

고전압 전력기기 개발을 위한 기중 절연파괴특성 분석에 관한 연구

논 문
60-5-16

A Study on the Lightning Impulse Dielectric Characteristics of Air for the Development of Air-Insulated High Voltage Apparatuses

남 석 호* · 장 형 구†
(Seok Ho Nam · Hyoungku Kang)

Abstract - The accidents caused by dielectric instability have been increasing in power grid. It is important to enhance the dielectric reliability of a high voltage apparatus to reduce the damage from electrical hazards. To develop an electrically reliable high voltage apparatus, the experimental study on the electrical breakdown field strength is indispensable, as well as theoretical approach. In this paper, the lightning impulse breakdown characteristics considering utilization factors are studied 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 several kinds of sphere-plane electrode systems made of stainless steel. As a result, it is found that dielectric characteristics are affected by not only maximum electric field intensity but also utilization factors of electrode systems. The results are expected to be applicable to designing the air-insulated high voltage apparatuses.

Key Words : Electrical breakdown, High voltage apparatus, Lightning impulse breakdown voltage, Utilization factor

1. 서 론

전력계통 내에 설치되어 있는 전력기기에서 발생하고 있는 절연사고로 인한 경제적, 인명적 피해는 매년 증가하고 있는 실정이다. 이와 같은 대응등급 차단기와 변압기, 그리고 배전반 등과 같은 고전압 환경 하에서 운전되고 있는 전력기기의 전기적 신뢰성 향상을 위해서는 전계해석을 통한 축소형의 절연설계가 필수적이다. 일본과 독일 및 미국 등과 같은 기술 선진국에서는 고전압 전력기기 개발을 위하여 절연설계기법에 관한 연구를 지속적이고 체계적으로 수행하고 있으나 국내에서는 이에 대한 체계적 연구가 아직 미흡한 실정이다 [1, 2]. 전기 절연적으로 신뢰성이 우수한 기중 절연 전력기기를 개발하기 위해서는 기중에서의 절연파괴특성 분석을 통한 절연설계기술 연구가 반드시 선행되어야 할 것이다.

현재까지 기중 절연을 사용하고 있는 전력기기의 절연설계를 위한 기준전계의 크기는 일반적으로 3kV/mm인 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 이와 같은 기준이 실제로 기중 절연을 이용하는 전력기기를 개발하기 위한 절연설계에 이용되고 있다.

본 연구에서는 5가지 종류의 스테인레스 스틸 재질 구 대 평판 전극을 제작하고 뇌임펄스 전압에 대한 절연파괴특성을 측정하고 분석하였다. 뇌임펄스 전압에 대한 절연내력실

험은 구 전극의 직경과 전극 간 갭간격을 다양하게 변화시키면서 실행하였다. 이와 같은 절연내력실험을 통하여 얻은 실험결과를 이용하여 Weibull 분포해석을 통하여 절연파괴 확률이 50%인 절연파괴전압값을 계산하였다. 고전압 전력기기의 운전 시 절연파괴현상이 발생하면 그로 인하여 사고가 야기되므로 본 연구에서는 주로 고장해석을 위해 사용되고 있는 Weibull 분포해석을 통하여 실험결과를 분석하고 해석하였다.

또한, 5가지 종류 구 대 평판전극시스템 각각의 조건에 대하여 유한요소해석을 실시하여 전계 이용률과 절연파괴 시의 최대전계값을 계산하고, 앞서 계산한 절연파괴전압값을 이용하여 분석하였다. 이와 같은 연구를 통하여 최대전계와 전계 이용률 사이에 함수관계가 성립한다는 사실을 알 수 있었으며, 그로 인하여 기중에서의 뇌임펄스 전압에 대한 절연파괴특성을 분석할 수 있었다. 즉, 기중에서의 뇌임펄스 전압에 대한 절연파괴특성은 최대전계값에 의하여 결정되며, 최대전계값은 전계 이용률에 대한 함수로 표현된다는 사실을 밝혀내었다.

