

고전압 전력기기 개발을 위한 기중 임펄스절연파괴특성에 관한 연구

강형구*, 김준연*, 석복열*, 김동해*
현대중공업(주) 기계전기연구소*

Experimental study on the lightning impulse breakdown characteristics of air for the development of air-insulated high voltage apparatuses

Hyoungku Kang*, Joon-Yeon Kim*, Bok-Yeol Seok*, Dong-Hae Kim*
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.*

Abstract - To develop electrically reliable high voltage apparatuses, the experimental study on the electrical breakdown field strength is needed, as well as theoretical approach. In this paper, lightning impulse breakdown characteristics considering utilization factors are investigated for the establishment of insulation design criteria of an high voltage apparatus. The utilization factors are represented as the ratio of mean electric field to maximum electric field. Dielectric experiments are performed by using five kinds of sphere-plane electrode systems made of stainless steel. As a result, it is found that dielectric characteristics are affected by not only gap length but also utilization factor of electrode systems. The results are expected to be applicable to the design of high voltage apparatuses.

1. 서 론

대용량급 변압기와 차단기, 그리고 회전기 등과 같은 고전압 전력기기는 복잡한 내부구조와 더불어 온도, 수분, 먼지, 압력 등 주변 환경의 변화로 인하여 전기 절연적으로 취약해질 수 있다. 전력계통 사고로 인하여 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 인명사고까지 발생할 수 있다. 따라서 전력계통의 안정화를 위한 고신뢰성 전력기기의 개발이 필요하며, 실제로 일본과 독일 등과 같은 선진국에서는 고전압 전력기기 개발을 위하여 절연설계기법에 관한 연구를 지속적이고 체계적으로 수행하고 있다.

전기 절연적으로 신뢰성이 높은 기중절연 전력기기를 개발하기 위해서는 기중에서의 절연파괴특성 분석을 통한 절연설계기술 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 기중에서의 임펄스 전압에 의한 절연파괴특성 분석을 위하여 4종류의 구 대 평판 모의전극을 설계, 제작하였으며 구 전극 직경과 전극 간 갭간격의 변화에 따른 임펄스 절연파괴실험을 수행하였다. 이와 같은 실험을 통하여 얻은 절연파괴전압값으로부터 전계 이용률에 대한 절연파괴특성의 변화를 살펴보았다.

2. 모의전극의 설계 및 제작

기중에서의 임펄스 전압에 대한 절연파괴특성을 분석하기 위하여 구 대 평판 모의전극을 설계, 제작하였다. 다양한 전계 이용률에서의 절연파괴특성을 살펴보기 위하여 4가지 직경을 가지는 구 전극을 설계하였으며, 전극 간의 갭간격을 45mm내에서 조절할 수 있도록 하였다. 이와 같이 설계된 모의전극의 사상을 다음의 표 1에 나타내었다. 모의전극은 절연파괴로 인한 손상을 최소화하기 위하여 일반 금속에 비하여 경도 특성이 우수한 스테인레스 스틸을 사용하여 제작하였다.

그림 1에는 실제로 제작된 모의전극 시스템의 사진을 나타내었다. 모의전극에 대한 전계해석은 구 전극의 직경별, 전극 간 갭간격별로 유한요소 해석프로그램인 MAXWELL을 이용하여 수행하였다. 다음의 그림 2에는 직경 25mm인 구 전극에 1kV 크기의 전압을 입력하고 평판 전극에는 접지를 연결하였으며, 전극 간 갭간격을 10mm로 이격한

<표 1> 모의전극의 설계사양

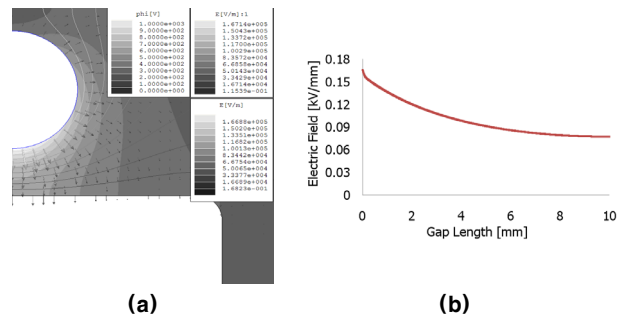
전극 재질	Stainless steel (SS)	
전극 구조	구 대 평판	
갭 간격 (mm)	10, 15, 25, 35, 45	
전극 직경 (mm)	구 전극	4, 13, 25, 50
	평판 전극	80



<그림 1> 제작된 구 대 평판 모의전극 시스템

경우의 전계해석 결과를 나타내었다. 그림 2(a)와 같은 구조에서 구 전극과 평판 전극 사이에 최단거리의 직선 선분을 가정하고, 이 가상의 직선 상에서의 전계분포 계산 결과를 그림 2(b)에 나타내었다. 그림 2(b)를 통하여 그림 2(a)와 같은 모의전극 구조에서의 최대전계와 평균전계, 그리고 전계 이용률을 계산할 수 있었다. 여기에서 전계 이용률이란, 모의전극 시스템의 전계 평등도를 나타내는 값으로서 평균전계와 최대전계의 비로 나타내어지며, 0부터 1 사이의 값을 가지게 된다. 전계의 평등도가 높을수록 이용률은 1에 가까워지며 불평등도가 높을수록 이용률의 값은 작아져서 0에 가깝게 된다.

