

가스절연 개폐장치에서 유전을 구배를 갖는 고체 절연물의 형상 최적화

주홍진¹, 김동규², 고광철^{1,a}

¹ 한양대학교 전기공학과

² 한양대학교 융합전자공학부

Shape Optimization of a Permittivity Graded Solid Insulator in a Gas Insulated Switchgear

Heugn-Jin Ju¹, Dong-Kyue Kim², and Kwang-Cheol Ko^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

² Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received April 4, 2012; Revised May 7, 2012; Accepted May 24, 2012)

Abstract: A functionally graded material (FGM) spacer, which the distribution of dielectric permittivity inside an insulator changes spatially, can considerably reduce the electric field concentration around a high-voltage electrode and along the gas-insulator interface when compared to a conventional spacer with a uniform permittivity distribution. In this research, we propose the FGM spacer with an elliptical permittivity distribution instead of that with a distribution of dielectric permittivity varying along a radial direction only in order to improve efficiently the insulation capability. The optimal design of the elliptical FGM spacer configuration is performed by using the response surface methodology (RSM) combined with the steepest descent method (SDM).

Keywords: Functionally graded material spacer, Elliptical permittivity distribution, Optimal design, Response surface methodology, Steepest descent method

1. 서론

가스절연 개폐장치 (gas insulated switchgear, GIS)에 절연매질로 사용되는 SF₆ 가스는 절연 및 소화성능이 우수하고, 회복특성이 빠르므로 초고압기기의 절연매질로 널리 이용되고 있으나, 불평등 전계에서 절연내력이 급격히 감소하는 높은 전계의존성을 가지므로 설계 단계에서부터 주의를 요하게 된다. 또한 높은 온난화 계수로 인해 온실효과를 야기할 수 있으므로 가압 건조공기 (dry air), 질소 (N₂) 등의 대

체 절연매질이 검토되고 있다 [1,2]. 그러나 이러한 매질의 절연성능은 동일 가스 압력에서 SF₆ 가스의 30-40% 정도로 열등하므로 기기의 절연 성능 확보를 위해 기기 내부에 분포하는 전계 집중을 완화할 수 있는 최적의 형상설계가 우선 고려되어야 한다 [3]. 특히 GIS 내부의 스페이서의 절연성능 향상을 위해 기존에 이용된 방법은 스페이서를 설계할 때 유연성을 제한하고, 구조를 복잡하게 만들어 제조비용을 증가시키는 단점이 있다.

따라서 이러한 한계를 극복하고, 스페이서의 구조를 간단하게 유지시키며, 절연성능을 향상시키기 위

해 FGM 스페이스를 제안한다. 기능성 경사 재료 (functionally graded material, FGM)는 재료의 한쪽 방향에서 다른 쪽 방향에 걸쳐 물성이 다른 두 가지 또는 그 이상의 구성성분의 분포를 연속적 또는 불연속적으로 변화시킴으로써 성질을 경사화한 재료로써, 여러 분야의 극한 환경에서 이용되고 있다 [4,5]. 특히 절연 소재로써의 FGM은 절연체 내부의 유전율 분포를 공간적으로 변화시킨 것으로, 전계가 집중되는 부분에 경사함수의 변화를 통해 유전율 분포를 제어하여 특정부분의 전계를 완화시킬 수 있으며, 전기 재료의 방향비 (aspect ratio)를 제어하여 기계적 강도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다 [6,7].

본 연구에서는 GIS의 절연성능을 효율적으로 향상시키기 위해 그동안 주로 연구되어왔던 단일 방향으로의 선형적인 유전율 변화 대신, 타원형 형태의 유전율 분포를 가지는 FGM 스페이스 모델을 이용하여, 스페이스 형상의 최적 설계를 수행하였다. 이러한 형태의 유전율 분포는 선형분포에 비해 최대 전계를 더 효율적으로 감소시킬 수 있다. 또한 최적화 기법으로 최대경사법 (steepest descent method, SDM)과 반응표면법 (response surface method, RSM)을 이용하였다. 즉, 먼저 넓은 설계 범위에서 SDM이 수행되어 각 설계 변수의 변동에 따라 적절한 응답을 고려하여 효과적인 설계범위가 계산되었고, 이를 이용하여 좁은 설계 범위에서 RSM을 수행하여 최적조건을 구하였다.

