

## The Simulation of Electric Field Distribution for Globular Dielectric in the Atmosphere

李東勳\* · 朴在潤\*\* · 朴洪在\*\*\* · 高義石<sup>§</sup>

(Dong-Hoon Lee · Jae-Youn Park · Hong-Jae Park · Hee-Seog Koh)

**Abstract** - This paper was shown the simulation of electric field distribution of globular dielectric for design of ideal packed-bed plasma reactor. When discharge gap between the electrodes and input voltage are each 20[mm], 10000[V] in the atmosphere, the results of simulation to the electric field was measured stronger at globular dielectric of  $\varnothing 5$ [mm] than  $1\varnothing$ [mm] and  $3.33\varnothing$ [mm]. And the maximum electric field of globular dielectric with  $\varnothing 10$ [mm] was increased about 5[%] to maximum electric field of globular dielectric with  $\varnothing 5$ [mm] in the atmosphere. when dielectric constant of globular dielectric is 100, it was simulated about 90[%] of maximum electric field of globular dielectric over 1000 dielectric constant. And the highest electric field appeared as globular electric was parallel structure with the other globular dielectric side by side of the globular dielectric and connected to electrodes.

**Key Words** : Ozone, Silent Discharge, Ceramic, Dielectric.

### 1. 서론

현대 사회는 급속한 산업 발달과 인구 증가 및 도시화로 대기 및 수질오염이 각 나라들만의 문제에서 국경을 초월하는 국가간의 환경 문제로 부각되고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 환경 연구소와 단체들이 노력 중에 있다. 특히, 수질 및 대기 환경의 개선을 위해 더 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다. 하지만 현재 너무나 다양한 분야에서 다량의 오염 물질이 배출되고 있어, 이를 해결하는 데에는 많은 기술과 시간이 요구되고 있다. 이 오염원들 중에서 반도체 가공에 사용되는 CFC 계열의 지구 온난화 원인 물질과 연소나 소각 과정에서 발생하는 발암 물질인 다이옥신 그리고 페인트 등에 다량으로 함유되어 있는 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 난분해성 유해 가스 및 화학 폐수, 가정 하수, 축산 폐수, 농약 등의 수질 오염원은 심각한 실정이다.<sup>[1]~[3]</sup> 이러한 환경 오염원을 처리하는 방법으로는 화학 약품을 투입하는 방법과 고전압 방전과 침전 등의 전기 물리적인 방법, 미생물을 이용하는 생물학적 방법 등 다양한 오염원을 여러 가지 방법을 이용해 처리하고 있다.<sup>[4]~[8]</sup> 이러한 방법들 중에서 유전체 방전을 이용하는 방법은 현재 오존 발생, 물을 산성 또는 알카리수로의 변환, 난분해성 유해 가스 처리, 수중 세균 처리 등에 다양한 분야에 사용되고 있으며, 이러한 유전체를 이용한 고전압 방전의 다양한 변수에 대한 최적 조건을 도출하기 위해 상용 전자계 해석 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 분석하였으며, 다양한 변수에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최적의 유전체 방전 조건을 도출하였다.<sup>[9]~[11]</sup>

### 2. 시뮬레이션

#### 2.1 형상의 설계 및 초기 전위 분포 해석

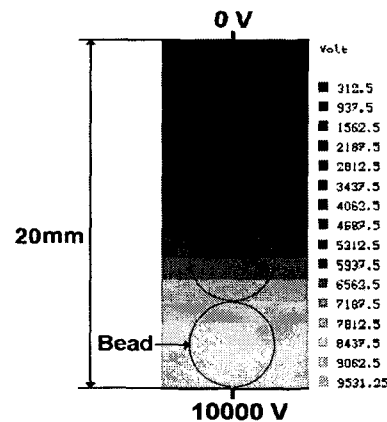


그림 1 시뮬레이션의 형상 및 초기 전위 분포  
Fig. 1 Simulation shape and initial potential distribution