본 연구에 사용된 모의전극의 전계 이용률 크기를 표 2에 전극의 직경별, 갭 간격별로 구분하여 나타내었다. 표 2에 나타난 바와 같이 본 실험에서의 이용률 범위는 0.212에서부터 0.771까지로 비교적 넓게 분포하였다.

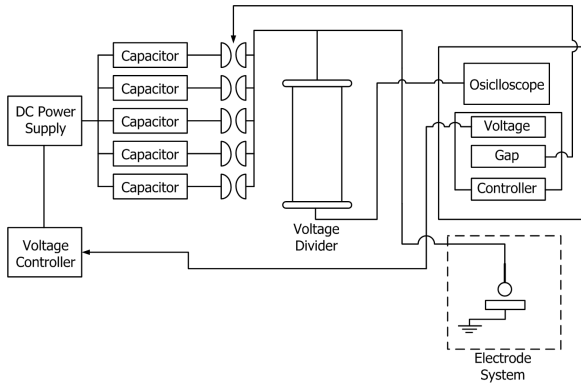


<그림 2> 구 대 평판 모의전극의 전계해석 결과 (구 직경 25mm, 갭 간격 10mm, 인가전압 1kV)

- (a) 구 대 평판 전극의 전계 해석결과
- (b) 구 전극과 평판 전극 간 최단 직선에서의 전계분포

<표 2> 전극 직경과 갭 간격에 따른 모의전극의 전계 이용률 변화

갭 간격 (mm)	10	15	25	35	45	
구 전극 직경 (mm)	4	0.212	0.158	0.108	0.086	0.074
	13	0.442	0.340	0.235	0.180	0.148
	25	0.621	0.516	0.391	0.316	0.269
	50	0.771	0.694	0.583	0.522	0.477



〈그림 3〉 임펄스 절연파괴실험 구성도

3. 임펄스 절연파괴실험

3.1 절연파괴실험 장비

송·배전계통에서는 뇌 방전에 의하여 과도적으로 지속시간이 짧은 뇌 서지라고 하는 고전압이 발생하게 된다. 일반적으로는 전력기기가 이러한 서지에 의하여 절연파괴되는 현상을 방지하기 위하여 서지전압을 인공적으로 모의하는 임펄스 절연파괴실험을 수행한다.

본 연구에서는 기중에서의 임펄스 절연파괴특성을 분석하기 위하여 용량이 15kJ이며 최고 출력전압은 360kV이고, 출력파형의 파두, 파미는 1.2/50μs인 임펄스 내전압 실험장비를 이용하여 절연파괴실험을 수행하였다. 절연파괴실험의 구성은 그림 3에 나타난 실험 구성도와 같이 임펄스내전압 실험장비의 출력단자를 구 전극에 연결하고 평판 전극은 접지하였다.

3.2 절연파괴실험 결과

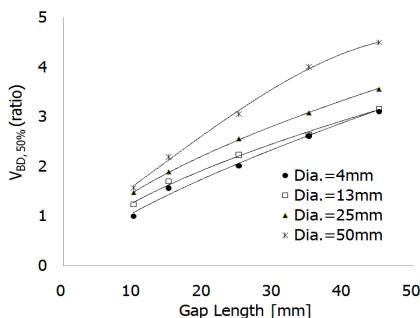
일반적으로 기중에서 AC전압에 의한 평등전계 갭에서의 절연파괴 전계식은 다음의 식 1과 같이 표현될 수 있다 [1], [2].

$$E_{BD} = 24.05\delta \left(1 + \frac{0.328}{\sqrt{\delta d}}\right) [kV/mm] \quad (1)$$

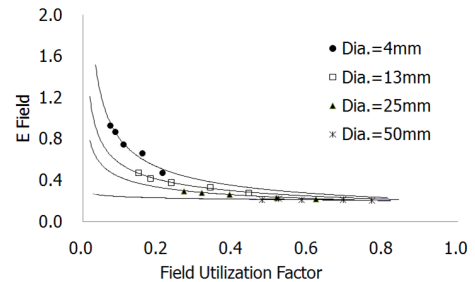
여기에서 δ 는 760Torr, 20°C 공기를 1로 했을 때의 상대적 공기밀도를 나타내며, d 는 전극 간의 갭간격을 나타낸다. 그러나 임펄스전압에 의한 절연파괴는 입력 전압파형이 동일하여도 파고값이 변하게 되면 전압인가시간으로부터 방전개시까지의 시간이 변하는 V-t 특성을 가지게 되며, 식 1과 같이 유도된 실험식이 알려져 있지 않다 [2].

