

절연성능 향상을 위한 가스절연 개폐장치에서의 경사 기능성 재료 스페이스 및 전극 형상 연구

주흥진, 김봉석, 고광철
한양대학교

A Study on Functionally Graded Material Spacer and Electrodes Shape in Gas Insulated Switchgear for the Improvement of Insulation Performance

Heung-Jin Ju, Bong-Seok Kim, Kwang-Cheol Ko
Hanyang University

Abstract - 가스 절연 개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS)의 고체 스페이스에 경사기능성 재료(Functionally Graded Material : FGM)를 적용할 때, 전계의 완화를 예상할 수 있다. 특히, 균일 유전율 분포를 가지는 스페이스에서 양극 근처에 집중된 높은 전계가 FGM 스페이스를 사용할 때, 스페이스와 SF₆ 가스의 접촉부로 옮겨지며, 그 크기가 완화됨을 확인할 수 있었다[1].

본 연구에서는 상용 고체 스페이스의 양극 부근에서의 전계 집중을 감소시키기 위해 전극 형상의 최적화를 수행하였다. 최적화 기법으로는 완전계승계획법(Full Factorial Design : FFD)과 결합된 반응표면법(Response Surface Method : RSM)을 이용하였으며, 균일 유전율 스페이스에서 양극 형상을 최적화하였다. 또한 타원형 유전율 분포를 가지는 FGM 스페이스를 이용함으로써, 상용 GIS 모델에 비해 최대 전계가 크게 완화될 수 있음을 확인하였으며, 상용 GIS의 외함부의 크기를 줄여 실제 소형화 가능 여부를 확인하였다.

1. 서 론

고도의 경제성장, 산업의 발달에 따라 높은 전력 수요가 요구됨에 따라 전력계통의 대용량화, 고전압화와 더불어 환경 문제에 대한 관심이 대두되고 있고, 대전력 기기는 소형화 기기로 발전하는 추세이다. 따라서 전력용 차단기에서의 대용량화와 소형화를 동시에 만족할 수 있는 신뢰성 있는 전력기기의 설계를 위해서는 기기의 절연 성능에 큰 영향을 주는 정밀한 전계해석이 필요하다. 한편 가스 절연 시스템에서 스페이스의 절연 성능을 향상시키기 위해 다양한 기술의 개발이 있었으나, 기존의 기술들은 스페이스의 구조를 복잡하게 하여 스페이스를 설계할 때, 유연성을 제한하며, 제조비용을 증가시켰다. 따라서 이러한 한계를 극복하고, 스페이스의 구조를 간단하게 유지시키며, 절연성능을 향상시키기 위해 본 연구에서는 FGM 스페이스를 제안한다. 경사 기능성 재료는 물성이 다른 두 가지 또는 그 이상의 구성성분의 분포를 연속적 또는 불연속적으로 만들어 특성을 경사화한 재료로써, 전계가 집중되는 부분에 경사함수의 변화를 통한 유전율 분포를 제어하여 특정부분의 전계를 완화시킬 수 있으며, 전기재료의 방향비(aspect ratio)를 제어하여 기계적 강도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다[2].

본 연구에서는 상용 GIS에서 전극 형상의 최적화를 반응표면법[3]을 이용하여 수행하였고, FGM 스페이스가 적용될 경우와의 비교를 통해 기기의 소형화를 제안하였다.

2. 전극 형상의 최적 설계

2.1 해석모델

본 연구에서는 (주)엘렉콤의 C-GIS를 모델로 하여 양극의 최적화를 수행하였다. 그림 1(a), (b)에 각각 스페이스의 구조 및 해석영역을, 균일 유전율($\epsilon_r=3.5$) 스페이스를 갖는 경우 전계의 공간적인 분포를 나타내었다. 왼쪽면은 고전압 영역으로 시험전압으로써 기술 사양서에 명시된 정격 충격 내전압 125kV를 인가하였고, 오른쪽 금속 외함은 접지상태로 경계조건을 부여하였다. 또한 금속 외함 근처의 삼중점(금속-가스-절연물의 접촉부) 부근에서 전계 집중을 완화시키기 위해 그 부근의 음극 형상은 라운드 처리를 하였다. 한편 양극 중심부의 오목한 부분은 전계 집중부가 아니므로 평평한 형태로 처리하여 그 근방의 최대 전계를 조금 완화하였으며, 전계의 공간적인 분포를 그림 1(c)에 나타내었다.

