

수중에서 구형 유전체와 단층 절연 방전관의 전계 분포 시뮬레이션

이동훈, 박재윤*, 이재동, 박홍재, 고희석*

경남대학교 전기공학과 대학원, 경남대학교 전기전자공학부*

The Simulation of Electric Field Distribution of Dielectric Tube with Single Layer and Globular Dielectric in Water

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

Kyongnam Univ.

Abstract

In this paper, the electric field distribution in dielectric tube with one layer and spherical dielectric in water was simulated. The reactor was made up of the spherical dielectric that is diameter : 2.5[mm], ϵ_r : 5, 100, 1000, 5000 respectively and one glass plate being 2[mm] thickness, ϵ_r : 5 as electrode. The discharge gap was 7[mm]. As a result of the simulation, in case of being about the same value between the dielectric constant of spherical dielectric and water, when the reactor was applied to high voltage, dielectric polarization characteristic was trending toward disappearance. To get more strong electric field, the dielectric constant should be higher comparatively. Increasing the spherical dielectric constant, the location of equipotential line was shifting from the interior to the exterior.

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

1. 서론

현대 사회는 급속한 산업 발달과 인구 증가로 인해 대기 및 수질오염이 각 개별 나라의 문제에서 국경을 초월하는 지구 전체의 환경 문제로 부각되고 있다. 특히, 수질 및 대기 환경의 개선을 위해 더 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다. 오염원들 중에는 다양한 원인 물질들이 있는데 이 중에서 연소나 소각 과정에서 발생하는 발암성 물질인 다이옥신과 분진, 매연 그리고 페인트 등의 공업 화학 제품에 다량으로 함유되어 있는 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 난분해성 유해 가스나 화학 폐수, 가정 하수, 축산 폐수, 농약 등의 수질 오염원은 시간이 지남에 따라 그 성장 속도가 가속되어 심각한 실정에 이르고 있다.^[1] 이러한 다양한 환경 오염원들을 처리하는 방법들 중에서 최근에 시도되고 있는 유전체를 이용하는 고전압 방전법은 오존의 발생, 물을 산성 또는 알카리수로의 변환, 난분해성 유해 가스 처리, 수중 세균 처리 등에 다양한 분야에 사용되고 있다.

특히 이러한 고전압을 이용하는 전기적 방법에서 구형의 유전체를 사용하는 경우가 있는데 구형 유전체의 고전압에 대한 전계 및 전위 분포 특성을 이해함으로써 실제 시스템의 운전 및 설계에 있어 도움을 주고자 상용 전자계 해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션하였다. 그리고 다양한 비유전율과 방전거리에 대해 시뮬레이션하였고, 이 결과를 평가하여 구형 유전체의 방전 특성을 제시하였다.^{[4]~[8]}

2. 시뮬레이션

2.1 형상의 설계 및 초기 전위 분포 해석

그림 1은 수(水)중에서 구(球)형의 유전체를 가지는 이중의 절연성 유전체 내면의 형상과 고전압 전위 분포 예를 나타낸 것이다. 그림 1에서 상부와 하부 전극 간격은 7[mm]이고, 구형 유전체가 존재하는 구간의 상부와 하부 간격은 5[mm]이며, 시뮬레이션에서 사용된 유전체구의 지름은 $\varnothing 2.5$ [mm]이다. 이 구형의 유전체의 비유전율을 5, 100, 1000, 5000으로

다양하게 변화시킬 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 평등 전위 분포를 나타내는 특징을 보였다. 하지만 균등한 평등 전계의 분포가 아니라 비유전율 5 정도인 절연물(유리 : Glass) 판이 방전 영역에 존재함으로써 인해 각각의 절연물 내부에 많은 등전위 경계층이 분포하는 특징을 보여주고 있다.

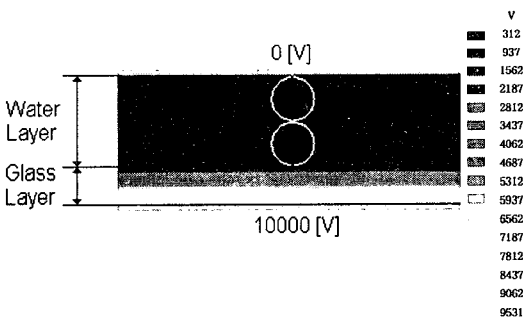


그림 1 시뮬레이션의 형상 및 초기 전위 분포.

