

## 진공 인터럽터의 쉴드 형상 최적설계

### Optimal Design of a Shield in Vacuum Interrupter

최승길<sup>1,a</sup>, 김규호<sup>1</sup>

(Seung-Kil Choi<sup>1,a</sup> and Kyu-Ho Kim<sup>1</sup>)

#### Abstract

In this paper a novel optimum design method is presented for a shield in a vacuum interrupter which is equipped in switchgear to improve its electric insulation capability. The design of Taguchi experiment method which is based on the results by finite element method is used to find optimum design conditions. The important design factors are chosen at first and the concept of signal to noise ratio is applied to evaluate the vacuum interrupter performance, and the optimal values of each parameters are determined. From the results of various analyses, it is shown that the shield plate in circuit circuit breaker compartment of switchgear can reduce the concentration of electric field intensity. This method is very useful to design the construction of a shield in a short time. Consequently, the insulation capability of circuit breaker compartment in a gas insulated switchgear is improved by adopting an additional optimized shaped shield.

**Key Words** : Vacuum interrupter, Design of experiment, Taguchi method, Shield, Finite element method

#### 1. 서론

현재 세계적으로 환경 문제에 대한 관심이 크게 대두되어 고전압, 대전력 기기는 사회의 친환경적인 요구에 의해 신뢰성을 갖춘 소형화 기기로 발전하는 추세에 있다.

특히 뛰어난 절연 내력과 소호 특성 때문에 대표적인 전기적 절연 매질로 사용되어 온 SF<sub>6</sub> 가스는 지구 온난화 계수가 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 가스의 23,900배 정도로 커서, 1997년에 개최된 지구 온난화 방지 교토 회의(COP3)에 대해 배출 억제 대상 가스의 하나로써 지정되었다. 이로 인하여 현재 전 세계의 중전기 업체에서는 절연매질로서 SF<sub>6</sub> 가스 대신 가압 건조공기(dry air), 질소, 또는 다른 절연 매질로 대체하기 위한 원천 기술 및 제품 적용 개발에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다

[1-3]. 그러나 현재까지 대체가스로 검토되고 있는 건조공기나 질소의 절연성능은 동일한 가스압력일 경우 SF<sub>6</sub> 가스에 비해 30~40 % 정도로 상당히 열등하므로 기기의 절연 성능을 확보하기 위해서는 기기 내부에 분포하는 전계 집중을 완화할 수 있는 최적 형상 설계가 우선 고려되어야 한다[4,5].

국내 계통의 25.8 kV 가스절연개폐장치(gas insulated switchgear)의 차단기부의 절연 매질을 SF<sub>6</sub> 가스 대신 질소 또는 건조 가스를 사용할 경우에는 특히 진공 인터럽터의 세라믹 양단부에 위치한 메탈라이즈층 주변의 전계 집중부가 절연 설계에 있어서의 가장 취약한 부분이 된다. 따라서 이 부분에 있어서의 전계의 집중을 완화할 수 있는 기초 설계 기술 확보가 요구된다.

이와 같은 필요성에 의해 본 논문에서는 기존의 진공 인터럽터가 갖는 전계 집중의 문제를 보완, 기기 내부의 절연 성능을 향상시키고자 새로운 형상의 완화 쉴드 구조를 제안하여 타당성을 검토하였다. 또한 대표적 실험계획방법인 다구찌 실험계획법을 진공 인터럽터의 절연 설계에 적용하여 제안한 완화 쉴드 구조의 최적형상 설계를 실시하였

1. 안산공과대학 전기과

(경기도 안산시 단원구 초지동 671)

a. Corresponding Author : skc0386@ansantc.ac.kr

접수일자 : 2007. 1. 31

1차 심사 : 2007. 2. 15

심사완료 : 2007. 3. 19

다. 최적화를 위해 쉴드 형상 결정 인자를 설계 변수로 선택하여 설계변수가 전위 및 전계의 세기에 미치는 영향력을 분석하여 최적의 설계 형상을 도출하였다. 예측된 최적 설계 변수값을 적용하여 유한요소 해석을 통해 완화 쉴드의 전계 집중 완화 효과를 검증하였다.