2.2 설계변수 설정

본 연구에서는 반응값을 최대 전계로 설정했으며, 반응값에 영향을 줄 수 있는 인자로 선택된 설계변수는 그림 2에서처럼 X_1 , X_2 이다. 여기서 X_1 은 양극의 폭이며, X_2 는 양극 가장자리의 반경이다. 각 실험을 통해 계산된 최대 전계, 즉, 반응값은 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하여 계산하였다.

2.3 양극 형상의 최적화

RSM은 여러 설계변수가 복합적으로 작용하여 어떠한 시스템의 응답을 형성할 때, 이들의 관계를 근사다항식의 형태로 만든 뒤, 이를 이용하여 최적화를 수행하는 방법으로 x_1, x_2, \dots, x_k 가 어떤 반응변수 y 에 영향을 미칠 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 본 연구에서는 RSM을 적용할 설계 영역의 설정을 위해 실험계획법 중의 하나인 2² FFD를 수행하여 해석시간을 줄이고, 더 효율적인 설계범위를 지정하였으며, 그 결과를 바탕으로 RSM에 적용하기 위한 설계영역을 설정하였다. 표 1은 각 설계변수의 변화에 따른 최대전계 값을 조사하기 위한 2² FFD의 실험계획표 및 결과를 나타낸다. 그림 3은 각 설계 변수의 주효과 및 교호작용을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 어떤 설계변수들 사이의 교호작용도 없으므로 RSM을 위한 합리적인 설계범위를 주효과와 그림을 통해 쉽게 설정할 수 있다. 다음으로 설계범위 내에서 설계변수와 반응값 사이의 관계식을 구하기 위한 실험계획법으로 중심합성계획법(Central Composite Design : CCD)을 수행하였다. 중심합성계획법은 3수준의 FFD보다 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정할 수 있으며, 축점을 결정하는 계수값에 따라 실험계획의 직교성 및 회전성을 부여할 수 있다. 표 2에는 중심합성계획법을 위한 설계영역을 나타내었다. 이러한 결과를 토대로 계산된 2차 근사다항식은 식 (1)과 같다.

$$\hat{y} = 30.183 - 2.072X_1 + 0.564X_2 + 0.0459X_1^2 + 0.0287X_2^2 - 0.0406X_1X_2 \quad (1)$$

분산분석을 통한 결정계수의 결과는 R^2 와 adjust R^2 이 각각 99.2%, 97.7%로 근사다항식의 정확성이 매우 높다는 것을 알 수 있다.

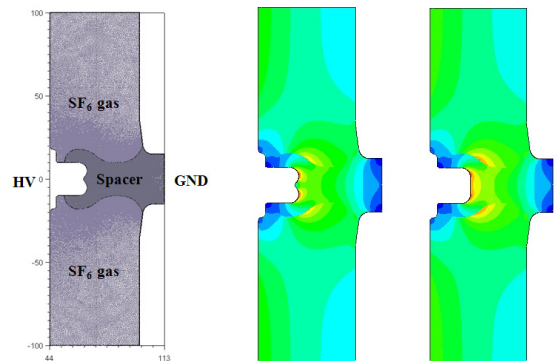


그림 1. GIS의 스페이스 구조 (요소 수 : 210,000개)(a), 전계분포 (최대전계 $E_m=6.357$ [kV/mm])(b) 및 양극 형상 최적화를 위한 구조 (최대전계 $E_m=5.957$ [kV/mm])(c)

