Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 23, No. 2, p. 169, February 2010.

논 문 23-2-15

진공인터럽터 내부 End Shield형상과 갭거리에 따른 연면방전거동

Behavior of Surface Flashover Depending on Shape and Gap Distance of End Shield in Vacuum Interrupter

윤재훈[1,a], 임기조[1]
(Jae-Hun Yoon[1,a] and Kee-Jo Lim[1])

Abstract

Because of power consumption increase, global warming, and limitation of installation, not only high reliability and interruption capability but also compact and light power apparatuses are needed. In this paper, E field calculation and experiment were processed to identify the influence of the shape of end shield and gap distance. It is expected that the results of FEM simulation and experiments could be the basic data to develop VI. the results of FEM simulation and experiments are as following. Firstly, maximum E fields were compared by means of finite element method as a function of the shape of end shield. 3 types of models were used to analyze maximum E field of each model and the influence of shape of shield could be identified. As a result, proposed L type shield could reduce the maximum E field by 20%. Secondly, the influence of the gap distance between end shields on E field was analyzed. As the gap distance become short the gap distance between inner walls of ceramic also become short. And the maximum E field concentrated on inner wall of ceramic finally increased. Thirdly, the experiment was conducted by fabricating each prototype. As a result, no creepage occurred in shieldless model. In other words, creepage occurred in the shield-installed models. And creepage inception voltages were different from each other because of the difference of maximum E field. Fourthly, The equation that shows relation between calculated E field and measured creepage inception voltage was proposed as a result of FEM analysis and experiment. It is concluded that when designing VI this equation could be important data to reduce time and cost by identifying indirectly the optimal gap distance and the shape of shield required to prevent creepage.

Key Words : Vacuum interrupter, Surface flashover, FEM, Inception creepage, End shield

1. 서 론

최근 산업발달에 따른 전력수요 급증에 따라 전력 설비의 대용량화 및 신기술 개발의 필요성이 요구되고 있다. 그 중에서도 진공차단기는 차단능력과 안정성 및 신뢰성이 우수하여 많은 산업기기에 사용되고 있다[1]. 진공차단기는 국내에 1980년대에 도입되어 현재 국내 배전전압(22.9 kV)급의 개폐장치에 대부분 적용되고 있다. 진공인터럽터(vacuum interrupter : 이하 VI)는 진공차단기의 구성요소 가운데 가장 핵심적인 부품으로 VI내부의 구조를 살펴보면 크게 가동부와 고정부, 그리고 절연부로 구분 할 수 있다[2]. 이중 특히 절연부는 세라믹으로 구성되어 있는 외부 절연용기와 차단시 발생하는 금속증기를 차단하기 위한 아크쉴드, 삼중점을 보호하기 위한 end shield가 설치되어 있다. VI의 대용량화 및 소형화를 이루기 위해서는 VI절연 내력을 향상시키는 것이 무엇보다 중요하며 VI의 절연을 향상시키기 위해 VI내부 고전계

1. 충북대학교 전기공학과
(충북 청주시 흥덕구 개신동 12)
a. Corresponding Author : mephsto9@naver.com
접수일자 : 2009. 9. 16
1차 심사 : 2009. 12. 10
심사완료 : 2010. 1. 22

현상과 VI절연내력의 관계에 대한 연구와 내부구조의 최적화를 통한 절연내력 향상에 대한 연구가 요구되어 지고 있다[3,4].

2. 본 론

2.1 유한요소해석[5]

전계해석을 위해서 상용의 유한요소 해석 프로그램(Maxwell 2D)을 사용하였다. 이 프로그램은 일반적으로 전계 및 자계와 관련된 해석을 위하여 제작된 소프트웨어로서, 전계의 세기 및 분포, 자계의 세기 및 분포, 와전류 해석 외 다양한 기능을 제공하고 있으며, 전계해석을 위해서 가장 널리 사용되는 소프트웨어의 일종이며 지배방정식의 수학적 모델과 경계 조건은 다음과 같다.

