을 보였다. 하지만 균등한 평등 전계의 분포가 아니라 비유전율 5 정도인 절연물(유리 : Glass) 판이 방전 영역에 존재함으로 인해 각각의 절연물 내부에 많은 등전위 경계층이 분포하는 특징을 보여주고 있다.

## 2.2 구형 유전체의 유전 분극 특성

유전체 분극에서 일반적인 유전 분극의 세기는 쿨롱의 법칙과 이 법칙과 관련된 전계( $E$ )와 전하량( $Q$ ) 그리고 정전용량( $C$ )과 관련된 수식들의 관계에 의해 두 점전하가 가지는 대전 전하량의 전계 강도( $V/m$ )의 특성에 의존한다. 그림 1과 같이 전극에 인가된 전압에 의해 상하로 대전된 직렬의 다중 점전하의 특성은 다음의 수식으로 설명할 수 있다. 수식 (2.1)은 쿨롱의 법칙으로 두 정전하  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 대전 전하량의 크기와 성질에 따라 두 전하의 상호 힘의 관계로서 인력과 척력의 크기가 결정되는 것을 의미하는 수식이고, 수식 (2.2)는 단일 정전하의 전계 강도를 나타내는 수식이며, 수식 (2.3)은 기본적으로 정전하의 대전 전하량의 경우 콘덴서의 인가전압과 콘덴서의 용량에 비례하고 있음을 나타내는 수식이다. 그리고 수식 (2.4)는 콘덴서의 정전용량을 나타내는 수식으로 고정 상수인 진공의 유전율( $\epsilon_0$ )과 비례 상수인 전극 사이에 인가되는 물질의 비유전율( $\epsilon_r$ ), 그리고 마주보는 전극의 면적( $s$ )과 전계의 크기에 있어 반비례 상수인 거리( $d$ )로 구성된다. 그리고 이와 같은 기본적인 조건들에 의해 대칭형 전극에서의 유전체구들의 유전 분극 특성을 설명할 수 있다. 그리고 그림 1에서의 형상 및 결과를 살펴보면, 대전 전하의 유전 분극에 의한 전계 강도는 인가 전압에 비례

하는 특징이 있다. 하지만 유전체구의 크기가 변화하면 전극과 유전체구 또는 유전체구 상호간에 마주보는 면적( $s$ )과 거리( $d$ )가 비례적이지 않으면서 가변적 특성을 가지므로 인해 전계 강도( $V/m$ )가 유전체구의 크기에 대해 일정한 비례 관계식을 가지지는 않는 특징이 있다. 그리고 이와 같은 구형 유전체의 형상적 특징으로 인해 수식 (2.4)와 같이 비유전율( $\epsilon_r$ )에 대한 전계 강도( $V/m$ )도 일정한 상수에 따른 비례 관계식으로 나타내기 힘들며, 이에 대한 설명은 3장의 전계 시뮬레이션 결과들의 상호 비교 분석을 통해 설명할 수 있다.

$$F = K \frac{(Q_1 \cdot Q_2)}{R^2} \quad (2.1)$$

(비례상수  $K : \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $R$  : 거리,  $Q$  : 양 또는 음전하)

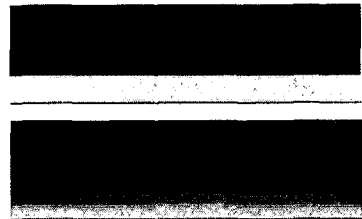
$$E = K \frac{Q}{R^2} \quad (2.2)$$

$$Q = CV \quad (2.3)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{s}{d} \quad (2.4)$$

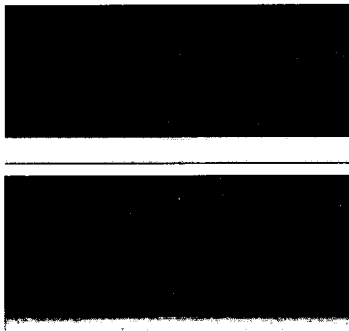
## 2.2 시뮬레이션 결과

그림 3과 그림 4는 구형(Glass) 유전체의 전계 및 전위 분포를 시뮬레이션한 것이다. 그림 3은 인가전압 10[kV]에서 최대 전계 약 42[kV/m]를 나타내었고, 전계 형태는 대체적으로 평행 전계 분포이지만 균등 전계는 아니었다. 이는 비유전율이 5 정도인 절연물(유리 : Glass) 판이 방전 영역에 존재함으로 인해 절연물 내부에 많은 등전위 분포층을 가지기 때문이다. 그림 4는 그림 3의 조건과 동일하고 단지 수중 방전 거리를 6[mm]에서 12[mm]로 증가한 경우로서 전체적인 경향은 앞서 설명한 그림 3과 거의 동일하며, 구형의 유전체의 유전율이 증가하면 평행 등전위선의 위치가 구형 유전체의 내부에서 외부로 밀려나는 특성을 나타내었다.