## 2. 진공 인터럽터의 구조

25.8 kV 가스절연개폐장치의 경우 차단부에는 고속도, 다빈도 개폐가 가능하고 차단 및 소호 성능이 우수한 진공 인터럽터가 전류 차단부로 적용되며, 이 진공 인터럽터는 절연 기체로 충전된 기밀 압력 용기내에 내장된다. 진공 인터럽터는 진공의 우수한 절연 특성과 금속증기나 전하입자의 확산에 의한 소호작용과 같은 특징을 살려서 진공용기 내에서 전류의 개폐 및 차단을 행하도록 한 보호용 전력기기이다.

본 연구에 이용된 진공 인터럽터는 현재 국내 중전기 업체에서 제조중인 모델로서 기본 정격 및 구조는 각각 표 1, 그림 1과 같다.

그림 1에서와 같이 진공 인터럽터는 세라믹 재질의 절연 용기, 접점, 아크 쉴드(arc shield) 등으로 구성된다. 절연 용기는 절연 성능과 기밀 성능을 동시에 만족시키는 알루미늄 세라믹을 사용하며, 용기 내부의 압력은 약  $10^{-6}$  Torr 이상의 고진공 상태이다.

고정 접점(fixed contact) 및 이동 접점(moving contact)은 전자구동력에 의해 아크를 회전시켜 아크 집중에 의한 금속 증기의 발생을 억제하여 차단 용량을 증대시키기 위해 나선형 구조로 되어 있다. 아크 쉴드는 전류 차단시 발생하는 금속증기의 절연 용기 부착에 의한 절연 성능의 저하를 방지하기 위하여 절연용기에 고정되어 있으나 전기적으로는 부유 상태(floating state)이며, 벨로우즈 쉴드(bellows shield)는 금속 증기로부터 벨로우즈를 보호하기 위해 사용된다.

진공 인터럽터의 세라믹 양단부에는 진공 봉합을 위한 메탈라이즈층이 형성되어 있어 가스절연개폐장치 적용시 이 부분이 삼중점으로 작용한다. 즉 즉 이 부분이 세라믹, 도체 및 절연 기체의 서로 다른 물리적 특성을 갖는 3종의 물질이 접하는 부분이 되어 전계 집중 현상에 의한 절연 성능 저하를 야기하는 취약점으로서 작용한다. 특히 기존에 사용되던 SF<sub>6</sub> 가스보다 절연 성능이 열등한 질소 및 압축 건조공기를 절연매질로 사용하는 경우에는

표 1. 진공 인터럽터의 기술 정격.

Table 1. Technical specifications of vacuum interrupter.

정격전압	25.8 kV,rms
정격전류	1250 A
정격차단전류	25 kA
정격 주파수	60 Hz
정격 상용주파 내전압	50 kV,rms
정격 뇌충격 내전압	125 kV,crest / 1.2×50 μsec
정격 점접간격	16 ± 1 mm

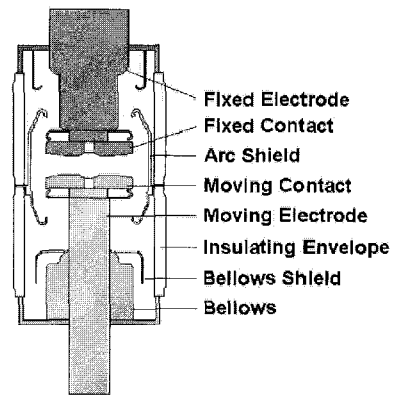


그림 1. 진공 인터럽터의 구조.

Fig. 1. Configuration of vacuum interrupter.

이 부근의 전계를 완화하여 절연 성능을 향상시킬 수 있는 설계 검토가 우선적으로 고려되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 이 삼중점 부근에서의 전계 완화를 통한 가스절연개폐장치 차단부의 전기적 절연 성능 향상을 도모하고자 세라믹 양단부에 새로운 완화 쉴드 구조를 적용하는 방법을 제안하고 타당성을 검증하였으며, 또한 실험계획법의 대표적인 방법인 다구저 실험계획법을 사용하여 쉴드의 최적 형상 설계를 실시하였다.

## 3. 쉴드 최적 형상 설계를 위한 실험계획법

### 3.1 완화쉴드 해석모델

진공 인터럽터의 전류 차단 및 소호 특성은 내부 전극 형상, 접점의 두께 및 공간 배치, 전극 갭, 아크 쉴드의 구조 등 여러 인자들에 의존한다.