① 라플라스 방정식(Laplace equation)

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 X^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 Y^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 Z^2}=0$$

② 포아손 방정식 (Poisson equation)

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 X^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 Y^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 Z^2}=-\frac{\rho}{\epsilon}$$

③ 복합 유전체의 경우

$$\epsilon_A E_{nA}=\epsilon_B E_{nB},$$

①, ②에서 전극의 형상과 전압은 경계조건으로 이용되며 ③은 경계면에서의 전속 밀도의 법선방향 연속조건으로 이용된다. 정확한 전계해석을 위해서는 해석하고자 하는 대상의 재질 및 절연물의 유전율, 구조를 명확하게 파악하고 있어야 한다[6,7]. 표 1은 본 논문에서 해석 시 적용한 재질 및 유전율을 나타내고 있으며 그림 1과 그림 2는 해석을 위해 모델링한 dummy-VI의 모습이다. 논 논문에서는 오직 쉴드의 영향만을 해석하기위하여 접점을 제거한 dummy-VI로 모델링을 하였으며 시험에 사용된 시료 역시 같은 모습을 하고 있다. 해석 시 고전압 인가부에는 1 kV를 인가하여 전계해석을 진행하였으며 이는 전계값과 인가전압이 1차함수로 비례하기 때문에 해석수치의 간편화와 실제 임펄스 전압인가 시에 대한 계산을 간편히 할 수 있기 때문에 편의상 1 kV를 인가하였다. 본 논문에서 해석하고자 하는 부분은 VI내부 구성 파라미터 중 VI내부 절연설계에 가장 큰 영향을 미치는 end shield이며 end shield로 인해 유기되는 세라믹 내벽의 전계집중 현상이다. 쉴드 형상에 따른

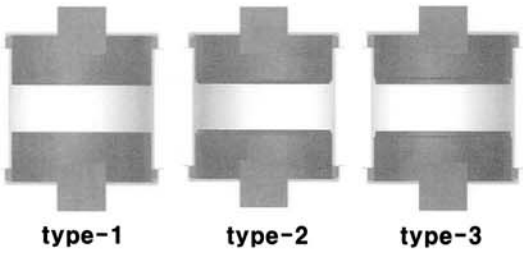

그림 1. 쉴드 형상에 따른 시뮬레이션 모델.
Fig. 1. Simulation model by shield shape.

표 1. 쉴드형상과 쉴드끝단 반경.
Table 1. shape and end shield radius of shield.

model	shield shape	end shield R[mm]	shield gap[mm]
type-1		.	32
type-2		2.5	32
type-3		2.5	32

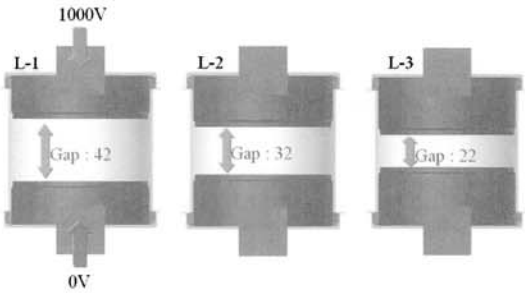

그림 2. 쉴드간 갭거리에 따른 시뮬레이션 모델.
Fig. 2. Simulation model by gap distance.

모델은 쉴드간 갭거리를 32 mm로 고정하였다. 쉴드와 세라믹내벽 간 갭은 32 mm로 고정하였으며 전압인가부에 1 kV를 인가하여 VI내부 전계를 모의 하였다. 또한 쉴드간 갭거리에 따른 모델은 다른 요인들은 위와 동일한 조건이며 쉴드간 갭만을 각각 22 mm, 32 mm, 42 mm로 달리하여 3가지 모델에 대한 해석을 진행하였다.