V/m	V
156340	312
432915	937
702290	1562
999866	2187
0.124E+07	2812
0.151E+07	3437
0.178E+07	4062
0.205E+07	4687
0.232E+07	5312
0.260E+07	5937
0.287E+07	6562
0.315E+07	7187
0.343E+07	7812
0.372E+07	8437
0.399E+07	9062
0.420E+07	9531

그림 3. 구형 유전체(비유전율:10)와 8[mm]갭을 가지는 단층 절연 유전체 판의 전계 분포 시뮬레이션



V/m	V
142286	312
379303	937
616620	1562
854337	2187
0.110E+07	2812
0.134E+07	3437
0.158E+07	4062
0.182E+07	4687
0.233E+07	5312
0.230E+07	5937
0.255E+07	6562
0.279E+07	7187
0.304E+07	7812
0.328E+07	8437
0.353E+07	9062
0.371E+07	9531

그림 4. 구형 유전체(비유전율:5)와 13[mm]갭을 가지는 단층 절연 유전체 판의 전계 분포 시뮬레이션

### 3. 실험 결과

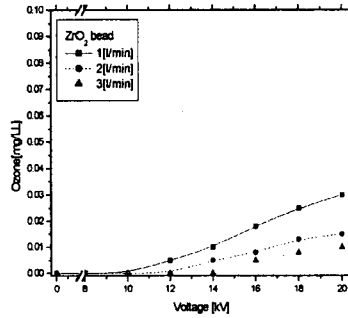


그림 5. 인가전압에 따른 유전체 비드 수방전관의 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성

그림 5는 유량(1, 2, 3[l/min]), 방전갭(10[mm]), 유리구(3.0 $\phi$ )에서 인가전압에 따른 수방전관의 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성을 조사한 것이다. 각각의 실험 결과는 매 30분 이후에서 측정된 수치이고, 수[水]유량은 500[ml]이며, 순환(By-pass)방식으로 실험하였다. 오존(O<sub>3</sub>) 발생량은 반응기 내부에서 유속이 대체로 느린 경우에 농도가 다소 높게 나타났다. 이는 단위시간당 물이 오존(O<sub>3</sub>)으로 변환될 수 있는 시간적 확률을 더 제공하기 때문으로 사료된다.

그림 6은 그림 5의 실험 조건에 공기 Mixing 장치인 인젝터를 설치한 수방전관의 인가전압에 따른 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성을 조사한 것이다. 측정결과 오존(O<sub>3</sub>) 발생량은 인젝터가 설치되지 않은 그림 5의 경우보다 오존(O<sub>3</sub>)의 발생이 증가하는 특성이 나타났다. 이는 공기 Bubble에 의해 고전압 방전에 의한 수방전관 내부 공간 영역에서의 점전계의 수가 증가하기 때문이고, 오존수로 변환을 조금 더 용이하게 하기 때문으로 사료된다.

그림 7은 유량(1, 2, 3[l/min]), 방전갭(10[mm]), 유리구(3.0 $\phi$ )에서 반응시간에 따른 수방전관의 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성을 조사한 것이다. 본 방전관의 실험 결과 오존(O<sub>3</sub>)의 생성 및 소멸량이 동일하게 되는 지점이 반응 개시 이후 60분 정도에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 유량(1, 2, 3[l/min]), 방전갭(10[mm]), 유리구(3.0 $\phi$ )와 공기 Mixing 장치인 인젝터를 설치한 수방전관의 반응시간에 따른 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성을 조사한 것이다.

본 방전관의 실험 결과 오존(O<sub>3</sub>)의 생성 및 소멸량이 동일하게 되는 지점이 그림 7과 같이 반응 개시 이후 60분 정도에서 나타나고 있음을 알 수 있고, 방전관 내부로의 공기 주입 영향으로 그림 7의 경우보다 오존(O<sub>3</sub>)의 발생량이 증가하는 결과를 나타내었다.