2. 실험 방법

2.1 해석모델 및 설계변수

2.1.1 해석모델 및 FGM 설계변수

본 연구에서는 (주)엘렉콤의 상용 C-GIS 모델을 기초로 스페이스 형상의 최적설계를 수행하였다. GIS의 중심부는 고압측 영역으로 정격 충격 내전압 100% kV를 인가하였으며, 외측 영역은 접지시켰다. 또한 외측의 음극 삼중점 영역은 전계집중이 발생하는 영역이므로 이를 완화하기 위해 그 부근의 음극 형상은 라운드 처리하였다.

그림 1에는 본 연구에서 해석할 모델에 대한 유한요소 분할도 및 FGM 스페이스 모델의 유전율 분포를 나타내었다. 특히, FGM 스페이스의 경우, 예폭시

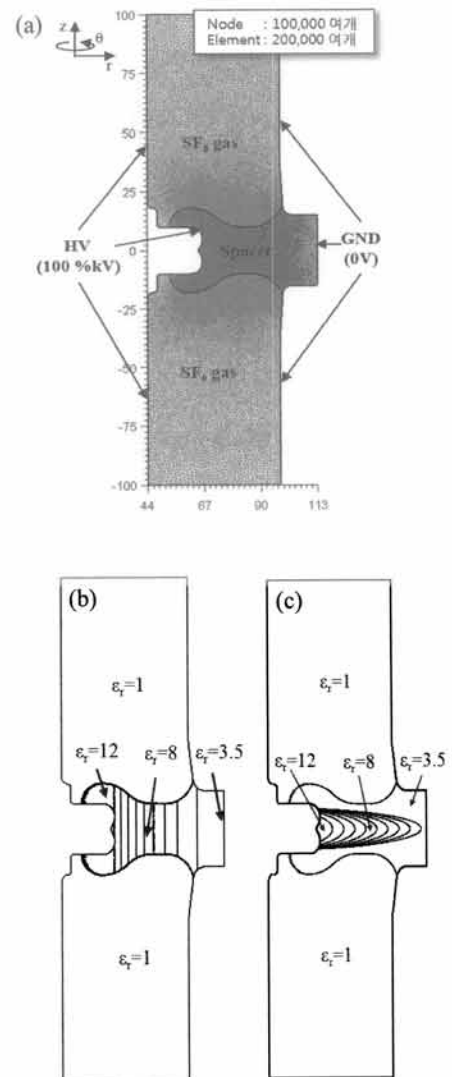


Fig. 1. (a) Finite element discretization of our analytic model and the distribution of dielectric permittivity inside the spacer (b) r-FGM spacer, (c) elliptical FGM spacer.

수지 ($\epsilon_r = 3.5$)로 구성된 실제 스페이스 재료에 충전제로써 이산화티타늄 ($\epsilon_r = 114$)을 이용하여 스페이스 내부의 유전율이 12.0에서 3.5까지 연속적으로 변한다고 가정하였다. 또한 그림 1(c)에서와 같이 스페이스 내부의 공간적인 유전율 분포가 타원형(양방향) 형태를 갖도록 제안하였는데, 이는 기존 [8]의 r-방향 (단방향) 유전율 분포를 갖는 FGM 스페이스에 비해 양극부근 및 스페이스 형상의 변곡부근에서 발생하는 높은 전계집중을 동시에 완화시킬 수 있으므로, 절연 성능의 개선에 더 효율적이다.

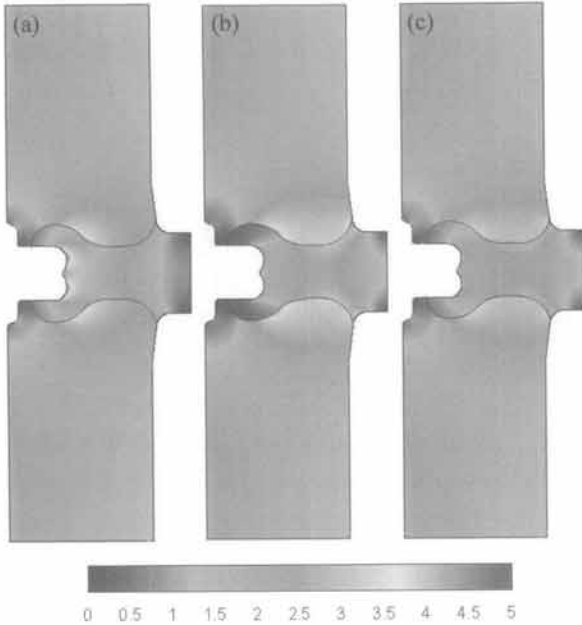


Fig. 2. Electric field distributions. (Max. E-field, E_m (kV/mm): (a) uniform spacer - 4.94011, (b) r-FGM spacer - 4.30550, (c) elliptical FGM spacer - 3.80390).