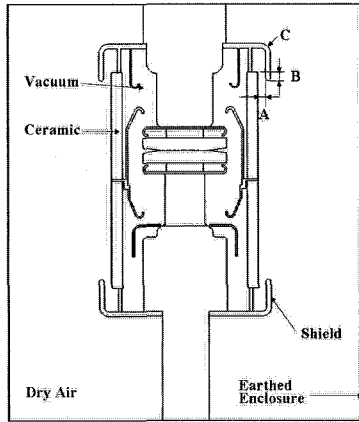


그림 2. 제안된 쉴드의 형상.  
Fig. 2. Configuration of a proposed shield.

표 2. 설계변수와 수준수 및 목적함수.  
Table 2. Design variables, levels and objective function.

설계변수 및 목적함수		수준1	수준2	수준3
제어인자 [mm]	A. 쉴드와 인터럽터간 r 방향 갭	1	3	5
	B. 쉴드의 z 방향 길이	0	2	4
	C. 쉴드의 외부 반경	5	6	7
목적함수	전계의 세기 [kV/mm]			

본 연구에서는 이미 차단 성능이 검증된 진공 인터럽터를 개폐장치의 차단기부에 배치할 경우 발생하는 전계 집중의 완화를 목적으로 하고 있으므로 본 연구에서는 이 차단 성능에 영향을 미칠 수 있는 진공 인터럽터 자체의 내부 구조 변경에 대해서는 고려하지 않았으며, 단지 외부에 그림 2와 같은 간단한 구조의 완화 쉴드를 설치하는 관점에서 연구를 진행하였다.

3.2 목적함수 및 설계변수 선정

가스절연개폐장치와 같은 고전압 전력기기의 절연 성능은 충전된 전극의 위치 및 형상에 의해 결정되는 전계의 세기와 절연 매질의 최대 허용 전계강도의 상관 관계에 의해 좌우되므로 본 연구에서는 해석 영역내의 최대 전계의 세기를 목적함수로 선정하였다.

표 3. 직교배열표.  
Table 3. Orthogonal array table.

실험번호	제어인자			실험조건	데이터
	A	B	C		
1	1	1	1	$A_1B_1C_1 = (1,1,1)$	$y_{111}$
2	1	2	2	$A_1B_2C_2 = (1,2,2)$	$y_{122}$
3	1	3	3	$A_1B_3C_3 = (1,3,3)$	$y_{133}$
4	2	1	2	$A_2B_1C_2 = (2,1,2)$	$y_{212}$
5	2	2	3	$A_2B_2C_3 = (2,2,3)$	$y_{223}$
6	2	3	1	$A_2B_3C_1 = (2,3,1)$	$y_{231}$
7	3	1	3	$A_3B_1C_3 = (3,1,3)$	$y_{313}$
8	3	2	1	$A_3B_2C_1 = (3,2,1)$	$y_{321}$
9	3	3	2	$A_3B_3C_2 = (3,3,2)$	$y_{332}$

제어 인자로는 완화 쉴드의 위치 및 형상을 통한 전계 완화의 경향을 검토하고자 쉴드와 인터럽터 사이의 r 방향 갭(A), z 방향 길이(B) 및 쉴드의 반경(C)를 선정하였으며, 제어인자의 수준수는 각각 3개의 수준으로 선정하였다.

표 2에 본 연구에서 사용한 설계변수와 그 수준수, 그리고 목적함수를 나타내었다.

3.3 직교배열표

다구찌 실험계획법은 강건설계를 위한 인자설계의 방법론으로서 직교배열을 이용한 실험계획과 신호 대 잡음비를 이용한 자료 분석이 특징이다.

직교배열은 전통적으로 사용되어온 부분요인 실험 계획법(Fractional factorial design)의 일종으로 배열 내의 각 열은 서로 직교하는 특성을 보이며 분석하고자 하는 자료는 가법모델(Additive model)로 근사된다. 평균분석(ANOM) 및 분산분석(ANOVA)을 통하여 각 인자의 효과와 최적수준조합을 찾아낼 수 있다.

직교배열표는 실험계획법을 사용할 경우 인자의 수와 각 인자별 수준수에 따라 적합한 실험회수 및 실험조건을 배열한 표로서 이 것을 사용할 경우 적은 실험의 수로서 최적의 값을 구할 수 있다는 장점을 갖고 있다[6]. 즉, 본 연구와 같이 인자가 A, B, C로서 3개이며 수준수가 3개인 3인자 3수준의 경우에 대하여 완전요인실험을 실시하면 27회의 실험을 실시하여야 하지만 L9(3,3) 직교배열을 사용하여 인자를 배치하면 9회의 실험만으로도 가능하다. 표 3에 인자와 인자별 수준을 할당한 직교배열표를 나타내었다.