이와 같은 연구 결과는 변압기와 차단기, 배전반 등과 같이 기체를 이용하는 전력기기의 절연설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 모의전극의 설계 및 제작

기중에서의 뇌임펄스 전압에 대한 절연내력실험을 수행하기 위하여 구 대 평판 형상의 모의전극을 설계, 제작하였다. 본 실험에서는 구 전극의 직경과 구 전극과 평판 전극 간의 간격을 변화시켜줌으로서 전계 이용률의 크기를 다양하게

* 준 회원 : 충주대 첨단과학기술대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 충주대 첨단과학기술대 전기공학과
전임강사

E-mail : kang@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 2월 10일

최종완료 : 2011년 4월 25일

표 1 전극시스템의 사양

Table 1 Specifications of the electrode systems

전극의 재질	스테인레스 스틸
전극의 종류	구 대 평판 전극
전극 간 간격 (mm)	10, 20, 30, 40
구 전극의 직경 (mm)	6, 10, 20, 50, 60
평판 전극의 크기 (mm)	직경: 200, 두께: 10, 곡률반경: 5

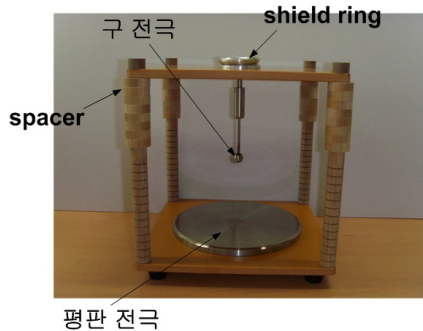


그림 1 구 대 평판 전극시스템의 구조
Fig. 1 Structure of sphere-to-plane electrode system

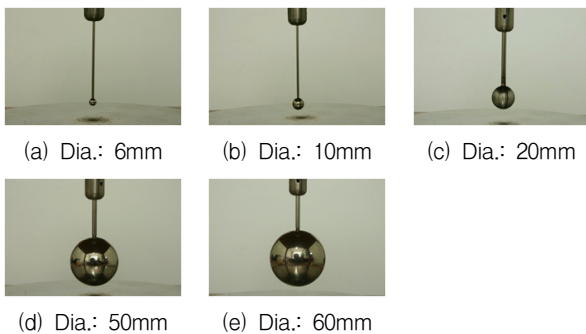


그림 2 직경에 따른 구 전극의 모습
Fig. 2 Sphere electrodes according to diameter

조절하였다. 위의 표 1에는 본 실험에 사용된 구 대 평판 전극시스템의 사양을 나타내었다. 또한, 위의 그림 1에는 실제로 제작된 구 대 평판 전극시스템의 모습을 나타내었다. 그림 1에서 ‘spacer’란 전극 간의 간격을 조절하기 위한 도구이며, ‘shield ring’이란 구 전극에 고전압을 인가할 때 날카로운 접합부 형상에 의한 최대전계의 국부적 상승을 완화하기 위한 장치이다. 또한, 그림 2에는 실험에 사용된 직경이 서로 다른 5가지 구 전극의 모습을 나타내었다.

3. 전계해석 및 이용률 계산

일반적으로 기체 절연매질의 절연내력특성은 전극시스템에서의 최대전계의 크기에 의해서 결정된다고 알려져 있다

[3]. 일반적으로 기중에서의 절연파괴는 전극시스템에서의 최대전계 크기가 3kV/mm 이상일 때 발생한다고 알려져 있다. 특히 기중에서 AC 전압에 의한 평등전계 사이에서의 절연파괴 전계는 다음의 식 (1)과 같이 나타내어진다 알려져 있다 [4].