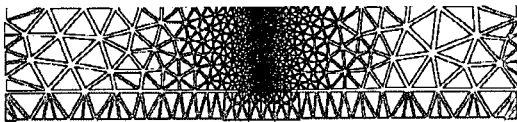


그림 2 시뮬레이션을 위한 셀(cell) 분할.

그림 2는 논문의 시뮬레이션 전처리에서 해석 영역을 삼각셀로 분할한 것의 일 예를 나타낸 것으로 왜곡부의 해석상의 수렴 정도의 정확성을 기하기 위해 곡률반경이 작은 부분은 세밀하게 잘라서 해석하도록 설계하였다.

2.2 유전체구의 유전 분극 특성

유전체 분극에서 유전 분극의 세기는 두 점전하가 가지는 대전 전하량의 전계 강도(V/m)에 의존한다. 이는 쿨롱의 법칙과 관련된 전계(E)와 전하량(Q) 그리고 정전용량(C)과 관련된 수식들의 관계에 의해 설명된다. 그림 1과 같이 전극에 인가된 전압에 의해 대전된 직렬의 다중 점전하의 특성을 아래의 수식으로 설명할 수 있다. 수식 (2.1)은 쿨롱의 법칙으로 두 점전하 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 점전하의 전계 강

도를 나타내는 수식이며, 수식 (2.3)은 기본적으로 정전하의 대전 전하량의 경우 콘덴서의 인가전압과 콘덴서의 용량에 비례하고 있음의 나타내는 수식이다. 그리고 수식 (2.4)는 콘덴서의 정전용량을 나타내는 수식으로 고정 상수인 진공의 유전율(ϵ_0)과 비례 상수인 전극 사이에 인가되는 물질의 비유전율(ϵ_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 1의 형상 및 결과를 살펴보면, 대전 전하의 유전 분극에 의한 전계 강도는 인가 전압에 비례하는 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 유전체 구의 크기에 대해 일정한 비례 관계식을 가지지는 않는 특징이 있다. 그리고 이와 같은 구형 유전체의 형상적 특징으로 인해 수식 (2.4)와 같이 비유전율(ϵ_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. 그리고 3장의 시뮬레이션 결과들을 살펴보면 전극 양단에 전압을 인가할 경우, 전극 내부의 유전체 판내부에 접촉되어 있는 유전체구에는 전극면의 전하와 반대의 성질을 가지는 전하들이 대전에 의해 모이게 되고, 이 구형 유전체 반대쪽 면에도 이와 동일한 양(量)의 반대 성질의 전하가 대전되게 된다. 이러한 대전 전하가 직렬로 겹쳐 있으면 앞서 설명한 형태와 동일 대전 형태로 반복적으로 나타나는 특징을 보이게 된다. 이 때 유전체구와 유전체구 사이 또는 전극과 유전체구의 점점 부근에서 복합적인 원인으로 인해 강한 전계를 가지는 지점이 나타난다. 그리고 이와 같은 점전계의 세기는 유전체구의 물리적인 성질의 하나인 비유전율의 크기와 밀접한 관련을 가진다.