표 2. 시뮬레이션 조건.
Table 2. Simulation condition.

objects	material	조건
conductor	copper	도체(source : 1 kV)
insulator	ceramic(Al_2O_3)	절연물(유전율 : 9.8)
vacuum	vacuum	진공 : 10^{-6} Torr
background	air	중성선(boundary)

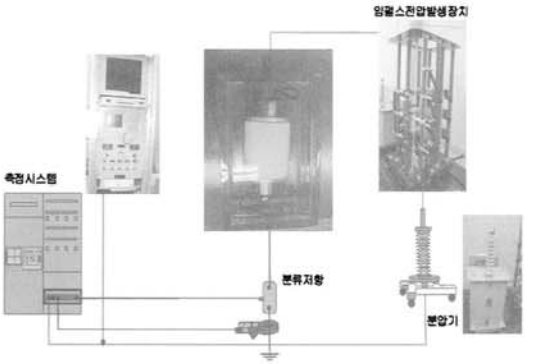

그림 3. 실험장치 구성.
Fig. 3. Experiment set-up.

2.2 연면방전 개시전압 측정시험

쉴드 영향에 따른 연면방전 개시전압을 측정하기 위하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 end 쉴드를 제외한 다른 요인들을 모두 제거한 dummy-VI로 이는 VI내부 구성 파라미터 중 end shield 만의 영향을 고려하기 위한 것이다. 뇌 임펄스 VI의 연면방전 개시 전압 측정을 위한 장치는 그림 3과 같이 전압을 조절하는 컨트롤러, 파형을 측정할 수 있는 오실로스코프, impulse generator, high voltage transformer 로 구성되어 있다. 외부요인에 의한 절연파괴를 방지하기 위해 그림 3과 같이 시편을 실리콘유를 이용하여 유중에 완전히 잠기도록 하여 실험을 진행하였다. 시험 전압은 시편이 상하 대칭구조 이기에 정극성만을 인가하였다. 임펄스전압을 쉴드의 형태가 다른 시편에 30 kV부터 연면방전이 일어날 때 까지 매 10 kV씩 승압하여 인가하였다. 갭을 달리한 시편에는 50 kV부터 연면방전이 일어날 때까지 매 10 kV씩 승압시켜 임펄스 전압을 인가하였다. 각 실험 단계에서 연면방전이 발생할 경우 재단파가 나타나며 파고치를 파괴전압으로 하였다.

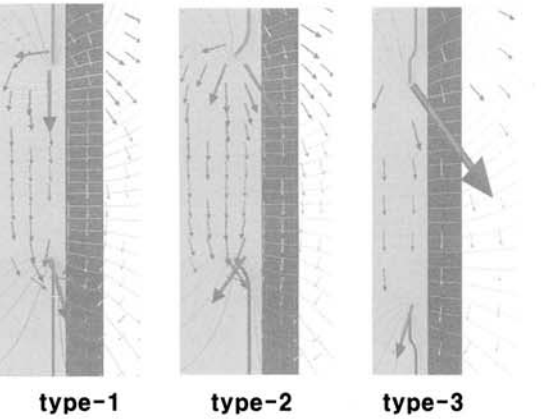

그림 4. 전계분포 및 등전위분포.
Fig. 4. E field and potential line of each model.

표 3. 각 모델의 유한요소해석 결과.
Table 3. Maximum electric field of each model.

model	쉴드간 갭거리 [mm]	E_{max} [V/m]	position of E_{max} [mm]	E_{mt} [V/m]	E_{mn} [V/m]
type-1	32	10.4×10^4	59	9.0×10^4	5.2×10^4
type-2	32	8.8×10^4	61	7.2×10^4	5.0×10^4
type-3	32	8.0×10^4	63	6.2×10^4	5.1×10^4
L-1	42	6.9×10^4	66	4.4×10^4	5.2×10^4
L-2	32	8.0×10^4	62	5.1×10^4	6.1×10^4
L-3	22	9.5×10^4	57	6.1×10^4	7.2×10^4