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

여기에서 δ 는 1기압, 20°C의 공기를 1로 하였을 때의 상대적 공기밀도를 나타내며, d 는 전극 간의 갭간격을 나타낸다. 이때, 기압을 pTorr라 하고 기온은 t°C라고 한다면 상대적 공기밀도는 다음의 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\delta = \left(\frac{0.386 \times p}{273 + t}\right) \quad (2)$$

그러나 침 전극과 같이 전극의 직경에 비하여 전극 간격이 대단히 큰 전극 구조에서는 AC 전압에 의한 절연파괴 전압식은 다음의 식 (3)과 같이 알려져 있다 [4].

$$V_{AC} \approx 18 + 5.0 \times d \quad (3)$$

여기에서 전극 간격 d 는 30에서 300cm 정도의 범위인 것으로 발표되었으며, 이 때 기압은 760Torr, 절대 습도는 15 g/m³이다. 또한, 봉 대 평판 전극 구조에서 개폐임펄스 전압에 대한 절연파괴전압은 전극 간격이 2에서 8m 인 경우에는 다음의 식 (4)와 같이 표현된다고 알려져 있다 [4].

$$V_{Imp.} \approx 500 \times d^{0.6} \quad (4)$$

이러한 식 (1)과 식 (3), 그리고 식 (4)는 AC 전압이나 개폐임펄스전압의 특정 조건에 해당하는 결과이며 뇌임펄스 전압에 대한 절연파괴에 대해서는 이와 같은 발표가 많이 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 기중에서 뇌임펄스전압에 대한 절연파괴특성과 전계 이용률이 가지는 관계를 살펴보았다. 이와 같은 절연파괴특성과 전계 이용률의 함수관계를 이용한다면, 실험을 수행하지 않고 유한요소해석법을 이용한 계산만을 통하여 기체 절연매질의 절연파괴전압값을 계산할 수 있을 것이다.

3.1 전계해석

위의 표 1에 제시한 구 대 평판 전극시스템에서 각각의 조건에 대한 전계해석은 유한요소해석법을 이용하였다. 실제로 실험에 사용된 구 대 평판 전극시스템은 비교적 간단한 구조를 가지고 있으므로 편의상 전극시스템의 중앙을 중심으로 한 축대칭 구조를 가지는 2차원 해석을 수행하였다. 해석 시 구 전극에는 1kV의 전압을 인가하였으며 평판 전극은 접지하였다. 이와 같이 유한요소해석을 통하여 구 전극에 1kV를 인가하여 구한 최대전계값 ($E_{MAX, 1kV}$)과 절연내

력실험과 Weibull 분포해석을 통하여 얻은 절연과피확률이 50%인 절연과피전압 ($V_{BD,50\%}$)을 곱하여 절연과피 시의 최대전계값 ($E_{MAX,BD,50\%}$)을 계산하였다. 일반적으로 Weibull 분포해석은 고장해석에 주로 사용되고 있다. Weibull 분포해석을 이용하여 고전압 전력기기를 설계, 제작한다면 절연과피전압을 사고 개념에서 접근할 수 있으므로 전력기기의 안정성 및 신뢰성 향상에 큰 도움이 될 수 있다. 이와 같은 의미에서 고전압 전력기기를 제작하는 여러 중전기업체에서는 고전압 전력기기의 절연사고로 줄리기안전율을 확보하기 위하여 Weibull 분포를 이용하여 절연실험 데이터를 처리하고 있으며, 실제로 사고 확률이 1에서 2% 정도가 되도록 제품을 설계하고 있다. 그러나 본 논문에서는 실제로 구체적인 고전압 전력기기를 설계, 제작하는 것이 아니므로 평균값과 유사한 결과를 가지는 50%의 절연과피 확률을 가지도록 계산하였다.

또한, 구 전극에서 $E_{MAX,1kV}$ 가 발생하는 지점에서부터 평판 전극까지의 전위경도가 수직인 경로를 따라 발생하는 전계값의 크기를 구하여 산술적인 평균전계값 ($E_{mean,1kV}$)을 계산하였다. 그림 3에는 구 전극의 직경이 60mm이고 전극 간의 간격이 40mm인 전극시스템의 유한요소해석결과를 나타내었다. 그림에서 구 전극과 평판 전극 사이의 'D'는 전극시스템의 평균전계를 구하기 위하여 전위경도에 수직인 경로를 나타낸다.