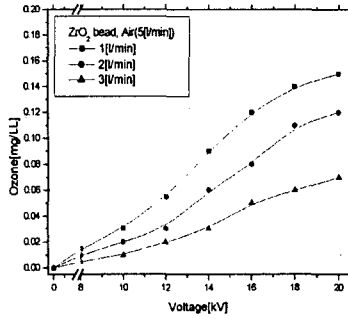


그림 6. 인가전압에 따른 유전체 비드와 인젝터형 수방전관의 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성

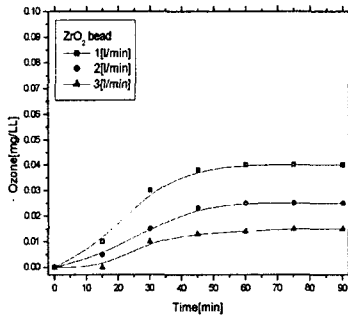


그림 7. 반응시간에 따른 유전체 비드 수방전관의 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성

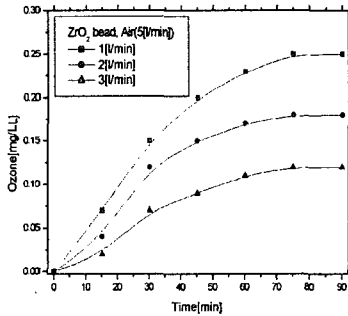


그림 8. 반응시간에 따른 유전체 비드와 인젝터형 수방전관의 오존(O<sub>3</sub>) 발생 특성

#### 4. 결론

구형 유전체(비유전율:10)와 8[mm]갭을 가지는 단층 절연 유전체 판의 전계 분포 시뮬레이션 결과 인가전압 10[kV]에서 최대 전계 약 42[kV/m]를 나타내었고, 수방전 공간의 거리가 2배로 늘어난 13[mm]갭을 가지는 단층 절연 유전체 판의 전계 분포 시뮬레이션 결과 인가전압 10[kV]에서 최대 전계 약 37[kV/m]를 나타내었다. 절연물을 가지는 경우에 있어서, 방전 거리가 2배로 늘어날 경우 통상적으로는 거리에 비례하지만 본 경우에서의 전계 분포는 비례적으로 감소하지는 않았다. 오존(O<sub>3</sub>)의 생성 및 소멸량이 동일하게 되는 지점을 살펴보면, 인젝터가 부착된

경우와 부착되지 않은 경우 모두 방전 개시 이후 60분 이후의 시간에서 용존 오존이 일정하게 나타내었다.

#### 참고 문헌

- [1] 이동훈, 박재윤, 박상현, “자계를 이용한 질소 산화물의 제거 효과”, 대한전기학회 전문대 학술발표, June 2002.
- [2] 박재윤 외 2명, “비열 플라즈마를 이용한 CF<sub>4</sub> 분해에 미치는 혼합가스의 영향”, 전기전자재료학회 논문지, 6호, 제 15권, pp. 543-550. 1896, 2002.
- [3] 이동훈, 박재윤, 이현수, “전자계촉매형 플라즈마반응기의 질소산화물 제거특성”, 전기전자재료학회논문지, June 2002.
- [4] 이동훈, 박재윤, 박상현, “고전압 방전에 의한 이산화탄소의 제거 특성”, 대한전기학회 추계학술대회, Sep. 2002.
- [5] 김용호, 홍상희, “교류유전체장벽 코로나방전을 이용한 NOx /SOx 분해실험”, 한국물리학회지 11호, pp. 393-400, 1998.
- [6] H. K. Joo, M. S. Jeon, and T. K. Lee, “Photocatalysts : Theory and Its Application”, J. of Korean Soc. of Environmental. Eng., Vol. 21, No. 6, pp. 1231, 1999.
- [7] 이동훈 외 2명, “Ti-Si-Al형 세라믹 촉매 방전관의 오존 발생특성 연구”, 조명전기설비학회 논문지, 제 16권, 6호, pp. 130-136, 2002.
- [8] 정병석, 신동석, 김병호, “MOD법에 의한 강유전성 SrBiTaO(SBT)박막제조 및 후열처리효과의 연구”, 전기전자재료학회논문지, 3호, 제 11권, pp. 2296-2300, 1998.
- [9] 남효덕, 우동찬, “BaTiO<sub>3</sub> 세라믹스의 절연 파괴 거동에 미치는 기공의 크기와 기공율의 영향”, 전기전자재료학회논문지, 3호, 제 10권, pp. 1896-1900, 1997.
- [10] 이동훈, 박홍재, 박재윤, “수중직접방전전극의 최적전극형상 설계”, 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 60-63, April. 2003.
- [11] Woo Seok Kang, Yong-Ho Kim, and Sang Hee Hong, “Spatio-temporal images of single streamer propagation in dielectric barrier discharge”, IEEE Transaction on Plasma Science, pp. 166-167 (2002)
- [12] 김진규, “유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해수 발생 특성”, 조명전기설비학회 논문지, vol. 16, no. 4, pp. 46-54, July 2002.
- [13] 이동훈, 박홍재, 박재윤, 고희석, “대기중에서 구형 유전체의 전계 분포 시뮬레이션”, 대한전기학회 논문지, 제 52권, 7호, June 2003