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

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

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

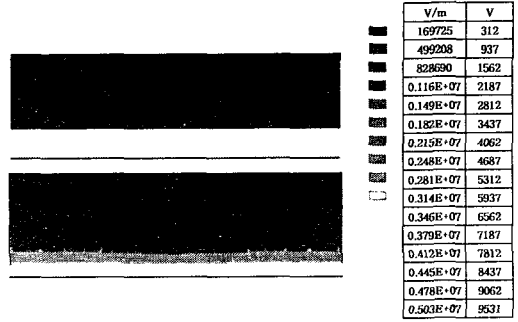
$$Q = CV \quad (2.3)$$

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

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 결과

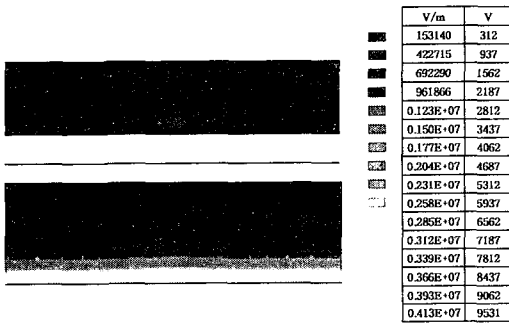
그림 3은 구형 유전체의 유전율의 변화에 다른 전계 및 전위 분포를 시뮬레이션한 것이다. 구형 유전체와 물(水)의 비유전율과 비슷한 그림 3의 (c)경우에 인가 전압에 의한 유전 분극 특성은 거의 사라지고 한 개의 판형 유전체 표면에 존재하는 전위차에 의해 전위 분포가 균등한 분포 특성을 나타내는데 이는 물과 유전체의 비유전율이 비슷하여 구형 유전체가 분극 특성을 가지지 못하기 때문으로 사료된다.



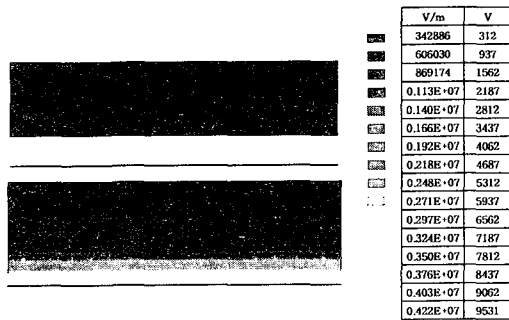
(d) 구형 유전체의 비유전율 : 5000

그림 3. 구형 유전체와 7[mm]갭을 가지는 이층 절연 유전체 판의 전계 분포 시뮬레이션

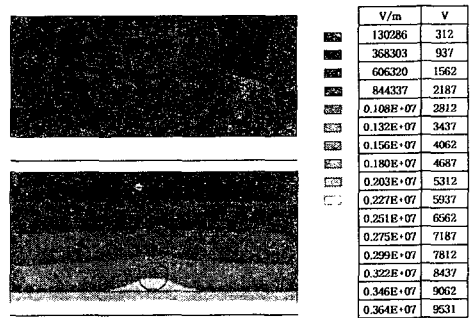
그림 3의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 각각의 시뮬레이션의 결과에서 최대 전계의 경향을 추정해보면 유전체의 유전율이 상대적으로 큰 쪽에서 강하게 나타나는 특징을 보였으며, 전계의 형태는 평행 전계 분포이지만 균등 전계 분포는 아니었다. 이는 비유전율 5 정도인 절연물(유리 : Glass) 판이 방전 영역에 존재함으로 인해 각각의 절연물 내부에 많은 등전위 경계층 분포를 가지기 때문이다.



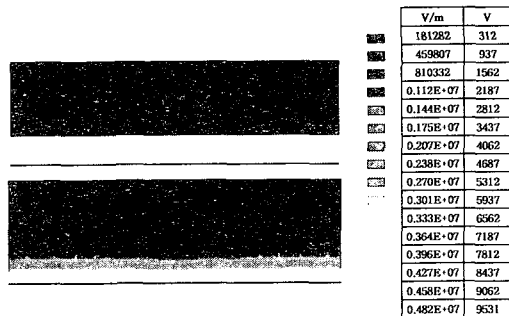
(a) 구형 유전체의 비유전율 : 5



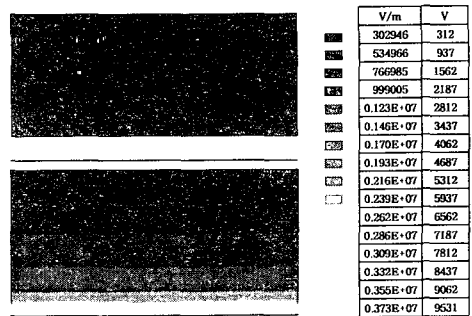
(b) 구형 유전체의 비유전율 : 100



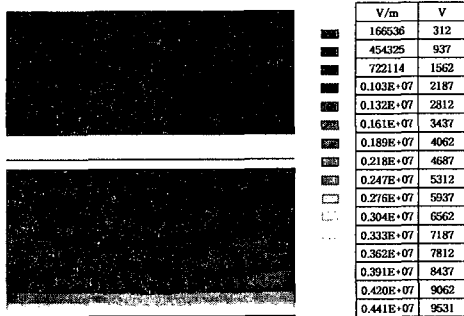
(a)