3.2 이용률 계산

이용률이란, 어떠한 전극시스템에서의 최대전계에 대한 평균전계의 비로서 전극시스템의 전계 평등도를 나타내는 값을 의미하며, 범위는 0에서부터 1까지이다 [2, 3, 5, 6]. 즉, 이용률은 다음의 식 (5)를 이용하여 구할 수가 있다.

$$\xi = \frac{E_{mean}}{E_{MAX}} \quad (5)$$

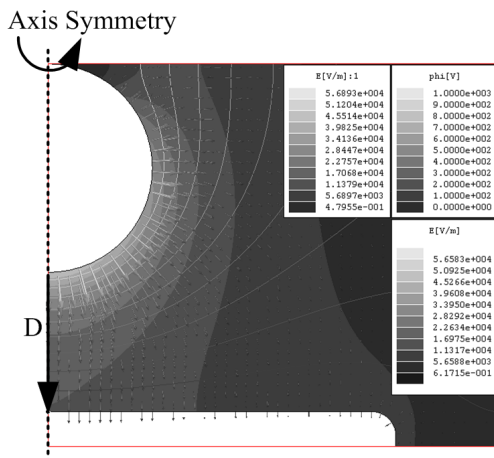


그림 3 구 대 평판 전극시스템의 유한요소해석 결과
Fig. 3 FEM analysis result of a sphere-to-plane electrode system

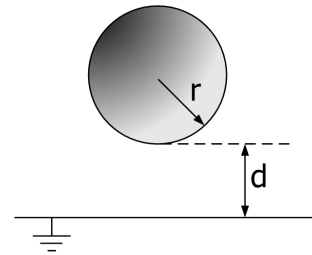


그림 4 구 대 평판 전극시스템
Fig. 4 Sphere to plane electrode system

표 2 구 대 평판 전극시스템의 이용률

Table 2 Utilization factors according to electrode systems

p	ξ	p	ξ	p	ξ
1.0	1.0	1.8	0.6248	6.0	0.1790
1.1	0.9367	1.9	0.5936	7.0	0.1521
1.2	0.8795	2.0	0.5649	8.0	0.1322
1.3	0.8273	2.2	0.5141	9.0	0.1169
1.4	0.7796	2.5	0.4515	10.0	0.1047
1.5	0.7358	3.0	0.3735	20.0	0.0512
1.6	0.6956	4.0	0.2754	50.0	0.0202
1.7	0.6587	5.0	0.2172	100.0	0.0100

표 3 전극시스템 조건에 따른 이용률

Table 3 Utilization factors according to electrode systems

전극 간 간격 \ 구 직경	구 직경				
	6 mm	10 mm	20 mm	50 mm	60 mm
10 mm	0.2146	0.3589	0.5453	0.7711	0.7990
20 mm	0.1440	0.2053	0.3621	0.5979	0.6350
30 mm	0.0841	0.1487	0.2730	0.5023	0.5344
40 mm	0.0734	0.1167	0.2215	0.4189	0.4608

절연과피현상을 결정하는데 가장 큰 역할을 하는 것은 절연체에 인가된 전계의 값이다. 전계는 전극 간의 거리에 전극의 형상에 따라 달라지는데, 일반적으로 공기 중에서는 가장 높은 최대전계에 의하여 결정되어지는 것으로 알려져 있다. 이러한 전극배치의 전계분포를 대표적으로 표현하는 파라미터로 이용률을 사용하게 되며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (5)에서 보는 바와 같이 이용률은 전압의 크기에 의존하지 않고 단지 전극의 형상과 배치에 의해서만 결정된다는 사실을 알 수 있다. 이때 평등전계의 이용률은 1이 되고 전계분포가 불평등할수록 0에 가까운 작은 값을 가진다. 본 연구에서 이용된 구 대 평판 전극과 같은 경우에는 일반적으로 고전압 측정에 주로 사용되고 있으며, 이때의 전계값은 간단한 식으로 표현될 수 없고 무한급수로 나타내어진다. 그림 4와 같은 구 대 평판 전극의 구조에 대한 이용률은 전하중첩법 등의 수치계산방법을 통하여 다음의 표 2와