그림 2에는 3차원 축대칭 유한요소법을 이용하여 균일 유전율($\epsilon_r = 3.5$) 스페이서, r-방향 및 타원형 FGM 스페이서 모델에서의 전계분포를 나타내었다. 균일 유전율 스페이서 모델에서 발생하는 양극 부근의 전계 집중이 FGM 스페이서 모델을 사용할 때 현저히 감소되며, 특히 타원형 FGM 스페이서 모델을 적용했을 때, 고체 절연물과 가스의 주요한 접촉면인 스페이서 형상의 변곡 지점에서의 전계도 동시에 완화됨을 확인할 수 있다. 그러나 FGM 스페이서 모델에서는 음극의 삼중점 부근에서 작은 전계 집중이 새롭게 발생되는데, 이는 FGM 스페이서에서 양극 부근에는 높은 유전율을, 음극 부근에는 낮은 유전율을 갖도록 유전율을 분포시켰기 때문이다.

2.1.2 설계변수 설정

본 연구의 목적은 GIS의 절연성능을 향상시키기 위해 스페이서 형상에 대한 최적설계를 수행하는 것으로서, 최적화 기법을 적용하기 전에 반응값과 설계변수를 설정해야 한다. 반응값은 최대 전계로 설정했으며, 반응값에 영향을 줄 수 있는 인자인 설계변수는 그림 3에 보이는 것처럼 스페이서 형상에서 전

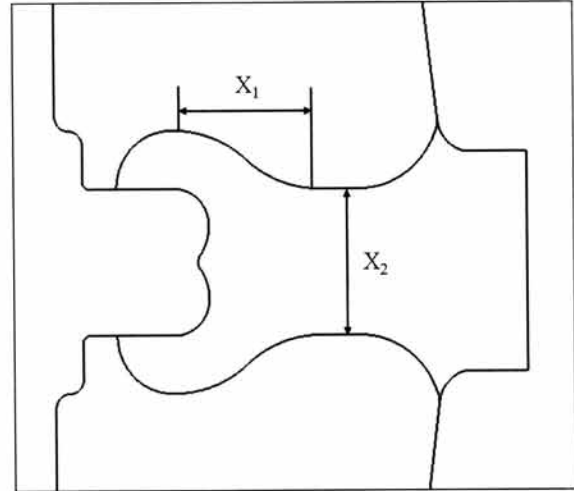


Fig. 3. Design variables for optimizing the spacer configuration.

계의 크기에 큰 영향을 미칠 수 있는 두 가지 인자, 즉, 스페이서 형상의 변곡부분의 거리 (X_1) 및 스페이서 형상의 두 오목한 부분사이의 거리 (X_2)로 설정하였다. 특히 FGM 스페이서 모델에서는 스페이서 형상의 변곡 지점에서 최대 전계가 발생되므로, 이 부근의 전계완화를 위해 스페이서 형상의 변동에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 두 설계변수를 선택하였다.

2.2 최적화 기법

2.2.1 최대경사법

본 연구에서 사용된 최대경사법은 반응의 최대/최소 경로를 따라 일련의 실험을 통해 인자들의 최적수준을 찾아가는 실험계획의 일종으로 다음과 같은 절차에 따라 수행된다 [9,10]. 먼저 설계인자 (X_1, X_2, \dots, X_k)의 수준을 선형변환된 변수(x_1, x_2, \dots, x_k)의 관심영역이 $-1 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, k$ 가 되도록 한다. 이때 선형변환의 일반식은 다음과 같다.

