

진공 인터럽터 내부 쉴드간 gap에 따른 연면방전 특성파악

윤재훈\*, 이승수, 임기조, 김성태\*\*  
 충북대학교\*, LS산전\*\*

Analysis of surface flashover along shield gap inner vacuum interrupter

Yoon jae-hun\*, Lee seung-su, Lim kee-jo, Kim sung-tae\*\*  
 Chungbuk University\*, LS industrial systems\*\*

**Abstract** - this paper describes the electric field distribution analysis along a shield gap inner vacuum interrupter(VI). The equipotential line and electric field and field vector in a VI are analysed by a finite element method and experiment at shield gap. in result, The equipotential line and electric field distribution was affected to VI shield gap. The reason is as it gets distortion of equipotential line done. finally, this paper recognized whether or not affected, and proposed gap with the most suitable shield length and an external insulation

1. 서 론

진공차단기는 1980년대 국내 교류계통에 적용되기 시작하여 약 20년동안 고신뢰성, 보수집중의 용이, 소형 및 경량화 등 많은 이점이 입증됨으로써 현재 국내 배전압급의 개폐장치에 대부분 적용되고 있다. 최근에는 전력 계통 부하의 급증으로 인한 차단 용량 증가 및 핵융합로의 전원설비로서의 적용에 대한 필요성이 대두되어 소형, 고 전압화를 위한 진공 절연의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 진공이 갖는 절연과파전압특성을 위해 다양한 전극 재료 개발이 이루어지고 있으며 전극형상에 의해 아크 구동력을 이용한 검토가 이뤄지고 있다.

VI의 소형화 대응량화를 동시에 만족시키기 위해서는 무엇보다도 먼저 VI의 기본 내부 구조와 전극형상에 의해 결정되는 전계 및 전위 분포의 해석과 관련 실험을 통해 절연 특성을 이해하는 것이 요구된다.

일반적으로 VI 내부에는 전류 차단시 발생하는 금속 증기 및 입자가 절연 용기의 내벽에 응결함으로써 발생하는 연면의 절연 성능 저하를 방지하기 위해 금속 재질의 Arc shield가 설치되어 있으며, 서로 다른 유전율을 갖는 삼중점을 보호하기 위한 End shield가 설치되어 있다.

이에 본 연구에서는 End\_shield간 gap이 VI내부절연에 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위하여 2차원 유한요소 프로그램(MAX-WELL)을 이용하여 VI에 대해 세라믹 내벽에 집중되어 지는 전계값을 비교하고 임펄스 실험을 통하여 gap이 연면방전에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 관련이론

VI의 전위 분포 및 전계를 해석하기 위한 지배 방정식은 Maxwell 방정식 및 poisson 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도된다.

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \Phi = -\rho \tag{1}$$

여기서  $\epsilon$ 는 유전율,  $\Phi$ 는 전위이며  $\rho$ 는 전하밀도이다. 1차 시험 함수에 Galerkin법을 적용하면 식(2)와 같은 계방정식을 구성할 수 있다.

$$[K] \{ \Phi \} + \{ F \} = \{ 0 \} \tag{2}$$

여기서 [K]는 계수 행렬이며, {F}는 구동 행렬이다. 정전계에서 방정식의 해를 구하기 위한 해석영역의 경계조건은 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi = \Phi_i \tag{3}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \tag{4}$$

여기서  $\Phi_i$ 는 전원 또는 접지 전위를 기지의 값이며, 식 (4)는 경계조건을 나타낸다.

본 연구의 해석모델인 진공 인터럽터의 차폐판과 같이 전원 또는 접지와 연결되지 않은 부유상태의 도체는 등전위 상태이지만 그 값이 주어지지 않는다 따라서 차폐판과 같이 동일한 전위 값을 갖지만 값을 알 수 없는 경우에는 아래와 같은 등전위 경계조건을 적용하여 계방정식의 해를 구하여야 한다.

$$\Phi_f = \Phi_1 = \Phi_2 = \dots \dots \dots \Phi_k \tag{5}$$

여기서,  $\Phi_f$ 는 차폐판의 전위로 미지값이며,  $\Phi_1 \sim \Phi_k$ 는 차폐판에 위치한 유한요소 절점의 전위값이다. 즉, 도체계 내부에 부유도체가 있을 경우, 부유 도체에 위치한 미지 절점은 k개 존재하지만 동일한 전위값을 가지므로 미지값은 하나만 존재하게 된다. 따라서 계방정식의 해를 구할 때 부유 도체에 대해서는 k개의 방정식을 유도하는 대신 한 개의 식만을 적용시켜야 한다.