### 3.4 신호 대 잡음비

다구찌는 실험계획법에서 성능의 개선을 위한 정도를 나타내는 척도로서 성능 특성의 종류에 따라 여러 가지의 신호 대 잡음비(S/N 비)를 정의하였다. 신호 대 잡음비는 이차식으로 주어지는 품질 손실함수(Quality loss function)로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도라고 할 수 있으며, S/N비는 높을 수록 좋다.

다구찌 기법에서 주로 사용되는 S/N 비에는 존재하는 모든 품질 특성치가 옴수가 아니면서 클수록 좋은 망대특성, 작을수록 좋은 망소특성, 그리고 어떤 유한한 특정 목표치가 주어져 있는 망목 특성 등이 있다[7].

본 연구의 목적 함수인 전계의 세기는 망소 특성을 가지며, 망소특성인 경우의 S/N 비 특성 식은 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 실험 결과 값의 개수,  $y_i$ 는 실험 결과 값을 나타낸다.

### 3.5 FEM 시뮬레이션

L9(3,3) 직교 배열표를 이용할 경우 필요한 실험 회수는 총 9회로 이를 직접 제작하여 실험하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소모되기 때문에 일반적으로 수치해석기법을 이용하여 실험을 대신하는 방법이 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 최대칭 3차원 FEM 코드를 이용하여 각각의 실험 모델에 대해 유한요소해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 데이터를 결과 값으로 사용하였다[8].

전계의 지배 방정식의 해를 구하기 위한 해석 영역의 경계 조건은 일반적으로 아래와 같이 식 (2) 및 식 (3)의 고정 경계 조건과 자연 경계 조건으로 주어진다. 연구 모델인 진공 인터럽터의 아크 쉴드는 접지되어 있지 않으며 또한 전원과 연결되어 있지 않아 등전위기기는 하지만 그 값이 얼마인지는 주어지지 않는다. 따라서 이와 같이 동일한 전위 값을 갖지만 어떤 값인지를 알 수 없을 경우의 해석을 위해 본 연구에서는 아래 식 (4)와 같은 등전위 경계 조건을 적용하였다[9].

$$\phi = \phi_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

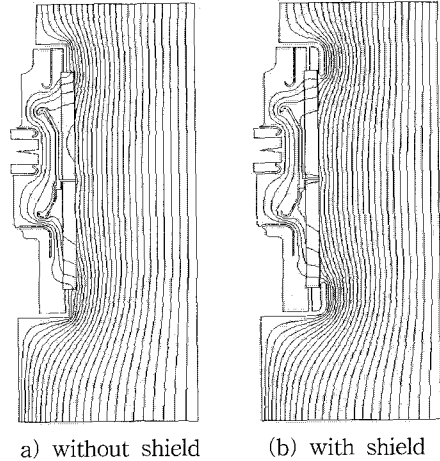


그림 3. 차단기부의 전위분포도.

Fig. 3. Electric potential distribution in circuit breaker compartment.

$$\phi_f = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \dots = \phi_k \quad (4)$$

유한요소 해석시 시험전압은 기기의 정격 뇌충격 전압인 125 kV<sub>peak</sub>를 인가한 상태에서 해석하였으며, 해석에 적용된 알루미늄 세라믹, 건조공기 및 진공의 비유전율값은 각각 9.1, 1.0, 1.0이다. 또한 유한요소 해석을 위한 요소 분할은 전계의 집중에 의해 물리적 특성의 변화가 심할 것으로 예상되는 아크 쉴드, 삼중점 및 쉘드 부근을 국부적으로 세밀하게 분할하여 해석 시간의 단축 및 계산 정밀도 향상을 도모하였다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.1 완화 쉘드의 유효성

본 연구에서는 완화 쉘드의 유효성에 대해 검토하고자 먼저 완화 쉘드가 있는 경우(기준위치 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> 적용)와 없는 경우의 두가지 모델에 대해 비교 해석을 실시하였다. 그림 3에 진공 인터럽터의 주도체에 125 kV를 인가하였을 때, 완화 쉘드가 없는 경우와 있는 경우의 전위 분포도를 나타내었다.