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 결과 및 고찰

표 3에는 쉴드 형상과 쉴드간 갭거리에 따라 유한요소해석의 결과를 최대전계값과 최대전계값이 발생하는 위치 그리고 최대 전계의 세라믹 내벽에 대한 길이방향 및 두께방향의 성분으로 나타낸 것이다. 표 3에 정리되어있는 전계값들은 1 kV 인가시에 대한 전계값이다. 배전급 VI는 뇌 임펄스를 최소 150 kV를 견뎌야 함으로 배전급 VI설계 시 본 논문에서 제시한 전계값에 150배를 하여 최적 전계값을 찾아 낼 수 있다. 쉴드의 형상에 따라서

최대전계값과 최대전계값이 발생하는 위치, 세라믹 내벽을 연하는 전계성분이 각각 다르다. VI내부에서 연면방전을 억제하려면 세라믹 내벽을 연하는 전계성분을 완화시킬 필요가 있다. type-1, type-2, type-3모델에서 세라믹과 쉴드의 이격거리를 증가시킬수록 최대 전계값은 완화 경향을 보이고 있다.

이는 쉴드간 갭거리가 커질수록 세라믹 내벽의 연면거리가 증가하고 접지부에 유기되어지는 capacitance의 영향이 감소하기 때문이다. 쉴드의 길이를 매우 짧게 하여 쉴드간 갭거리를 크게 하면 전계최대치의 완화에 효과가 있다. 그러나 쉴드의 역할을 고려했을 때 최소한의 길이가 확보되어야 세라믹 내벽과 삼중점을 차단시 발생하는 금속증기로부터 보호 할 수 있다. 그러므로 end-shield의 길이는 상중점보다 높은 위치에 설치되어야 한다. 세라믹내벽과의 갭은 세라믹과 가까울수록 금속증기로부터 보호를 할 수 있으나 연면방전을 억제 할 수 있는 최소한의 갭은 확보되어야 할 것이다.

3.2 연면방전 개시전압 측정결과

dummy-VI내부 end shield의 형태에 따라 연면방전 개시전압의 영향을 살펴보기 보았다. type-1 모델의 경우 60 kV부터 연면방전이 발생하였다. 유한요소법 전계해석 결과에 의하면 연면방전 개시전압을 결정해주는 가장 중요한 요소인 세라믹 내표면에 형성된 최대전계의 면방향 성분(E_{mt})이 가장 높았다. 따라서 세 형태중 가장 낮은 연면방전 개시전압을 예상 할 수 있으며 실측에서 확인되었다. type-2모델에서 측정한 연면방전 개시전압은 type-1모델에 비하여 20 kV 높은 전압이 측정되었다. 이는 세라믹 표면에 형성된 최대전계의 면방향 성분이 쉴드 끝단을 둥글게 처리함으로써 최대전계와 면방향 성분은 감소하고 연면방전개시전압은 높아진 것으로 보여 진다. 그type-3모델에서 측정한 연면방전 개시전압은 type-1과 비교하였을 때 쉴드 끝단과 세라믹 내벽사이를 일정한 이격거리를 둠으로써 전계집중 현상이 완화되어서 연면방전 개시전압 또한 type-1보다 높은 전압에서 측정되었다. 고체절연체인 세라믹의 내표면에 형성된 최대전계의 면방향 성분 (E_{mt})와 연면방전 개시전압이 일정한 관계에 있음을 알 수 있다. 즉, 최대전계의 연면성분이 클수록 연면방전 개시전압이 저하되고 있다. 이러한 관계는 연면방전 메카니즘으로 알려진 바와 같이 연면방전이 고체 절연재 표면의 특성과 절연재 표면에 연하여 인가되고 있는 전계에 의하여 개시된다는 사실을 보여주고 있다[8,9].

3.3 연면방전 개시전압과 전계값의 관계

End shield형상을 달리한 모델과 쉴드간 갭거리를 달리한 모델에서 유한요소 해석을 통해 계산된 세라믹 내벽에서 연면방전을 유발 할 수 있는 전계값과 실험을 통해 측정한 연면방전 개시전압 간의 관계식을 제시하고자 한다. 이는 실제 VI내부의 절연설계 시 필요로 하는 설계허용치 또는 기준전압, 차단부 형상, 재질 등에 따라 파괴전압이 크게 영향을 받기 때문에 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 생각되기 때문이다. 시행착오법을 통하여 전력 기기의 절연설계를 수행한다면 다양한 모델기기에 대한 수많은 전계해석과 실증시험을 통해야만 결과확보가 가능하기 때문에 경제적 시간적 손실이 많아 어려운 실정이기 때문이다.