같이 계산될 수 있다. 그림 4에서 r 은 구 전극의 반지름이며, d 는 구 전극과 평판 전극 간의 거리를 나타낸다. 또한 표 2의 p 는 다음의 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$p = 1 + \frac{d}{r} \quad (6)$$

본 연구에서는 이와 같은 계산법을 바탕으로 앞서 3.1절에서 설명한 바와 같이 유한요소해석법을 이용하여 계산한 $E_{MAX,1kV}$ 와 $E_{mean,1kV}$ 를 이용하여 전극시스템에서의 이용률을 계산하고 위의 표 3에 나타내었다. 위의 표 3에서 보는 바와 같이 구 직경이 클수록, 전극 간 간격이 작을수록 이용률은 커져서 전계 평등도가 상승하게 된다. 본 실험에 사용된 전극시스템의 이용률은 구 전극의 직경과 전극 간의 간격을 조절하여 0.0734에서부터 0.7990까지의 범위를 가짐으로서 포괄적인 이용률 범위에 따른 $E_{MAX,BD,50\%}$ 의 값을 계산할 수 있었다.

4. 절연내력실험

4.1 실험조건

본 연구에서는 일반적으로 전력기기가 설치되어 있는 실내의 환경과 유사한 25℃의 온도와 34%의 습도, 대기압 조건 하에서 수행되었다. 또한, 실험에 사용된 뇌임펄스 전원 공급장치에서 발생한 파형의 파두 T_1 은 1.2μs이고 파미 T_2 는 50μs였으며 오차는 ±5%로 측정되었다. 모든 실험은 각 조건 당 12회씩 반복하여 측정되었으며 그 중에서 최대값과 최소값을 제외한 10개의 측정값만을 이용하여 Weibull 분포 해석을 수행하고, 그 결과를 통하여 $V_{BD,50\%}$ 를 계산하였다. 침 대 평판 전극시스템과 같은 경우에는 전계 불평등도가 매우 높고 돌출부에서의 $E_{MAX,1kV}$ 가 매우 높지만 일반적으로 전력기기 내에서의 전극 구조와 같은 경우에는 shield ring 등을 이용하여 전계 불평등도가 침 대 평판과 같이 높지 않게 설계를 할 뿐만 아니라 $E_{MAX,1kV}$ 의 크기도 상대적으로 작은 값을 가지도록 설계된다. 또한, 구 대 평판 전극

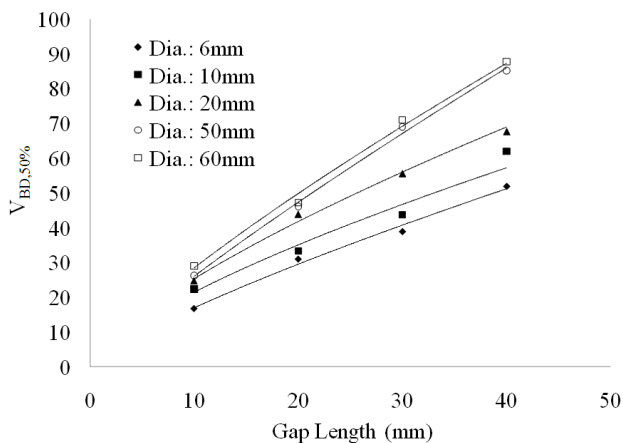


그림 5 구 대 평판 전극시스템의 기중 절연파괴전압
Fig. 5 Electrical breakdown voltage of air by using sphere-to-plane electrode system

시스템과 같은 구조에서는 전극 제작 상 발생하는 오차에 의한 실험결과의 변동이 크지 않을 뿐만 아니라 전극시스템 지지대의 오차로 인한 고전압이 인가되는 중심축의 변형으로 인한 전계의 왜곡률이 다른 전극시스템에 비하여 작다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 여러 가지 직경을 가지는 구 대 평판 전극시스템을 사용하여 절연내력 실험을 수행하였다.