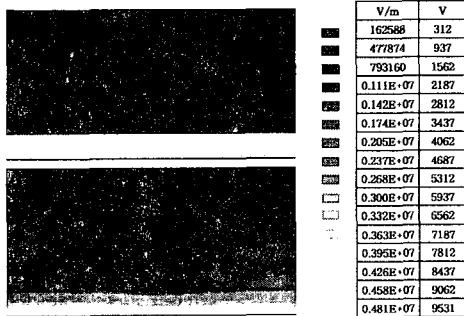
(c) 구형 유전체의 비유전율 : 1000



(b)



(c)



(d)

그림 4. 구형 유전체와 12[mm]갭을 가지는 이중 절연 유전체 판의 전계 분포 시뮬레이션.

그림 4는 그림 3의 조건과 동일하고 단지 수중 방전 거리를 5[mm]에서 10[mm]로 증가한 경우로서 전체적인 경향은 앞서 설명한 그림 3와 거의 동일하며, 구형의 유전체의 유전율이 증가하면 평행 등전위선의 위치가 구형 유전체의 내부에서 외부로 밀려나는 특성을 나타내었다.

3. 결론

구형 유전체의 유전율이 물(水)의 비유전율과 비슷한 경우, 전압 인가시 유전 분극 특성은 거의 사라지는 경향을 나타내었고, 물과 구형 유전체의 유전 비율의 차이가 상대적으로 큰 경우에는 대전 전계에 의한 전계의 세기도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 물과 유전체의 비유전율이 비슷한 경우에 있어서 구형 유전체가 분극 특성을 가지지 못하기 때문이다. 더 강한 전계를 얻기 위해서는 유전체의 비유전율이 상대적으로 더 크게 설정하는 것이 좋으며, 구형의 유전체의 유전율이 증가하면 평행 등전위선의 위치가 구형 유전체의 내부에서 외부로 밀려나는 특성을 나타내었다.

참고 문헌

- [1] 이동훈, 박재윤, 박상현, “자계를 이용한 질소 산화물의 제거 효과”, 대한전기학회 전문대학 위원회 학술발표, June 2002.
- [2] 이동훈, 박재윤, 이현수, “전자계-축매형 플라즈마 반응기의 질소 산화물 제거 특성”, 전기전자재료학회 논문지, June 2002.
- [3] 이동훈, 박재윤, 박상현, “고전압 방전에 의한 이산화탄소의 제거 특성”, 대한전기학회 추계 학술대회, Sep. 2002.
- [4] 이동훈 외 2명, “Ti-Si-Al형 세라믹 축매 방전관의 오존 발생 특성 연구”, 조명전기설비학회 논문지, 6호, 제 16권, pp. 130-136, 2002.
- [5] 이동훈, 박홍재, 박재윤, 박상현, “수중 직접 방전 전극의 최적 전극형상설계”, 대한전기학회 춘계학술 대회, pp. 60-63, April. 2003.
- [6] 김용호, 홍상희, “교류 유전체장벽 코로나 방전을 이용한 NOx/SOx 분해 실험”, 한국물리학회지 응용 물리 11호, pp. 393-400, 1998.
- [7] 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.
- [8] 정병석, 신동석, 윤성희, 김병호, “MOD법에 의한 강유전성 SrBiTaO(SBT)박막제조 및 후열처리효과의 연구”, 전기전자재료학회 논문지, 3호, 제 11권, pp. 2296-2300, 1998.
- [9] 남효덕, 우동찬, “BaTiO₃ 세라믹스의 절연 파괴 거동에 미치는 기공의 크기와 기공율의 영향”, 전기전자재료학회 논문지, 3호, 제 10권, pp. 1896-1900, 1997.
- [10] 김진규, “유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해수 발생 특성”, 조명전기설비학회 논문지, vol. 16, no. 4, pp. 46-54, July 2002.
- [11] 박재윤 외 2명, “비 플라즈마를 이용한 CF₄ 분해에 미치는 혼합가스의 영향”, 전기전자재료학회 논문지, 6호, 제 15권, pp. 543-550. 1896, 2002.
- [12] 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)