그림 3의 전위 분포도를 보면 먼저 인터럽터의 내부에 있는 아크 쉘드(arc shield)에는 정전용량 분배에 의해 일정한 값의 전위가 유지되어 진공 인터럽터의 내부 전위 및 전계 분포에 영향을 미

표 4. 3인자 3수준 실험 결과.

Table 4. The result values of three levels-three factors experiments.

번호	제어인자 [mm]			전계의 세기 [kV/mm]	비고 (실험조건)
	r방향 갭	z방향 길이	완화 쉘드 반경		
1	1	0	5	5.430	$A_1B_1C_1$
2	1	2	6	5.310	$A_1B_2C_2$
3	1	4	7	5.735	$A_1B_3C_3$
4	3	0	6	5.509	$A_2B_1C_2$
5	3	2	7	5.744	$A_2B_2C_3$
6	3	4	5	6.088	$A_2B_3C_1$
7	5	0	7	5.605	$A_3B_1C_3$
8	5	2	5	5.653	$A_3B_2C_1$
9	5	4	6	5.769	$A_3B_3C_2$

칠 수 있음을 알 수 있다. 해석을 통해 얻어진 아크 쉘드에 유기되는 전위는 완화 쉘드가 없는 경우 104.2 kV, 있는 경우 105.5 kV 정도로 인가 전압의 약 85 % 정도의 전위가 유기되었다. 이 유기된 전위에 의해 인터럽터 내부의 전계의 세기는 4.08 kV/mm에서 4.51 kV/mm로 상승하였지만  $10^{-4}$  Torr 이상의 고진공 상태의 절연 파괴강도가 20 kV/mm 이상인 점을 감안하면 완화 쉘드의 설치에 의한 진공 인터럽터 내부의 전계세기의 증가에 의한 영향은 고려할 필요가 없다[10,11].

또한 그림 3(a)를 보면 삼중점 부근에서의 전위 분포가 밀집되어 있어 이 부근에서 전계 집중이 이루어지고 있음을 확인할 수 있으며, 세라믹 양단부에 완화 쉘드를 설치한 경우에는 이 부분에서의 전위 밀도가 상당 부분 완화되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 삼중점 부근에서의 전위 분포의 완화가 일어나는 이유는 새로 설치한 고전압 충전 상태의 완화 쉘드가 동일 전위를 갖는 내부의 삼중점을 감싸는 구조로 되어 있어 등전위선을 삼중점 밖으로 밀어내는 효과가 있기 때문으로 생각된다. 실제 해석에 의한 건조공기 영역에서의 계산 결과를 살펴보면 완화 쉘드가 없는 경우 최대 전계의 세기는 6.08 kV/mm, 완화 쉘드가 있는 경우는 5.43 kV/mm이다.

해석 결과로부터 삼중점을 감싸는 완화 쉘드를 설치할 경우 이 쉘드가 전계의 집중을 막아 전계의 세기를 약 11 % 정도 저감시키는 효과가 있음을 확인할 수 있어 완화 쉘드의 설치가 개폐장치 차단기부의 절연 성능의 향상에 유효하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

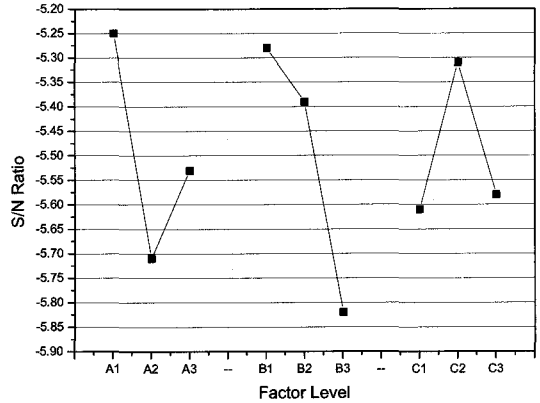


그림 4. S/N 비에 대한 주효과 그래프.

Fig. 4. Main effect graph for the S/N ratio.