$$x_i = \frac{X_i - (X_{iH} + X_{iL})/2}{(X_{iH} - X_{iL})/2} \tag{1}$$

여기서 X_{iH} 및 X_{iL} 은 각각 설계변수 X_i 의 상위 수준 및 하위 수준이다. 다음으로 인자 x_1, x_2, \dots, x_k 에 대한 2^k 부분요인실험을 수행하여 1차 회귀모형

$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i$ 를 구한다. 1차 회귀모형에서 계산된 기울기 β_i 로부터 중심점에서 시작하여 반응값을 가장 빠르게 증가/감소시킬 수 있는 최대경사방향 (path of steepest ascent/descent)을 구하면

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_i} = \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \tag{2}$$

로 되어, 최대 경사방향에서의 x_i 의 변화는 β_i 에 비례한다. 최대경사방향으로 중심점을 옮긴 후 다시 위의 과정을 반복한다. 이와 같이 몇 차례의 반복실험을 수행한 후 1차 회귀방정식의 기울기 β_i 가 모두 작을 때, 반응표면이 평탄한 지역에 도달했다고 할 수 있으며, 이 근처에서 최고/최저점이 존재한다. 이후 곡면을 적합시킬 수 있는 실험계획법 (반응표면법)을 사용하여 2차 회귀모형을 통해 최적의 조건을 구할 수 있다.

2.2.2 반응표면법

최근 전기기기 설계에 있어 효과적인 최적화 방법으로 주목 받고 있는 RSM은 여러 설계변수가 복합적으로 작용하여 어떠한 시스템의 응답을 형성할 때, 이들의 관계를 근사다항식의 형태로 만든 뒤, 이를 이용하여 최적화를 수행하는 방법으로 설계변수 x_1, x_2, \dots, x_k 가 어떤 반응변수 y 에 영향을 미칠 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 실험을 통해서 얻어진 반응값은 어느 정도의 근사 오차로 인해 실제 응답과는 다르며 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \tag{3}$$

여기서 y 는 k 개의 설계변수를 가지는 실제 응답 함수이며, ϵ 은 응답에 대한 오차항이다. 실제 응답 함수는 테일러급수 전개를 이용하여 2차의 다항식 형태로 나타낼 수 있고, 반응표면은 다음처럼 표현된다 [9].

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{4}$$

여기서 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 설계인자, β 는 회귀계

수이다. 따라서 식 (4)의 근사함수로부터 k 개의 실제 관측한 자료에서 추정된 출력값 y 는 행렬의 형태로서 식 (5)로 정리된다.

$$Y = X\beta + \epsilon \tag{5}$$

여기서 X 는 설계인자의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차벡터이다. 식(5)에서 회귀계수 벡터는 오차벡터의 자승의 합이 최소가 되는 최소자승법을 통해 추정될 수 있다.

본 연구에서는 2차 근사 모델을 중심합성계획 (central composite design, CCD)을 이용하여 결정하였다 [9]. CCD는 $2^k + 2k + 1$ 개의 실험점이 요구되는데, 2^k 은 보통 $-1, +1$ 과 같은 코드화된 값을 가지며, $2k$ 는 각 설계변수의 중심에서 두 개의 축점까지의 거리로써 일반적으로 $\sqrt[4]{2^k}$ 으로 선정한다. 또한 1은 중심점을 나타낸다.

반응표면 모델이 설정되면 이 모델의 정확성을 분석하는 과정인 분산분석이 필요하며, 본 연구에서는 결정계수 *adjusted R²*이 이용되었다 [9]. 이 값은 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 높은 근사화가 이루어졌음을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 SDM과 결합된 RSM을 이용하여 타원형 FGM 스페이서 형상의 최적화를 수행하였다. 먼저, 각 설계 변수의 효과적인 범위를 구하기 위해 넓은 설계영역에서 부분요인실험에 기반을 둔 SDM을 적용하였다. 표 1은 각 설계변수의 변화에 따른 최대전계 값을 조사하기 위한 2² 부분요인실험의 실험계획표 및 결과를 나타낸 것이다. 이 데이터를 이용하여 1차 회귀모형을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{Y} = 4.79933 - 0.010061X_1 - 0.038877X_2 \tag{6}$$

여기서 X_1 및 X_2 의 계수가 모두 음수이므로 반응값 \hat{Y} 는 두 변수값이 증가할수록 감소한다. X_2 의 변화율을 0.2 mm로 가정할 때, X_1 의 변화율은 0.05175 mm에 해당한다.

$$\Delta X_1 = \frac{0.010061}{0.038877} \times \Delta X_2 (= 0.2) = 0.05175 \tag{7}$$

Table 1. Sequence of experiments performed in design I.