2.1.1 해석 모델 요소

<표 1> simulation condition

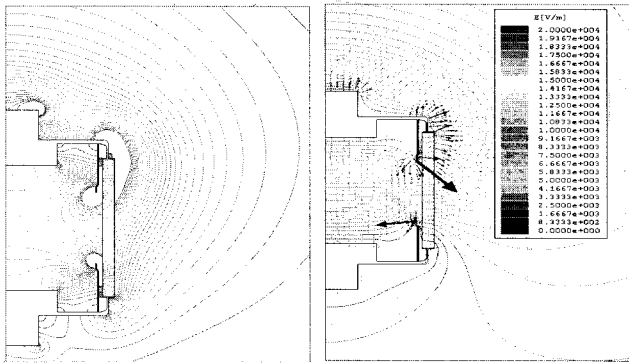
object	재질	조건
conductor	copper	도체(source 1kV)
ceramic	Al2O3_ceramic	절연물(유전율9.8)
vacuum	vacuum	진공 10 <sup>-6</sup> torr
air	air	boundary

정확한 전계해석을 위해서는 해석하고자 하는 대상의 재질 및 절연물의 유전율, 구조를 명확하게 파악하고 있어야 한다.<표1>은 본 논문에서 해석시 적용한 재질 및 유전율을 나타내고 있다. 복잡한 구조의 대상이라도 단순화시켜 해석하고자 하는 부분이 정확하게 표현되도록 해야 한다. 이에 본 논문에서 해석하고자 하는 부분은 쉴드로 인해 유기되는 세라믹 내벽의 전계집중 현상이다. 쉴드간의 gap을 ±10mm단위로 조절하여 해석을 진행하였다. <그림1>은 쉴드간 gap이 42mm일때의 전계분포 및 전계방향과 등전위선을 나타낸 그림이다. <그림2>는 L1모델에서 세라믹 내벽이 받는 전계값을 그래프로 표시하였다. 쉴드 끝단에 전계가 집중되는 모습이지만 쉴드간 gap이 증가함으로써 최대전계치는 L모델중 최소였다. <그림3>,<그림4>는 L2모델에서의 전계해석 결과를 나타내고 있으며 <그림5>,<그림6>는 L3모델의 전계해석 결과를 나타내고 있다. <표 2>에 각 gap에 따른 최대전계값을 표시하였다. 쉴드간 gap이 커질수록 최대전계값은 완화되는 것을 확인할 수 있었다. 쉴드의 길이를 매우 짧게 하여 쉴드간 gap을 크게 하면 전계최대치의 완화에 효과가 있을 수 있다. 그러나 쉴드의 역할을 고려했을 때 최소한의 길이가 확보되어야 세라믹 내벽과 삼중점을 보호 할 수 있다. dummy VI가 아닌 실제 VI제품에는 소용량의 경우 one-ceramic구조로써 아크쉴드를 설치하지 않는다. 이 경우 전극에 접해있는 쉴드는 source와 같은 전위가 걸리게 되고 이로 인한 세라믹 내벽의 연면방전에 심각한 문제점을 드러내게 된다. 대응량의 경우에는 금속증기

로부터 보호하기 위한 floating 상태의 아크실드가 설치하게 되지만 아크실드를 고정하기 위해 two-ceramic 구조를 갖게 되고 세라믹과 세라믹이 연결되는 부분은 금속으로 브레이징 되어있다. 이 경우에도 소스 이 역시 end-shield와의 gap을 고려해주시 않는다면 VI 내부 capacitance가 형성되어서 절연내력은 오히려 악화될 수 있다. 그러므로 end-shield의 길이는 최소한 금속 브레이징부 즉 삼중점 보다 높은 위치에 설치되어야 함으로 요구되어지는 길이 이상이 필요하다.

〈표 2〉 Maximum value of electric field

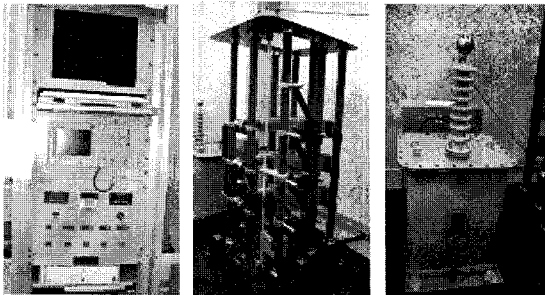
model	세라믹 내벽에 집중되는 전계최대치[V/m]
L-1	$6.9 \times 10^4$
L-2	$8.0 \times 10^4$
L-3	$9.5 \times 10^4$