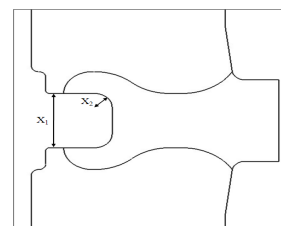


그림 2. GIS의 양극 형상 최적화를 위한 설계변수

그림 4에서는 설계변수의 변화에 따른 반응표면의 변화 양상을 나타내고 있으며, 표 3에서 최적조건 및 그 때의 최대 전계값을 나타내고 있다. 계산된 최적조건을 이용하여 유한요소법을 시행한 결과, 균일 유전을 분포를 가지는 초기 모델에 비해 17%만큼 최대 전계가 완화됨을 확인할 수 있었다.

<표 1> 2² FFD의 실험계획표

실험순서	X ₁ [mm]	X ₂ [mm]	E _m [kV/mm]
1	15(-1)	3(-1)	7.038
2	25(+1)	3(-1)	5.762
3	15(-1)	7(+1)	6.553
4	25(+1)	7(+1)	5.370
5	20(-1)	5(0)	5.957

<표 2> CCD를 위한 설계변수의 범위

설계변수	설계변수의 수준				
	-1.414	-1	0	+1	+1.414
X ₁ [mm]	24.586	25	26	27	27.414
X ₂ [mm]	6.586	7	8	9	9.414

<표 3> 최적점에서의 결과 비교

	최적점		최대전계 E _m [kV/mm]
	X ₁ [mm]	X ₂ [mm]	
초기모델			6.357
RSM	26.411	8.835	5.275
FEM	26.411	8.835	5.264

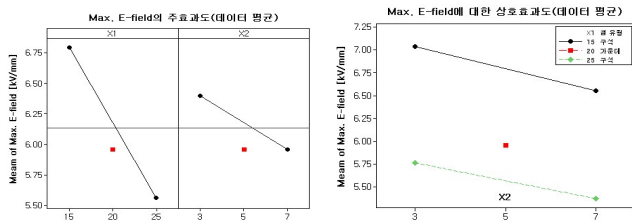


그림 3. 각 설계변수의 주효과 및 교호작용 효과

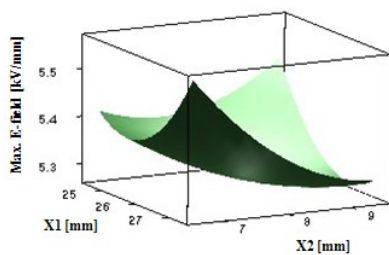


그림 4. 최대전계의 반응 표면

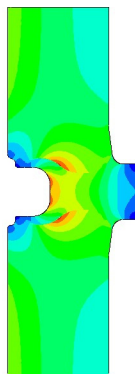


그림 5. 최적화 조건에서 전계분포(최대전계 E_m=5.264 [kV/mm])

3. FGM 스페이서를 이용한 GIS의 소형화

다음으로 타원형 유전을 분포를 가지는 FGM 스페이서를 이용하여 최대전계의 완화 정도를 확인하였고, GIS의 소형화 정도를 계산하였다. 일반적으로 FGM 스페이서를 이용하거나, 또는 양극의 최적설계를 통해 계산된 최대전계 발생지점은 양극 돌출부에서 스페이서와 가스의 접촉부로 옮겨지기 때문에, 본 연구에서는 FGM 스페이서 내부에서의 유전을 변화를 타원형 형태로 분포시켜 r방향 뿐 아니라 z방향으로의 전계 완화를 동시에 모색하였으며, 이는 기존의 경우[1]나 다른 형태의 유전을 분포에서보다 더 큰 최대 전계 완화 효과를 보였다. 이와 같은 FGM 스페이서의 공정은 Ref[2]의 방법을 통해 할 수 있으며, 에폭시 수지 ($\epsilon_r = 3.5$)로 구성된 실제 스페이서 재료에 충전제로써 이산화티타늄 ($\epsilon_r = 114$)을 이용하여 FGM 스페이서 내부의 유전율이 12.0에서 3.5까지 연속적으로 변한다고 가정하였다. 그림 6은 Ref[1]에서 제안한 r-방향 변화의 유전을 분포를 가지는 FGM 스페이서와 타원 유전을 분포를 가지는 FGM 스페이서에서의 전계분포를 나타낸 것으로써, Ref[1]에 비해 11%의 최대전계 완화효과를, 또한 초기모델에 비해 28%의 최대전계 완화효과를 보였다.