Design I	X_1 (mm)	X_2 (mm)	E_m (kV/mm)
Process 1 : 2^2 Factorial Design			
	19.0 (-1)	18.0 (-1)	3.923192
	23.0 (+1)	18.0 (-1)	3.853328
	19.0 (-1)	22.0 (+1)	3.738064
	23.0 (+1)	22.0 (+1)	3.727440
	21.0 (0)	20.0 (0)	3.803912
Process 2 : Steepest descent method			
Base	23.0	22.0	
Δ_i	0.05175	0.2	
Base+ Δ_i	23.05175	22.2	3.715966
Base+2 Δ_i	23.10350	22.4	3.712203
Base+3 Δ_i	23.15525	22.6	3.708343
Base+4 Δ_i	23.20700	22.8	3.725502

최대경사방향에 대한 첫 번째 점은 표 1에서처럼 최소 반응값을 갖는 좌표 $(X_1, X_2) = (23.05175, 22.2)$ 에서 시작한다. 이 점에서 반응값 (최대전계)의 감소가 예상되는지를 확인하기 위해 설계 중심에서의 반응값과 차이를 계산해보면, 즉, $\hat{Y}(23.05175, 22.2) - \hat{Y}(21.0, 22.0) = -0.089746$ 으로 이 값이 음수이기 때문에 새로운 실험점에서의 전계가 감소됨을 확인할 수 있으며, 이 방향으로 일련의 실험들을 추가적으로 수행하면 더 낮은 반응값이 발생될 것으로 예상된다. 따라서 추가적인 실험들이 변수의 증분이 $2\Delta_i, 3\Delta_i, 4\Delta_i (i = 1, 2)$ 에 해당하는 점들에서 최대경사방향을 따라 수행된다. 일련의 실험을 통해 계산된 반응값이 $3\Delta_i$ 의 증분까지는 감소하다가 $4\Delta_i$ 에서 증가하므로 이 이후의 추가적인 실험은 무의미하고, base+ $3\Delta_i$ 의 실험점이 새로운 설계과정의 중심점으로 선택된다.

표 2는 새로운 설계의 중심점을 이용하여 2^2 부분요인실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 다시 이 데이터를 이용하여 1차 회귀모델을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{Y} = 3.76827 + 0.0071125X_1 - 0.0095625X_2 \quad (8)$$

여기서 X_1 의 계수는 양수, X_2 의 계수가 음수이므로 X_1 의 감소 및 X_2 가 증가할수록 반응값 \hat{Y} 는 감소한다. 따라서 X_1 의 음의 변화율을 0.025 mm로 가정하면,

Table 2. Sequence of experiments performed in design II.

Design II	X_1 (mm)	X_2 (mm)	E_m (kV/mm)
Process 1 : 2^2 Factorial Design			
	22.155(-1)	21.6(-1)	3.718360
	24.155(+1)	21.6(-1)	3.734448
	22.155(-1)	23.6(+1)	3.701120
	24.155(+1)	23.6(+1)	3.713464
	23.155(0)	22.6(0)	3.708320
Process 2 : Steepest descent method			
Base	22.155	23.6	
Δ_i	-0.025	0.0336	
Base+ Δ_i	22.13	23.6336	3.698079
Base+2 Δ_i	22.105	23.6672	3.697596
Base+3 Δ_i	22.08	23.7008	3.703583

Table 3. Design ranges for RSM.

Design variables	Levels of design variables of CCD ($\alpha=1.414$)				
	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
X_1 (mm)	21.681	21.805	22.105	22.405	22.529
X_2 (mm)	23.243	23.367	23.667	23.967	24.091

이때 X_2 의 변화율은 0.03625 mm에 해당한다.

$$\Delta X_2 = -\frac{0.0095625}{0.0071125} \times \Delta X_1 (= -0.25) = 0.0336 \quad (9)$$

위 과정과 동일한 방법을 적용하면, 반응값이 $2\Delta_i$ 의 증분까지 감소하다가 $3\Delta_i$ 에서 증가하므로 base+ $2\Delta_i$ 의 실험점을 CCD의 중심점으로 선택한다.