4.2 실험결과

그림 5에는 구 전극의 직경과 전극 간의 간격에 따른 $V_{BD,50\%}$ 를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 절연파괴전압값은 구 전극의 직경이 클수록, 전극 간의 간격이 클수록 높게 나타난다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 구 전극의 직경이 50mm 이상인 범위에서 절연파괴전압값의 크기가 포화한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 사실은 기존에 알려져 있는 체적효과로 설명될 수 있다 [3].

4.3 실험결과 분석

본 논문에서는 5가지 서로 다른 직경을 가지는 스테인레스 스틸 재질의 구 대 평판 전극시스템을 이용하여 전극 간 간격 조절을 통하여 여러 가지 이용률에 따른 절연파괴 시 최대전계값의 변화를 살펴보았다. 이미 알려진 바와 같이 절연파괴특성은 전극의 표면 조도와 공기 중에서의 수분 상태, 이물질 존재 여부 등에 따라 다소 변화할 수 있지만 본 연구에서는 이와 같은 외부 요인은 고려하지 않았다 [5, 6]. 뇌임펄스 전압에 대한 절연내력특성 실험을 통하여 측정된 $V_{BD,50\%}$ 와 유한요소해석 시 1kV를 구 전극에 입력하여 얻은 $E_{MAX,1kV}$ 를 이용하여 절연파괴확률이 50%인 경우의 최대전계인 $E_{MAX,BD,50\%}$ 를 구하였다. 이와 같은 관계는 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{MAX,BD,50\%} = V_{BD,50\%} \times E_{MAX,1kV} \quad (7)$$

절연내력특성 실험을 통하여 계산한 절연파괴전압값과 유한요소해석 결과를 식 (7)에 대입하여 표 2에 나타낸 각 이용률에 대한 $E_{MAX,BD,50\%}$ 를 계산하였다. 이와 같은 과정을 통하여 계산된 결과를 이용률과 $E_{MAX,BD,50\%}$ 에 대하여 정리한 결과가 다음의 그림 5이다. 식 (7)에서 보는 바와 같이 $E_{MAX,BD,50\%}$ 는 $V_{BD,50\%}$ 와 $E_{MAX,1kV}$ 의 곱으로 표현되므로 이용률의 크기가 작아질수록 $E_{MAX,1kV}$ 가 더욱 증가하여 불평등도가 높아짐을 의미한다. 또한, 이용률의 크기가 증가할수록 $E_{MAX,BD,50\%}$ 의 크기는 지수함수적으로 작아져서 3kV/mm에 가깝게 수렴하는 사실을 알 수 있었다. 그림 5와 같이 도식화하여 나타낸 $E_{MAX,BD,50\%}$ 와 이용률의 함수관계를 식 (8)과 같이 추세선을 이용하여 유도하였다. 식 (8)에서 ξ 는 이용률, y_0 는 1, A_1 은 11.244, x_0 는 0.06, t_1 은 0.06542, A_2 는 7.29이며, t_2 는 0.69의 값을 가진다.

$$E_{MAX,BD,50\%} = y_0 + A_1 \times \exp(-(\xi - x_0)/t_1) + A_2 \times \exp(-(\xi - x_0)/t_2) \quad (8)$$

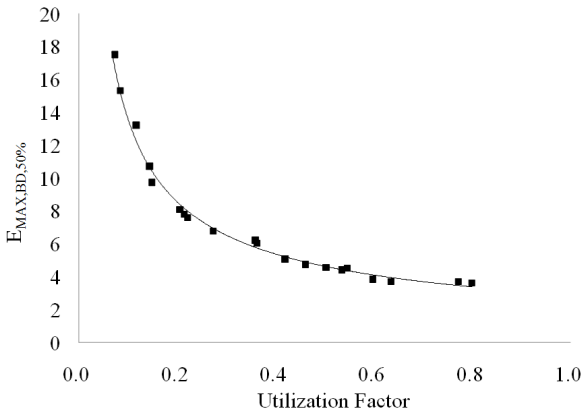


그림 6 공기의 이용률과 $E_{MAX,BD,50\%}$ 간의 함수관계
 Fig. 6 Functional relation between $E_{MAX,BD,50\%}$ and utilization factor in air