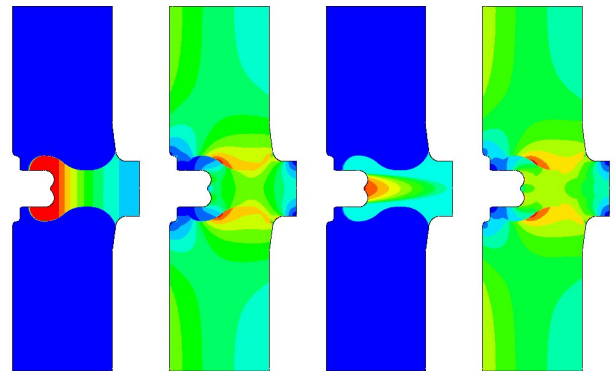


그림 6. FGM 스페이서에서의 r-방향 변화에 따른 유전 분포(a), (a)에서의 전계분포(최대전계 E_m=5.431 [kV/mm])(b), 타원 유전 분포(c), (c)에서의 전계분포(최대전계 E_m=4.839 [kV/mm])(d)

마지막으로 유전율이 타원형으로 분포된 FGM 스페이서를 갖는 GIS에서의 최대전계와 동일한 값을 갖도록 GIS의 외하부의 크기를 줄여 실제 소형화 여부를 확인하였다. 그 결과 r방향의 반경을 6mm까지 감소시켰을 때, 최대전계가 초기모델에서의 최대전계와 거의 일치하였다. 이는 실제 가스 용적을 15% 이상 감소시킬 수 있음을 의미하므로, 이를 통해 비용 절감 및 지구온난화를 야기시키는 온실가스인 SF₆ 가스 사용량의 감소로 친환경을 이룰 수 있다.

4. 결 론

균일 유전을 스페이서를 가지는 상용 GIS에서 양극 형상의 최적화를 완전계승계획법과 반응표면법을 이용하여 수행하였다. 해석결과로부터 양극 부근에 집중된 전계가 크게 완화되었으며, 최대전계 발생지점이 스페이서와 가스의 접촉부로 옮겨짐을 확인할 수 있었다. 또한 타원형 유전을 분포를 가지는 FGM 스페이서를 이용한 GIS 모델은 균일 유전 스페이서 모델에 비해 전계 세기가 최대 28% 정도 저감됨을 확인할 수 있었으며, 초기 모델에서의 기기의 용적을 15% 이상 감소시켰을 때와 동일한 최대전계값을 얻을 수 있었다. 따라서 기기 내부의 구조 최적화를 위한 구조해석 및 절연해석이 동시에 수행되면 FGM 스페이서의 사용은 기기의 소형화 및 친환경 전력기기 생산에 도움이 되리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 주홍진, 김봉석, 황휘동, 박정호, 최승길, 고광철, "가스절연 개폐장치의 고체 스페이서에 대한 유전을 경사기능성 재료의 영향", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2008
- [2] K. Kato et al, "Application of Functionally Graded Material for Solid Insulator in Gaseous Insulation System" IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., vol. 13, pp. 362, 2006
- [3] A. I. Khuri and J. A. Cornell, "Response Surface Designs and Analyzes", Marcel Dekker, NewYork, 1996