표 3에는 SDM 과정을 통해 결정된 설계변수의 중심점을 이용하여 RSM에 적용할 설계변수의 범위를 보인다. CCD를 통해 얻은 결과를 바탕으로 2개의 설계변수에 대한 2차 근사 다항식 모델은 다음과 같다.

$$\hat{Y} = 65.5706 - 0.4879X_1 - 4.7448X_2 + 0.01404X_1^2 + 0.1022X_2^2 - 0.0057X_1X_2 \quad (10)$$

이 최적화의 목적은 GIS에서 발생되는 최대전계를 최소화하는 것으로써 식 (10)에서 얻어진 반응값을 최소화시킴으로써 최적조건이 결정된다.

Table 4. Result comparisons at the optimal points.

		Optimal points (mm)		E_m (kV/mm)
		X_1	X_2	
Initial model	Non-FGM			4.940112
	FGM	21.0	20.0	3.803904
Optimal model	RSM	21.989	23.828	3.694960
	FEA			3.692656

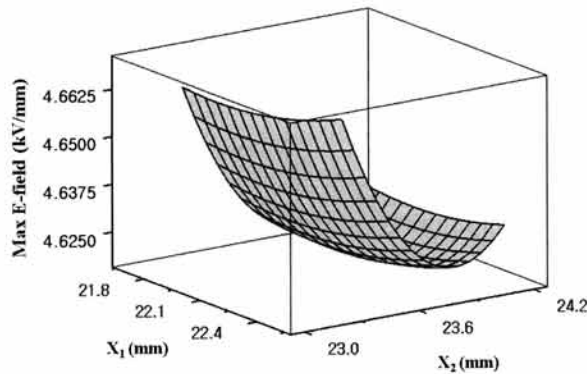


Fig. 4. Response surface.

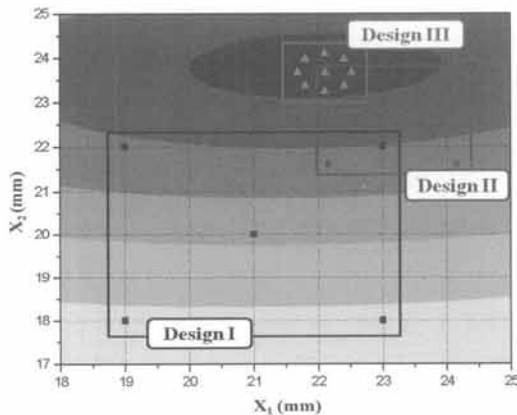


Fig. 5. Schematic sequence of experiment trials.

표 4에는 최적조건에서 근사모델과 FEM을 이용하여 얻어진 결과를 보인 것으로 두 값은 거의 일치한다. 추가적으로 근사모델에 대한 분산분석 결과, R^2 및 *adjust* R^2 은 각각 0.973 및 0.927로 비교적 높은 값을 보였다.

그림 4와 5는 각 설계변수의 변동에 대한 반응표면 및 일련의 실험설계 과정을 도식적으로 보인 것이다.

Table 5. Electric field intensities in each region.

	Electric field intensity (kV/mm)		
	Anode	Inflection point	Cathode
Uniform model	4.94011	4.08891	2.80290
ϵ_r -FGM model	2.48587	4.30548	4.02483
Elliptical FGM model	3.05306	3.80390	3.71777
Optimal model	3.19425	3.56121	3.69266

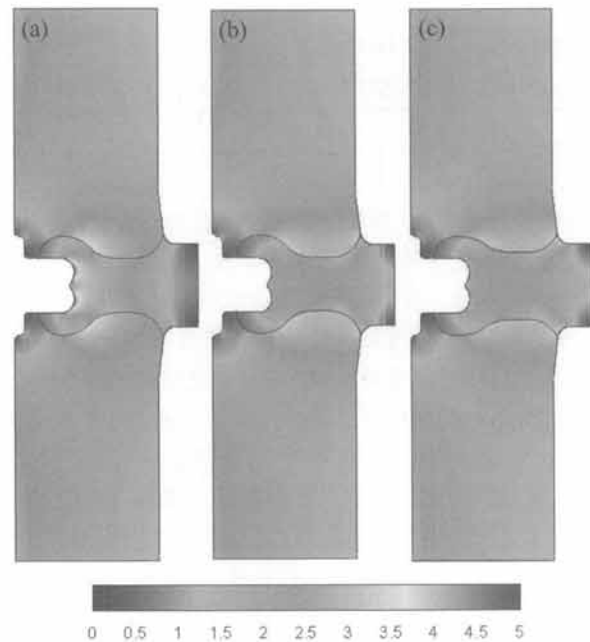


Fig. 6. Electric field distributions. (Max. E-field, E_m (kV/mm): (a) uniform spacer - 4.94011, (b) elliptical FGM spacer - 3.80390, (c) optimally designed FGM spacer - 3.69266).