표 4. 각 모델의 연면방전 개시전압.
Table 4. Surface flashover voltage of each model.

model	쉴드간 갭거리 [mm]	방전개시전압 [kV]
type-1	32	60
type-2	32	80
type-3	32	120
L-1	42	140
L-2	32	120
L-3	22	90

표 5. 각 모델의 연면방전 개시전압.
Table 5. Surface flashover voltage & E_{mt}.

model	E_{mt} [V/m]	방전개시전압 [kV]
L-1(gap 42 mm)	5.2×10^4	140
L-2(gap 32 mm)	6.1×10^4	120
L-3(gap 22 mm)	7.2×10^4	90
type-1	9.0×10^4	60
type-2	7.2×10^4	80
type-3	6.2×10^4	120

(curve-fit chi^2 = 0.0182 after 1056 iterations)

$$V_{FO}[kV] = \exp^{(-0.2366\times10^{-4}E_{rd}+6.2)}[V/m]$$

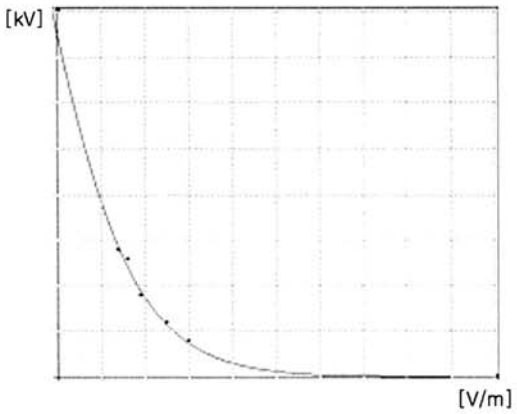

그림 5. 실험결과와 해석결과에 의한 실험식.
Fig. 5. Curve fit of experimental result and simulation result.

4. 결 론

본 논문에서는 VI내부에서 최적의 절연을 구성하는데 있어서 end shield가 VI내부 절연에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 쉴드의 형상 및 gap에 따른 전계해석과 연면방전 개시전압 분석하였다. 이 결과는 VI절연설계에 활용 될 수 있을 것이며 VI의 소형화 및 대용량화를 위한 기본적인 연구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

[1] L. T. Falkingham and G. F. Montillet, "A history of fifty years of vacuum interrupter development (the english connection)", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, p. 706, 2004

[2] J. D. Cobine fellow, "Research and development leading to the high-power vacuum interrupter: A historical review", IEEE, Vol. 82, No. 65, p. 201, 2008.

[3] L. T. Falkingham "Fifty years of vacuum interrupter development in the UK", ISDEIV, p. 1, 2002.

[4] H. Okumura and E. Kaneko, "Recently developed vacuum interrupter construction and performance improvement", Toshiba Rev., No. 141, p. 5, 1982.

[5] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, p. 175, 1986.

[6] L. X. Cao "Calculation of electic field in vacuum circuit breaker using optimized and traditional CSM", ISDEIV, p. 552, 2002.

[7] T. L. X. Yun, "Simulated annealing algorithm", Science Press, SCDM Measurements & Applications, in N_2 and Dry Air, No. 430, p. 116, 1997.

[8] Cao Y., Liu X., and Wang E., "Optimization design of the contact and shield in vacuum interrupter based on the genetic algorithm", ISDEIV, Vol. 2, p. 463, 2000.

[7] Mesyats, G. A., "Pulsed electrical discharges in vacuum at cryogenic electrode temperatures", Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on], Vol. 24, Issue 6, p. 883, 1989.

[8] Miller, H. C., "Surface flashover of insulators", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, p. 765, 1989.

[9] Sharma A., "Surface flashover in spacer at vacuum/oil interface", ISDEIV, p. 219, 2002.