절연파괴실험은 각 조건 당 7회씩 반복 실시하였으며, 결과값 중에서 최대값과 최소값을 제외한 5개의 데이터만을 선택하여 분석하였다. 다음의 그림 4에는 갭간격에 따른 50%의 확률을 가지는 절연파괴 전압값의 변화를 나타내었다. 여기에서 모든 실험 결과값은 직경이 4mm인 구 전극이 갭간격 10mm 이격되었을 경우의 절연파괴전압값을 기준으로 하여 그에 대한 비율로 나타내었다.

실험 결과, 절연파괴전압값은 갭간격과 비례하여 지수함수적으로 증가함을 알 수 있었는데 특히, 구 전극의 직경이 50mm인 경우에는 상대적으로 직경이 작은 구 전극에 비하여 갭간격이 증가할수록 절연파괴전압값이 포화되며 증가하는 특성을 보였다. 이러한 결과를 갭간격에 대한 최대전계값의 변화로 표시하면, 그림 5에서 보는 바와



〈그림 4〉 50% 확률의 임펄스 절연파괴전압값



〈그림 5〉 전계 이용률에 따른 최대전계값의 변화

같이 절연파괴 최대전계값은 전계 이용률이 작아짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 구 전극의 직경이 50mm인 경우에는 갭간격의 변화와 관계없이 절연파괴 최대전계값의 크기가 거의 일정하게 유지된다는 것을 알 수 있다.

4. 실험결과 분석

앞서 제 3장에서 살펴본 바와 같이 기중에서의 절연파괴 최대전계는 갭간격에 따라 변화한다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 기중에서의 절연파괴 기준전계특성을 보다 구체적으로 분석하기 위하여 전계 이용률과 절연파괴 최대전계값 변화의 상관관계를 살펴보았다. 그러나 본 연구에 사용된 전극지지대는 전극 간 갭간격을 최대 45mm 이내에서만 조절할 수 있도록 제작되었기 때문에 각 구 전극의 직경 당 다양한 전계 이용률에 대한 실험을 수행할 수 없었다. 따라서 추세를 통하여 절연파괴 최대전계값을 예측하였으며, 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 절연파괴 최대전계값은 구 전극의 직경이 작을수록, 전계 이용률이 작을수록 지수함수적으로 더욱 크게 증가한다는 사실을 알 수 있다. 또한, 구 전극의 직경이 50mm이상일 경우에는 전계 이용률의 변화와 관계없이 거의 일정한 값을 가진다는 사실을 알 수 있다. 기중에서 이러한 구 전극의 직경과 전계 이용률에 대한 절연파괴특성을 보이는 것은 구 전극의 직경이 클 경우에는 직경이 작은 경우에 비하여 갭간격 증가에 따른 절연파괴전압의 포화특성이 크게 나타나기 때문이다. 이러한 절연파괴전압의 포화특성은 크게 두 가지 원인에 기인한 것으로 판단된다. 첫 번째는 전극의 면적효과에 의한 것으로서 구 전극의 면적이 클수록 자유전자가 구 전극의 표면에 많이 분포하게 되므로 면적이 작은 전극에 비하여 전자가 쉽게 방출되어 절연파괴현상이 용이하게 발생하는 것으로 판단된다 [2]. 두 번째는 평등전계에 가까울수록 갭 사이에 일정 크기 이상의 전압이 인가되면 바로 절연파괴가 발생하는 특성이 있는데, 이러한 이유로 인하여 직경이 큰 구 전극일수록 평등전계에 가까워져서 절연파괴전압값의 포화특성이 잘 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기중에서의 절연파괴 기준전계특성을 분석하기 위하여 구 대 평판 모의전극 시스템을 설계, 제작하고 임펄스 절연파괴실험을 수행하였다. 실험 결과, 절연파괴전압은 면적효과에 의해서 구 전극의 직경이 클수록, 그리고 갭간격이 증가함에 따라 빠르게 포화된다는 사실을 알 수 있었다. 또한 절연파괴 최대전계는 전계 이용률이 작을수록 지수함수적으로 크게 증가하며, 구 전극의 직경이 어느 정도 이상으로 커지게 되면 평등전계의 특성과 면적효과에 의하여 이용률과 무관하게 거의 일정한 상수 값을 가지는 사실을 확인할 수 있었다.

향후 실험 결과의 신뢰성을 보다 향상시키고 실제 전력기기의 절연설계기법 정립을 위하여 다양한 구 전극의 직경과 전극 간 갭간격에서의 절연특성 실험을 수행할 계획이다.

이러한 연구결과는 변압기와 차단기와 같은 당사의 기중 절연을 이용하는 고전압 전력기기 절연설계에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] David K. Cheng, "Fundamentals of Engineering Electromagnetics", 반도출판사, 1995.
- [2] 林泉, "고전압 플라즈마 공학", 통일출판사, 2003.
- [3] Yasuo Nishikori, Soji Kojima, and Teruya Kouno, "A Study of the Field Utilization Factor and the Maximum Electric Field at Sparkover of the Standard Sphere Gaps", Electrical Engineering in Japan, vol. 139, No. 4, pp. 399-404, 2002.