그림에서 보는 바와 같이 공기 중에서의 구 대 평판 전극 시스템의 뇌임펄스 전압에 대한 절연과피특성은 이용률과 $E_{MAX,BD,50\%}$ 에 관한 함수로 표현될 수 있음을 확인할 수 있다. 이용률이 0.0734인 경우에는 $E_{MAX,BD,50\%}$ 의 값이 17.53kV/mm이며, 이용률이 0.7990일 때에는 $E_{MAX,BD,50\%}$ 값이 3.64kV/mm까지 감소하는 것을 알 수 있었다. 고전압 전력기기의 개발을 위해서는 전극의 불평등도가 높으면 부분방전과 같은 현상으로 인하여 전력기기의 안정성이 저하될 수 있으므로 그림 1에서와 같은 shield ring과 같은 구조물을 이용하여 이용률이 높은 평등전계 구조를 가지도록 설계해야 한다. 따라서 그림 6에서 이용률이 0.5 이상의 준평등전계 구조에서 $E_{MAX,BD,50\%}$ 는 3.5kV/mm에서 4.5kV/mm 사이의 값을 가지므로 전력기기의 설계 시 참고할 수 있을 것이다. 또한, 부득이하게 이용률이 작게 설계된 경우에는 이용률의 크기에 해당하는 $E_{MAX,BD,50\%}$ 의 값을 식 (8)을 통하여 계산한다면 안정성이 높은 전력기기의 절연설계가 가능할 것이다.

5. 결 론

배전반과, 변압기, 그리고 차단기와 같은 고전압 전력기기는 주로 공기나 SF₆, 또는 CF₄ 등과 같은 기체 절연매질을 이용한 절연방법을 사용한다. 따라서 이와 같이 기체 절연매질을 사용하는 전력기기의 절연설계를 위해서는 절연내력 특성 분석에 관한 선행 연구가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 고압배전반이나 기중차단기와 같이 절연매질로서 공기를 사용하는 전력기기의 절연설계를 위하여 공기 중에서의 뇌임펄스 전압에 대한 절연내력특성에 관한 연구를 수행하였다. 결과적으로 기중에서 절연과피는 전극시스템의 이용률과 밀접한 관계를 가지고 있다는 사실을 증명하였다. 즉, 기중에서 절연과피 시의 최대전계값은 전극시스템의 전계 평등도를 나타내는 이용률이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 또한, 이용률의 크기가 작은 전극시스템에서는 절연과피 시 최대전계값이 18kV/mm 이상 증가한다는 것을 알 수 있었으며, 이용률이 0.5 이상이

되는 준평등전계를 가지는 전극시스템에서는 최대전계값이 3.5kV/mm에서 4.5kV/mm 사이의 값으로 포화된다는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 공기를 절연매질로 사용하는 고압배전반과 기중차단기와 같은 기기는 본 연구에서 제시한 이용률로 표현되는 절연과피 시 최대전계에 대한 실험식을 이용한다면, 설계 시 절연내력특성 실험을 수행하지 않고도 전기적 안정성이 높으면서도 부피가 작은 축소형의 전력기기를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2010-0003558)