#### 4.2 실험계획법에 의한 형상 최적화

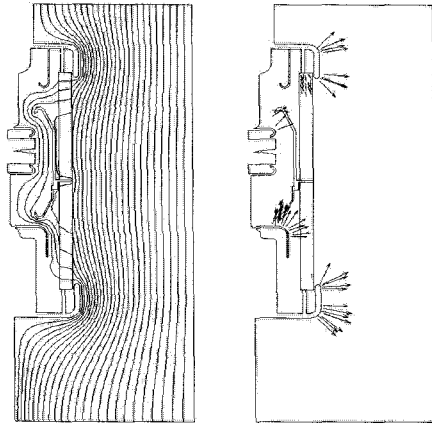
본 연구에서는 개폐장치 차단기부의 전계의 세기를 최소화시키는 최적 설계를 도모하기 위하여 여러 인자들 중에서 목표 특성치에 큰 영향을 미치는 중요 인자와 그 인자의 수준을 선정한 직교 배열표를 이용한 실험 계획법으로 9회의 유한요소 해석을 실시하였다. 표 4에 그 결과를 나타내었다.

표 4의 결과값은 정격 뇌충격 전압인 125 kV<sub>peak</sub>를 인가하였을 때 해석 영역중 기체 영역에서의 전계의 최대값이다.

먼저 각각 인자 수준에 대해 평균분석(ANOM) 방법에 의해 각 변수의 수준별 평균을 계산한 후 그 결과값을 식 (4)의 망소 특성치에 대입하면 각 인자 수준에 대한 S/N 비 값을 계산할 수 있다. 예를 들어 B<sub>1</sub>의 평균값은 실험 1, 4 및 7의 계산값을 평균하면 5.515로 주어지며, 이 값을 식 (1)에 대입하면 S/N 비 -5.29를 구할 수 있다.

위와 같은 방법에 의해 계산한 각 인자의 각 수준별 S/N 비 분석 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4로부터 인자의 수준 변화에 따른 S/N 비의 변화 정도를 검토한 결과 전계의 세기에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 B인자였으며, 다음으로 A 인자, C인자 순이었다. 전계의 세기를 최소로 하는 최적의 조건으로 예측된 각각의 인자 수준은 그림에서 알 수 있듯이 A가 1수준, B가 1수준, 그리고 C가 2수준일 경우로 나타났다. 즉 본 실험을 통하여 진공 인터럽터의 완화 쉘드의 r 방향 갭이 1 mm, z 방향 길이가 0 mm, 완화쉘드 반경이 6 mm 일 때 목표 특성치인 전계의 세기가 최소로 되는 최적 조건이 도출되었다.



(a) potential distribution (b) electric field distribution

그림 5. 최적화 모델의 전위 및 전계 분포도.  
Fig. 5. Electric potential and field distribution of optimized model.

이를 토대로 얻어진 최적조건을 이용하여 FEM 해석을 수행한 결과를 이용하여 예측 결과의 타당성을 검증하였다. 그림 5(a)에 최적화 조건이 적용된 구조의 전위 분포도를 나타내었으며, 그림 5(b)의 전계분포도에는 전계의 집중 부위를 육안으로 용이하게 확인하기 위해 각 해석 영역별로 전계의 세기 값이 가장 큰 부위만을 표시하였다.

그림 5(a) 및 5(b)를 보면 완화 쉴드의 적용에 의해 삼중점 부근에서의 전위 분포는 상당히 완화되었지만 전계가 최대로 집중되는 곳은 여전히 삼중점 부근임을 알 수 있다. 전계 완화의 정도를 알아보기 위해 해석 데이터를 검토한 결과, 최적조건에서의 최대 전계의 세기는 5.27 kV/mm 로서 최적화 조건의 완화 쉴드를 설치할 경우 개폐장치의 차단기부의 전계의 세기는 완화 쉴드가 없는 경우보다 최대 약 13.3 % 정도 완화됨을 확인할 수 있다.

현재 대체 절연 가스로서 적용이 고려중인 건조공기나 질소의 절연 능력은 SF<sub>6</sub> 가스의 30~40 % 정도로 열등한 점을 고려할 때 본 연구에서 고려한 쉴드의 전계 완화 효과만으로 동일한 가스압으로의 제품 적용은 불가능하다고 생각된다.

압력에 따라 변화하는 SF<sub>6</sub> 가스의 절연강도가 1 atm 일 때 약 7 kV/mm, 2 atm 에서 약 12 kV/mm, 3 atm 일 때 약 16 kV/mm 인 점을 고려하면[12], 개폐장치를 구성하는 절연물이나 도체류의 구조 변경없이 대체가스를 적용하기 위해서는

최소 3 atm 이상의 가스압을 적용하여야 할 것으로 판단된다. 높은 가스 압력을 적용하기 위해서는 내부 아크 사고시 발생하는 고압력에 내구성을 갖는 압력용기의 재설계가 필요하고, 고압력에 따른 가스 누기에 대한 기밀 대책도 요구된다. 따라서 차단기부에서의 진공 인터럽터의 절연 튜빙 또는 몰딩, 절연 베리어의 설치에 의한 추가적인 전계 완화 설계가 병행되어 정격 가스 압력의 상승을 최소화하기 위한 연구도 병행되어야 할 것으로 사료된다.