그림 1은 대기압 조건에서 유전체를 이용한 방전 시험을 모의한 것으로 상부와 하부 즉, 방전 전극 사이의 거리는 20 [mm]로 하고, 그 사이에 다양한 유전율을 가지는  $\varnothing 5$ [mm] 유전체구를 인가한 경우이다. 그리고 유전체구는  $\varnothing 1$ [mm]의 구를 20개 직렬 형태로 인가하거나 약  $\varnothing 3.33$ [mm]의 유전체구를 6개 직렬 형태로도 인가하여 시뮬레이션을 할 수 있다. 그림 1의 전위 분포 해석 결과는 그림에는 유전체구가 도시는 되어 있으나 실제에는 유전체가 없는 경우로서, 대기압 상태에 상부와 하부 전극에 10000[V]의 전위차를 인가할 경우의 전극 사이의 전위 분포를 해석한 것이다. 해석 결과 전극 형상이 평판 전극인 관계로 평등 전계에 의해 전위 분포도 평행의 평등 전위 분포를 나타내고 있다. 이상의 기본적인

\* 準會員 : 慶南大學 電氣工學科 博士課程  
 \*\* 正會員 : 慶南大學 電氣工學科 教授 · 工博  
 \*\*\* 準會員 : 慶南大學 電氣工學科 碩士課程  
 § 正會員 : 慶南大學 電氣工學科 教授 · 工博  
 接受日字 : 2003年 4月 4日  
 最終完了 : 2003年 5月 28日

평등 전위 분포 특성 결과를 바탕으로 전극 내부의 구조적 형상, 다양한 유전율을 가지는 유전체구 그리고 유전체구의 층간 구조에 대한 전계 및 전위 분포 특성을 상호 비교하여 유전체구를 이용한 최적 방전 형상의 조건을 도출하였다.

### 2.2 유전체구의 유전 분극 특성

유전체 분극에서 일반적인 유전 분극의 세기는 두 점전하가 가지는 대전 전하량의 전계 강도( $V/m$ )의 특성에 의존한다. 이러한 특성은 쿨롱의 법칙과 이 법칙과 관련된 전계( $E$ )와 전하량( $Q$ ) 그리고 정전용량( $C$ )과 관련된 수식들에 의해 설명할 수 있다. 즉 그림 1과 같이 전극에 인가된 전압에 의해 대전된 직렬의 다중 점전하의 특성을 아래의 수식들을 이용하여 설명할 수 있다. 수식 (2.1)은 쿨롱의 법칙으로 두 점전하  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 대전 전하량의 크기와 성질에 따라 두 점전하의 상호 힘의 관계 즉, 인력과 척력이 결정되는 것을 의미하는 수식이고, 수식 (2.2)는 단일 점전하의 전계 강도를 나타내는 수식이며, 수식 (2.3)은 기본적으로 점전하의 대전 전하량의 경우 콘덴서의 인가전압과 콘덴서의 용량에 비례하고 있음의 나타내고 있다. 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 전극 면적( $s$ )과 반비례 상수인 거리( $d$ )로 구성된다. 그리고 이와 같은 기본 조건들에 의해 대칭형 전극에서의 유전체구의 유전 분극 특성을 설명할 수 있다.