참 고 문 헌

- [1] Hyoungku Kang, Chanjoo Lee, Tae Kuk Ko, and Bok-Yeol Seok, "Electrical Breakdown Characteristics of Super-conducting Magnet System in Sub-Cooled Liquid Nitrogen", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1509-1512, 2007.
- [2] Hyoungku Kang, Jin Bae Na, Yoon Do Chung, Min Cheol Ahn, Duck Kweon Bae, and Tae Kuk Ko, "Study on the Breakdown Voltage Characterization of Insulation Gases for Developing a High Voltage Superconducting Apparatus", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1646-1649, 2010.
- [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.
- [4] 林泉, "고전압 플라즈마 공학," 동일출판사, pp. 58-61, 1996.
- [5] 강형구, 고태국, "이용률을 이용한 과냉질소 냉각시스템용 절연가스의 절연특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지. Vol. 12, No. 1, Mar, pp. 52-55, 2010.
- [6] 宅間 董, 柳父 悟, 高電壓大電流工學, 電氣學會. pp. 8-10, 1993.
- [7] Nitta and Shibuya, "Electrical Breakdown of Long Gaps in Sulfur Hexafluoride", IEEE Trans. PAS. vol. 90, no. 3, pp. 1065-1071, 1971
- [8] Jin Bae Na, Hyoungku Kang, Young Jin Hwang, Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Duck Kweon Bae, and Tae Kuk Ko, "Experimental Study on the Electrical Breakdown Characteristics of Sub-Cooled Liquid Nitrogen for Designing a High Voltage Superconducting Machine", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1662-1665, 2010.
- [9] 류엔반둥, 정종만, 백승명, 이창화, 석송희, 김상현, "고

온초전도 변압기를 위한 액체질소 중 절연파괴, V-t, 열화 특성”, 대한전기학회논문지. Vol. 53C, No. 6, June, pp. 316-323, 2004.

- [10] 최재형, 최진욱, 이해근, 송정빈, 김해중, 성기철, 김상현, "고온초전도 시스템 냉각용 고화질소의 기초 절연 특성", 대한전기학회논문지. Vol. 58, No. 1, Jan, pp. 132-136, 2009.
- [11] 최재형, 광동순, 천현권, 민치현, 김해중, 김상현, "600kJ 급 전도냉각 HTS SMES의 미니모델 제작 및 절연평가", 대한전기학회논문지. Vol. 56, No. 3, Mar, pp. 588-593, 2007.
- [12] Jin Bae Na, Hyoungku Kang, Young Jin Hwang, Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Duck Kweon Bae, and Tae Kuk Ko, "Experimental Study on the Electrical Breakdown Characteristics of Sub-Cooled Liquid Nitrogen for Designing a High Voltage Superconducting Machine", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1662-1665, 2010.
- [13] H. Kang, J. B. Na, M. C. Ahn, D. K. Bae, Y. H. Kim, and T. K. Ko, "Study on the lightning impulse breakdown characteristics of gaseous insulation media for the design of a high voltage superconducting apparatus", Physica C, 470, pp. 1691-1694, 2010.
- [14] J. B. Na, H. Kang, K. S. Chang, Y. J. Kim, K. J. Kim, H. G. Lee, and T. K. Ko, "Experimental study on the dielectric characteristics of liquid nitrogen with respect to various pressures", Physica C, 470, pp. 1899-1903, 2010.
- [15] A. M. Cravath, L. B. Loeb, "The mechanism of the high velocity of propagation of lightning discharges," Journal of Applied Physics, Vol. 6, pp. 125-127, 1935.
- [16] D. Berg, C. N. works, "Effect of space charge on electric breakdown of sulfur hexafluoride in nonuniform fields", AIEE Trans. Vol. 77, pp. 820-823, 1958.

저 자 소 개



강형구 (姜亨求)

1973년 08월 04일생. 1997년 성균관대 공과대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사). 2005년 연세대 대학원 전기·전자공학과 졸업 (공학박사). 2005년~2009년 현대중공업 선임연구원, 2009년~현재 충주대 전기공학과 전임강사.

Tel : 043-841-5145
FAX : 043-841-5140
E-mail : kang@cjnu.ac.kr



남석호 (南碩昊)

1986년 05월 08일생. 2011년 충주대 첨단과학대학 전기공학과 졸업. 2011년~현재 충주대 전기공학과 대학원 석사과정.

Tel : 010-3109-2191
E-mail : sanranki@cjnu.ac.kr