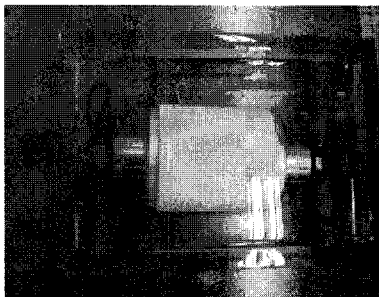
〈그림 2〉 모델 전계분포 및 등전위분포 및 전계방향

### 2.1.2 실험장치 구성

뇌 임펄스에 따른 VI의 연면방전개시 전압 취득을 위한 장치는 〈그림3〉과 같이 구성되어 있다. 방전 시 보호책으로 각 장비 및 컨트롤러의 외함은 접지를 하였다. 외부요인에 의한 절연 파괴를 방지하기 위해 〈그림4〉와 같이 유중에서 실험을 진행하였으며 시편이 상하 대칭구조 이기에 정극성만을 인가하였다.



〈그림 3〉 experiment setting



〈그림 4〉 test sample

### 2.1.3 실험결과

VI 내부 쉴드의 gap에 따라 절연파괴 전압의 영향을 살펴보기 위하여 VI를 모의한 시편에서 절연파괴 전압을 〈그림5〉에 나타

내었다. 각각의 시료에서 쉴드간 gap이 작아질수록 연면방전개시 전압이 낮아지고 있음을 확인 할 수 있다. 세라믹 전장의 길이는 66mm이며 L1, L2, L3에서 각 쉴드간 gap은 42mm, 37mm, 32mm이다. 쉴드 끝단에 전계가 집중 되는 것을 보완하기 위해 세라믹과의 gap을 확보해주었다. 쉴드와 세라믹간 전계가 상승하고 일정한 전계값 이상이 되면 세라믹 내벽을 타고 절연파괴가 일어난다.

BL	Charging voltage	Gap distance	L1(18mm)	L2-1(23mm)	L2-2(23mm)	L3-1(28mm)	L3-2
50k V	62	5.7	0 0	X 0 0	0 0	0 0	0 0
60k V	75	6.5	0 0	0 0	X 0 0	X 0 X 0	0 0
70k V	87	7.3	0 0	0 0	X X 0 0	X X X 0 0 0	0 0
80k V	100	8.0	X X 0 0	0 X 0 0	X 0 0	0 0	0 0
90k V	112	9.2	0 0	0 0	X X 0 0 0	0 0	X X X 0 0
100 kV	123	10.6	0 0	X 0 0	0 0	X X X X	0 0
110 kV	136	11.4	0 0	X 0 0	X X		0 X X 0 0
120 kV	149	12.8	0 0	X 0 0 0			X 0 X X X
130 kV	161	14.6	X 0 0	X X 0 0	연면방전		
140 kV	175	15.8	X X 0 X X	연면방전			
150 kV	186	17.6					

〈그림 5〉 쉴드간 gap에 따른 임펄스 전압 측정 결과

### 3. 결 론

VI 내부 shield간 gap에 따른 해석과 실험을 진행한 결과 end shield간의 gap이 VI 내부의 ceramic 내벽에 영향을 미치고 있다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 쉴드 끝단에 전계가 집중되어 쉴드와 세라믹간 전계가 상승하고 세라믹에 일정한 전계값 이상이 집중되면 세라믹 내벽을 타고 절연파괴가 일어나는 것으로 사료된다. 차단시 금속중기로부터 3중점을 보호하기 위해 설치된 end shield로 인하여 연면방전이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 VI 내부 절연이 아닌 차단측면에서 살펴 볼 때, 삼중점을 보호하기 위한 shield의 역할은 중요하다. 때문에 절연 특성을 확보하기 위하여 shield의 최적설계가 요구되어 지며 이에 따른 추가적인 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원 사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 최승길, "진공 인터럽터의 차폐판이 전계분포에 미치는 영향의 유한요소 해석", journal of the korea institute of electrical and electronic material engineers, vol 12, no 2, pp.182.187, 1999
- [2] M. Binnendijk, et al, "high-current interrupter in vacuum circuit breakers", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Inclusion, vol. 4, pp. 836-840, 1997
- [3] H.okumura, E. Kaneko, "Recently developed vacuum interrupter construction and performance improvement", Toshiba Review, no. 141, pp.5-10, 1982
- [4] M, Okawa, et al, "Development of vacuum interrupters with high interrupting capacity", IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 805-809, 1987
- [5] K. Kato, et, al. "Breakdown conditioning characteristics of precision-surface-treatment", Jan IEE Trans. to be published, 2006
- [6] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 175-179pp, 198[2]
- [7] Falkingam et al "twenty years of field service experience of the shieldless vacuum interrupter" ISDEIV XXI Yalta 2004