그림 1의 형상의 경우, 대전 전하의 유전 분극에 의한 전계 강도는 인가 전압에 정비례하는 특징이 있다. 그러나 유전체구의 크기가 변화하면 전극과 유전체구 또는 유전체구 상호간에 마주보는 면적( $s$ )과 거리( $d$ )가 가변적이 되고, 그로 인해 전계 강도( $V/m$ )가 유전체 구의 크기에 대해 일정한 비례 관계를 가지지는 않는 특징이 있다. 그리고 이와 같은 유전체구의 형상적 특징으로 인해 수식 (2.4)와 같이 비유전율( $\epsilon_r$ )에 대해 전계 강도( $V/m$ ) 또한 일정한 상수에 따른 비례 관계식으로 나타내기 힘들며, 이에 대한 설명은 3장의 전계 시뮬레이션 결과들의 비교 분석을 통해 이해할 수 있다. 그리고 시뮬레이션 결과를 살펴보면 전극 양단에 전압을 인가할 경우, 전극에 접촉되어 있는 유전체구에는 전극면의 전하와 반대의 성질을 가지는 전하들이 모이고, 이 유전체구의 반대쪽에는 이와 동일한 양(量)의 반대 성질의 전하가 유전체구에 대전되게 된다. 이러한 전하가 직렬로 겹쳐 있으면 앞서 설명한 형태와 동일 대전 형태로 반복적으로 나타나는 특징을 보이게 된다. 이 때 유전체구와 유전체구 사이 또는 전극과 유전체구의 접점 부근에서 앞서 설명한 복합적인 이유들에 의해 강한 점전계가 형성된다. 그리고 이와 같은 점전계의 세기는 유전체구의 물리적인 성질의 하나인 비유전율의 크기와 밀접한 관련을 가짐을 알 수 있다.

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

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

$$E = K \frac{Q}{R^2} \tag{2.2}$$

$$Q = CV \tag{2.3}$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{s}{d} \tag{2.4}$$

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

#### 3.1 $\phi 1[mm]$ 유전체구의 유전 분극 특성 해석

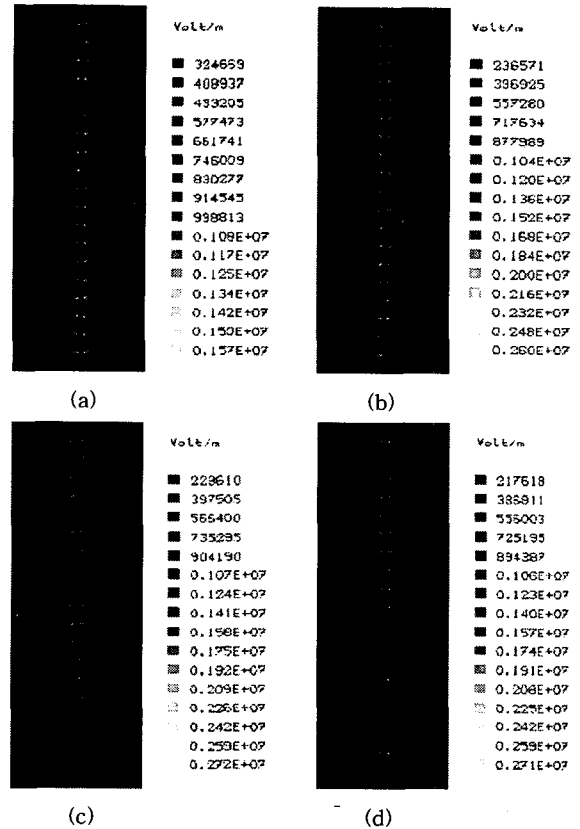


그림 2  $\phi 1[mm]$  직렬 유전체구 20개의 전계 분포 특성 비유전율( $\epsilon_r$ ) (a) : 5, (b) : 100, (c) : 1000, (d) : 5000

Fig. 2 The characteristic of electric field distribution of series 20 units globular dielectric with  $\phi 1[mm]$ . Relative dielectric constant (a) : 5, (b) : 100, (c) : 1000, (d) : 5000

그림 2는  $\phi 1[mm]$  직렬 유전체구 20개의 전계 분포를 해석한 것이다. 최대 전계는 그림 2에서 밝게 표시되는 지점으로, 두 유전체구가 만나는 지점과 전극과 유전체구가 만나는 지점이다. 비유전율이 5인 (a) 경우 최대 전계는 15.7[kV/cm], 비유전율이 100인 (b) 경우 최대 전계는 26.0[kV/cm], 비유전율이 1000인 (c) 경우 최대 전계는 27.2[kV/cm], 비유전율이 5000인 (d) 경우 최대 전계는 27.1[kV/cm]을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 유전체구  $\phi 1[mm]$ 에서 4종류의 유전율에 대한 최대 전계가 비유전율 100이상에서 거의 포화되려는 경향을 보여주는 특징이 있다.