표 5에는 해석모델의 각 주요 지점에서의 전계의 세기를 나타내었다.

그림 6은 초기 균일 유전율 스페이스 모델과 최적 FGM 스페이스 모델에서의 전계분포를 보인 것으로써, 최적화된 타원형 FGM 스페이스 모델에서는 초기 모델에 비해 약 25.3% 정도 최대 전계가 감소된다.

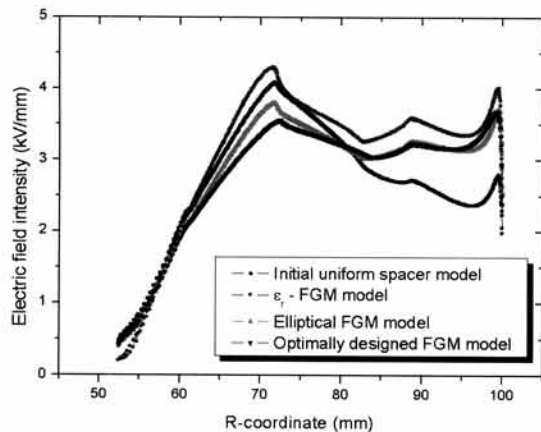


Fig. 7. Distributions of the electric field intensity along the surface of the spacer.

또한 그림 7을 통해 음극의 삼중점에서의 전계 상승에도 불구하고 최적으로 설계된 FGM 스페이서 모델에서 최대전계가 크게 감소되고, 스페이서 표면에서 전계가 균일하게 분포됨을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 FGM 스페이서 모델은 건조공기, N_2 및 다른 대체절연매질과 같은 친환경 가스에 의해 절연된 개폐장치에 효과적으로 적용될 수 있다.

4. 결론

개폐장치의 절연성능을 개선하기 위해 본 연구에서는 GIS의 전기절연물로 FGM 스페이서를 제안하였다. 특히 양극 부근의 높은 전계 집중 및 가스와 절연물의 접합부분, 즉, 스페이서 형상의 변곡점 부분의 전계를 감소시키기 위해 타원형 형태의 유전율 분포

를 갖는 FGM 스페이서 모델을 적용하였다. SDM과 결합된 RSM의 최적화 기법을 적용하여 최적의 FGM 스페이서 형상을 도출하였으며, 초기모델에 비해 최대전계를 크게 감소시킬 수 있었다. 결과적으로 개폐장치의 절연 성능은 전기절연물로 FGM 스페이서를 적용할 때, 효과적으로 개선시킬 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, F. Endo, and T. Oomori, *EE Japan*, 155, 9 (2006).
- [2] J. Sato, O. Sakaguchi, and M. Miyagawa, *Toshiba Report*, 5, 66 (2003).
- [3] S. K. Choi and K. H. Kim, *J. KIEEME*, 20, 374 (2007).
- [4] J. K. Wesel, *The Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs* (Wiley Interscience, 2004)
- [5] Y. Miyamoto, W. A. Kaysser, B. H. Rabin, A. Kawasaki, and R. G. Ford, *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*, (Kluwer Academic Publishers, 1999).
- [6] M. Kurimoto, K. Kato, M. Hanai, Y. Hoshina, M. Takei, and H. Okubo, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 17, 256 (2010).
- [7] K. Kato, M. Kurimoto, H. Shumiya, H. Adachi, S. Sakuma, and H. Okubo, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 123, 362 (2006).
- [8] H. J. Ju, K. C. Ko, and S. K. Choi, *J. Korean Phys. Society*, 55, 1803 (2009).
- [9] A. I. Khuri and J. A. Cornell, *Response Surface Designs and Analyzes* (Marcel Dekker, New York, 1996).