이상과 같은 결과로부터 완화 쉴드는 전계의 세기가 가장 큰 삼중점 부근에서의 전계집중을 완화시킴으로써 개폐장치의 차단기부 적용시 절연 성능 향상에 큰 도움을 줄 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 현재 국내의 개폐장치에 적용되고 있는 SF<sub>6</sub> 가스 대신 절연 능력이 상대적으로 떨어지는 가압 건조공기, 질소, 또는 타 절연 매질로 대체 설계시 주요한 기본 설계 방법의 하나로 적용될 수 있을 것으로 생각되며, 또한 궁극적으로는 지구 온난화에 대한 대비책으로도 적극 활용 가능할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 다구저 실험계획법과 FEM 해석을 이용하여 탈 SF<sub>6</sub> 가스화가 적용된 절연개폐장치의 차단기부에서의 전계의 집중을 최소화할 수 있는 완화 쉴드의 최적 설계를 제안하였다.

완화 쉴드의 유효성을 검증한 결과 해석 영역중 삼중점 부근에서 최대로 전계가 집중하고 있으며, 이와 같은 전계 집중은 삼중점을 감싸는 새로운 완화 쉴드의 설치에 의해 대폭 저감될 수 있음을 규명하였다. 또한 목적 함수인 전계의 세기를 최소화시키기 위한 완화 쉴드의 형상 및 위치와 관련한 최적 설계 변수를 도출하여 적용한 결과, 최적 위치 및 형상을 갖는 완화 쉴드의 설치는 개폐장치 차단기부의 전계의 세기를 최대 13 % 정도 저감할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 안산공과대학 학술연구비 지원사업에 의해 수행된 연구과제 결과의 일부로 이에 감사드리며, 연구에 협조하여 준 (주)비츠로테크와 (주)비츠로E&I에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] T. Takahashi and T. Okamoto, "Trial Design of Compact Solid Insulated Connection System and Experimental Investigation on Its Electrical Insulation Performance", Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, p. 171, 2003.
- [2] T. Okamoto, M. Shibuya, T. Takahashi, Y. Mizutani, and T. Takahashi "Proposal of all Solid Insulated Substation for Future Substation", Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, p. 1190, 2003.
- [3] J. Sato, O. Sakaguchi, and M. Miyagawa, "24 kV solid-insulated switchgear conforming with environmental requirements", Toshiba Report, Vol. 5, No. 12, p. 66, 2003.
- [4] A. J. Pansini and K. D. Smalling, "High Voltage Power Equipment Engineering", The Fairmont Press, Inc., p. 23, 1994.
- [5] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, F. Endo, and T. Omori, "Fundamental insulation characteristics of Air, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gases", IEEE Trans. PE, Vol. 125, No. 6, p. 619, 2005.
- [6] 박동규, "최신실험계획법", 기전연구소, p. 331, 1999.
- [7] 김성수, 정수진, 이영훈, 김동희, 노채균, "다구찌 방법을 이용한 선형 직류모터의 로버스트 설계", 한국조명전기설비학회논문지, 15권, 4호, p. 51, 2001.
- [8] 박필용, 최승길, 강형부, "표면접촉요소에 의한 정전용량의 해석", 전기전자재료학회논문지, 12권, 11호, p. 1095, 1999.
- [9] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, p. 175, 1986.
- [10] V. N. Maller and M. S. Naidu, "Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF<sub>6</sub> and Vacuum", Pergamon Press, p. 233, 1981.
- [11] M. Okawa, S. Yanabu, T. Tamagawa, H. Okubo, E. Kaneko, and T. Aiyoshi, "Development of vacuum interrupters with high interruption capacity", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, p. 807, 1987.
- [12] T. Rokunohe, T. Utsumi, Y. Yagihashi, and F. Endo, "Development of 24 kV C-GIS Insulated with High Pressure N<sub>2</sub> Gas", Proceedings of the IEE Japan Conference, p. 354, 2003.