### 3.2 $\varnothing 3.33[\text{mm}]$ 유전체구의 유전 분극 특성 해석

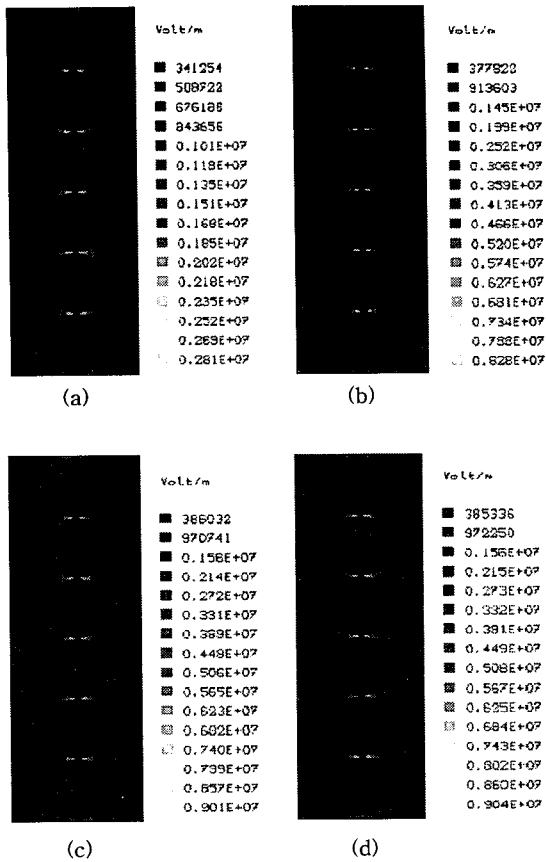


그림 3  $\varnothing 3.33[\text{mm}]$  직렬 유전체구 20개의 전계 분포 특성

비유전율( $\epsilon_r$ ) (a) : 5, (b) : 100, (c) : 1000, (d) : 5000

Fig. 3 The characteristic of electric field distribution of series 20 units globular dielectric with  $\varnothing 3.33[\text{mm}]$ .

Relative dielectric constant

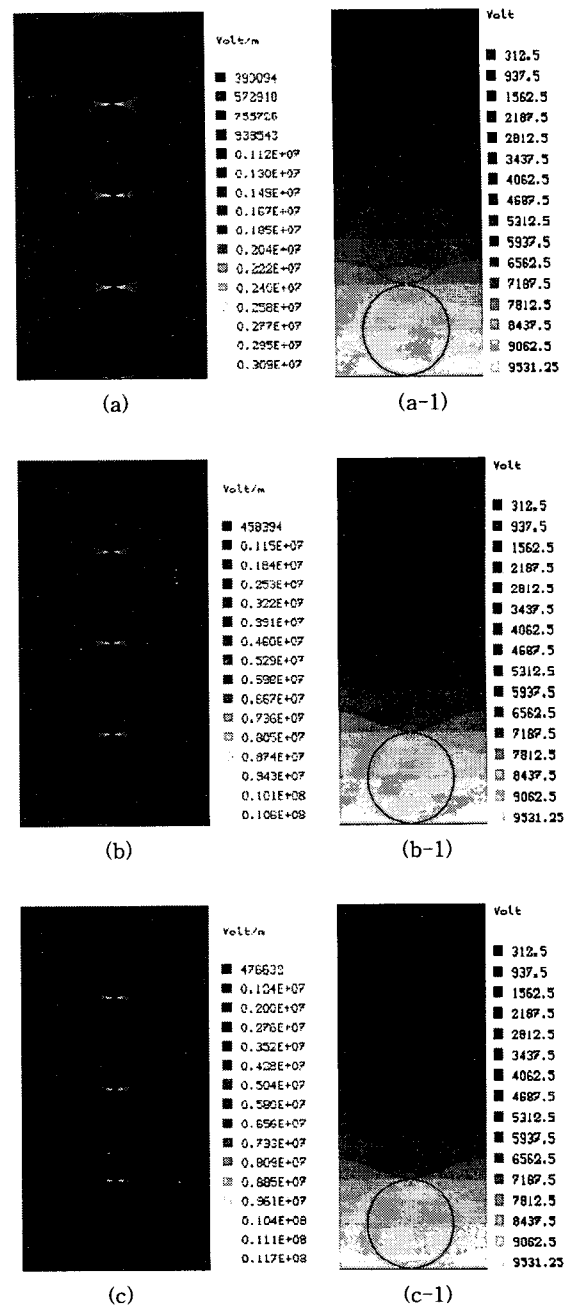
(a) : 5, (b) : 100, (c) : 1000, (d) : 5000

그림 3은  $\varnothing 3.33[\text{mm}]$  직렬 유전체구 6개의 전계 분포를 해석한 것으로 최대 전계 지점은 앞서 밝힌 그림 2의 경우와 같으며, 비유전율이 5인 (a)경우 최대 전계는 28.1[kV/cm], 비유전율이 100인 (b)경우 최대 전계는 82.8[kV/cm], 비유전율이 1000인 (c)경우 최대 전계는 90.1[kV/cm], 비유전율이 5000인 (d)경우 최대 전계는 90.4[kV/cm]를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 유전체구  $\varnothing 3.33[\text{mm}]$ 에서 4종류의 유전율에 대한 최대 전계는 그림 2의 결과와 유사하게 비유전율 100이상에서 거의 포화되려는 경향을 보여주는 특징이 있다.

### 3.3 $\varnothing 5[\text{mm}]$ 유전체구의 유전 분극 특성

그림 4는  $\varnothing 5[\text{mm}]$  직렬 유전체구 4개의 전계 분포를 해석한 것으로 최대 전계 지점은 앞서 밝힌 그림 2의 경우와 같으며, 비유전율이 5인 (a)경우 최대 전계는 30.9[kV/cm], 비유전율이 100인 (b)경우 최대 전계는 106[kV/cm], 비유전율이 1000인 (c)경우 최대 전계는 117[kV/cm], 비유전율이 5000인 (d)경우 최대 전계는 123[kV/cm]를 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과 유전체구  $\varnothing 5[\text{mm}]$ 에서 4종류의 유전율에 대한 최대 전계는 그림 1의 결과와 유사하게 비유전율 100까지는 급하게 최대 전계가 증가하였고, 그 이상의 유전율에서 포화되는 특징을 보여주고 있다. 그리고  $\varnothing 10[\text{mm}]$  유전체구 2개의 시뮬레이션 결과,  $\varnothing 5[\text{mm}]$ 의 유전체구의 최대 전계값과 거의 유사한 수치를 나타내었으며, 평판 전극 형태에서 적층형 유전체구를 이용한 고전압 방전의 경우 유전체구의 크기는  $\varnothing 5[\text{mm}]$ 내외가 가장 적정한 크기라고 사료된다. 그리고 유전체의 비유전율 약 100정도에서 지구상에서 구할 수 있는 강유전체가 가지는 최대 전계의 약 90[%]정도는 얻을 수 있으므로 특정한 기능을 요구하는 장소 이외에서는 고가의 강유전체를 사용하지 않아도 됨을 알 수 있다.



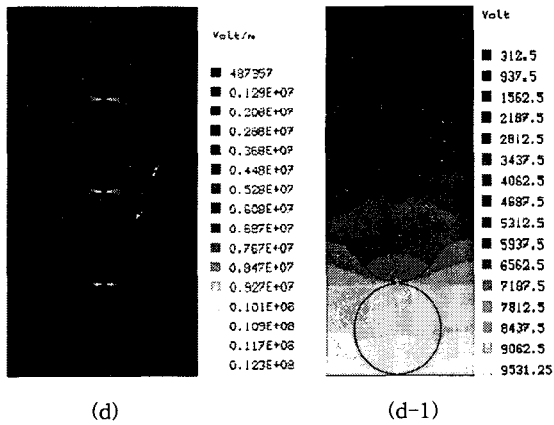


그림 4  $\varnothing 3.33[\text{mm}]$  직렬 유전체구 20개의 전계 분포 특성  
비유전율( $\epsilon_r$ ) (a) : 5, (b) : 100, (c) : 1000, (d) : 5000  
Fig. 4 The characteristic of electric field distribution of series 20 units globular dielectric with  $\varnothing 3.33[\text{mm}]$ . Relative dielectric constant (a) : 5, (b) : 100, (c) : 1000, (d) : 5000

3.4  $\varnothing 5[\text{mm}]$  유전체구 2개의 공간상의 유전 분극 특성

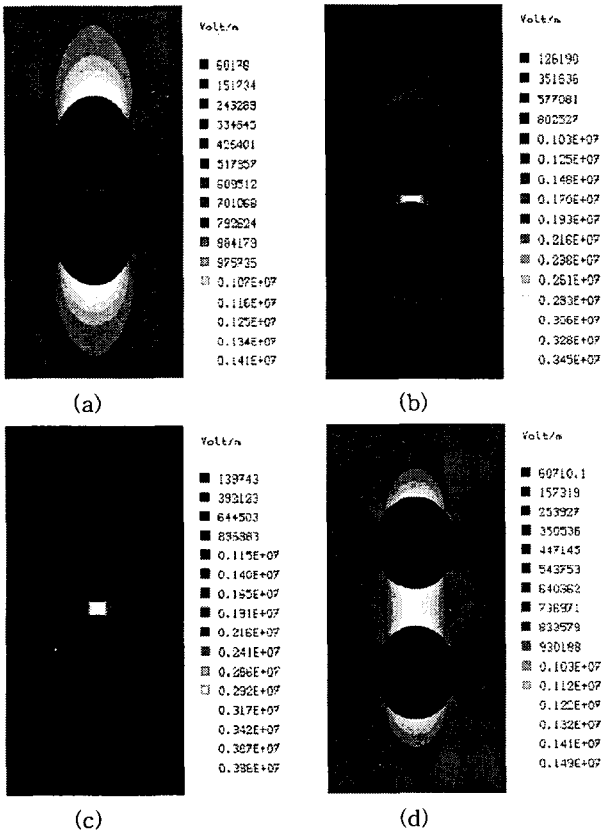


그림 5  $\epsilon_r 100, \varnothing 5[\text{mm}]$  유전체구 2개의 공간 전계 분포 특성  
(a) Gap 0.0[mm] (b) Gap 0.5[mm]  
(c) Gap 1.0[mm] (d) Gap 2.0[mm]  
Fig. 5 The characteristic of electric field distribution of 2 units globular dielectric with  $\varnothing 5[\text{mm}]$ ,  $\epsilon_r 100$   
(a) Gap 0.0[mm] (b) Gap 0.5[mm]  
(c) Gap 1.0[mm] (d) Gap 2.0[mm]

그림 5는 비유전율( $\epsilon_r$ )이 100인 2개의 유전체구가 공간상에 존재하는 경우의 전계 분포를 시뮬레이션한 것이다. (a)의 경우 유전체구간의 거리가 0.0[mm] (b)의 경우는 거리가 0.5[mm] (c)의 경우는 거리가 1.0[mm] (d)의 경우는 거리가 2.0[mm]인 경우이다. 4가지 경우를 앞의 그림 4의 (b)와 비교하면 최대 전계가, 약 65~85[%] 이상 감소하고 있음을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 유전체구를 이용한 고전압 방전에서 전반적인 방전 공간에서 고른 고전계의 발생을 위해서는 그림 4와 같이 유전체가 상하로 존재하면서 전극과 연결되는 형태를 이뤄야함을 알 수 있다.

3.5  $\varnothing 5[\text{mm}]$  유전체구 4개의 공간상의 유전 분극 특성

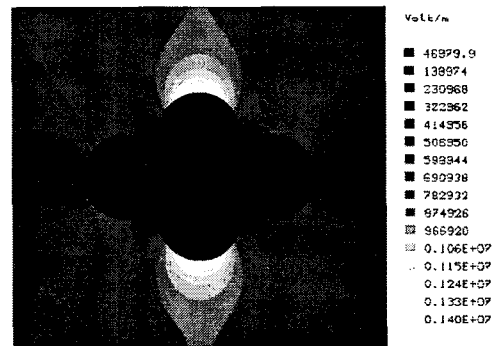


그림 6  $\epsilon_r 100, \varnothing 5[\text{mm}]$  유전체구 4개의 공간 전계 분포 특성  
Fig. 6 The characteristic of electric field distribution of 4 units globular dielectric with  $\varnothing 5[\text{mm}]$ ,  $\epsilon_r 100$

그림 6은 비유전율( $\epsilon_r$ )이 100인 4개의 유전체구가 공간상에서 상하로 2개가 연결되어 있고, 그 옆면에 2개의 유전체구가 밀착해 있는 경우에서의 전계 분포를 시뮬레이션한 것으로 좌우의 유전체구를 인가하면 유전체구와 유전체구의 접합부의 전계가 도리어 줄어들음을 알 수 있고, 전체적으로 앞의 그림 5의 (a)와 비교하면 최대 전계는 거의 비슷함을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과를 살펴보면 전극간의 강한 유전 분극을 유발하기 위해서는 유전체구의 위치는 좌우의 유전체와 동일한 높이에 평행 적층 구조가 이상적인 구조임을 예측할 수 있고, 결과적으로 보면 유전체구를 이용한 고전압 방전에서 전반적인 방전 공간에서 고전계를 발생하기 위해서는 그림 4와 같이 유전체가 상하로 존재하면서 동일 높이에 평행한 유전체구가 적층되는 형태가 이상적임을 알 수 있다.

3.6  $\varnothing 5[\text{mm}]$  유전체구의 실제 방전 사진

그림 7은  $\varnothing 5[\text{mm}]$  유전체구의 실제 방전 사진을 나타낸 것이다.  $\varnothing 5[\text{mm}]$ 의 크기에 비유전율( $\epsilon_r$ ) 5이내,  $\varnothing 5[\text{mm}]$ 의 크기인 유리구와 100 정도의 티탄 계열의 유전체를 이용하여 앞의 그림 4의 시뮬레이션의 조건 즉, 전극 사이의 방전 거리 20[mm], 유전체구의 크기  $\varnothing 5[\text{mm}]$ , 대기압의 조건에서 방전 특성을 실험한 사진이다. 유전율이 낮은 유리구의 경우 유전체구들간의 방전은 거의 보이지 않았고, 전극의 끝부분에서 고전압에 의한 대기 방전이 주로 일어났으며, 유전율이 100 정도인 티탄 계열의 유전체구의 경우에는 유전체구들 사이의 접점에서 강한 방전 현상이 일어남을 알 수 있었다.

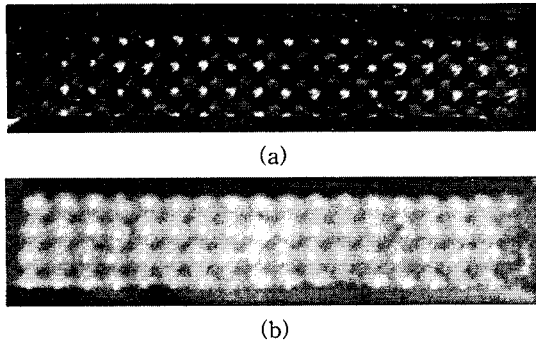


그림 7  $\varnothing 5$ [mm] 유전체구의 실제 방전 사진  
 (a) 유리구( $\epsilon_r$ ) 5, (b) Ti 계열의 구( $\epsilon_r$ ) 100  
**Fig. 7** Real discharge photo of globular dielectric with  $\varnothing 5$ [mm]  
 (a) Glass bead( $\epsilon_r$ ) 5, (b) Ti interrelated bead( $\epsilon_r$ )100

#### 4. 결 론

전극 사이의 방전 거리 20[mm], 전극 사이의 인가 전압 10000[V]에서 1 $\varnothing$ , 3.33 $\varnothing$ , 5 $\varnothing$ 의 크기에 다양한 유전율을 가지는 유전체구를 이용한 대기압 상태에서의 유전체구의 전계 시뮬레이션 결과, 유전체의 크기  $\varnothing 5$ [mm]에서 최대 전계가 나타났고, 그 이상 유전체구(10 $\varnothing$ [mm])의 크기에 대해서는 5% 이내의 미소한 전계 증가가 일어났으며, 유전체구의 비유전율( $\epsilon_r$ )이 100정도만 되더라도 유전체구의 비유전율( $\epsilon_r$ )이 1000 이상일 때 나타나는 최대 전계의 약 90[%]정도 올릴 수 있는 특징이 있었다. 그리고 유전체구의 최적의 분극 특성을 얻기 위해서는 유전체구의 위치는 좌우의 유전체와 동일한 높이에 평행 적층 구조가 이상적인 구조임을 실험과 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 이동훈, 박재운, 박상현, “자계를 이용한 질소 산화물의 제거 효과”, 대한전기학회 전문대학위원회 학술발표, June 2002.
- [2] 이동훈, 박재운, 이현수, “전자계-촉매형 플라즈마 반응기의 질소 산화물 제거 특성”, 전기전자재료학회 논문지, June 2002.
- [3] 이동훈, 박재운, 박상현, “고전압 방전에 의한 이산화탄소의 제거 특성”, 대한전기학회 추계학술대회, Sep. 2002.
- [4] 이동훈, 조국희, “Ti-SiI-Al형 세라믹 촉매 방전관의 오존발생특성 연구”, 조명전기설비학회 논문지, 6호, 제 16권, pp. 130-136, 2002.
- [5] 이동훈, 박홍재, 박재운, “수중 직접 방전 전극의 최적 전극 형상 설계”, 대한전기학회 고전압 방전 응용 연구회 춘계학술대회, pp. 60-63, April. 2003.
- [6] 이동훈, 박홍재, 박재운, “유전체비드를 이용한 수중 방전의 전계 분포특성평가”, 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 15-18, May. 2003.
- [7] 이동훈, 박홍재, 박재운, “대기중에서 구형 유전체 펠렛의 전계분포 특성평가”, 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 57-60, May. 2003.
- [8] 이동훈, 박재운, 이현수, “자석형 플라즈마 반응기의 자계 시뮬레이션과 질소산화물 제거”, 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, pp. 35-41, 2003.
- [9] 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)
- [10] 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, p. 1231, 1999.
- [11] 김진규, “유전체구 충전형 전극계의 코로나 방전과 강전해수 발생특성”, 조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, No. 4, pp. 46-54, July 2002.

### 저 자 소 개



**이 동 훈(李東勳)**  
 1972년 2월 24일생. 1996년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사 졸업. 현재 동 대학원 박사과정. (주)미래워터에어텍 대표.  
 Tel : (055) 241-3440, Fax : (055) 249-2839  
 E-mail : 2323444@hanmail.net



**박 재 운(朴在潤)**  
 1960년 4월 15일생. 1986년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 인하대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 현재 경남대학교 전기 전자공학부 교수.  
 Tel : (055) 249-2636, Fax : (055) 249-2839  
 E-mail : jypark@kyungnam.ac.kr



**박 홍 재(朴洪在)**  
 1976년 7월 14일생. 2002년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정. (주)미래워터에어텍 선임연구원.  
 Tel : (055) 241-3440, Fax : (055) 249-2839  
 E-mail : rusiper76@hotmail.net



**고 희 석(高熙石)**  
 1942년 8월 21일생. 1966년 부산대학교 전기공학 졸업. 1979년 동아대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 1985년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업. 현재 경남대학교 전기전자공학부 교수.  
 Tel : (055) 249-2628, Fax : (055) 249-2839  
 E-mail : powersys@kyungnam.ac.kr