

## Dry-air의 절연 특성 분석

방승민, 모영규, 이은유, 김준일, 강종오, 이홍석, 남석호<sup>1</sup>, 강형구\*  
한국교통대학교, 연세대학교<sup>1</sup>

### Analysis on the Dielectric Characteristics of Dry-air

Seungmin Bang, Young Kyu Mo, Onyou Lee, Junil Kim, Jong O Kang, Hongseok Lee, Seokho Nam<sup>1</sup>, Hyoungku Kang\*  
Korea National University of Transportation, Yonsei University<sup>1</sup>

**Abstract** - 최근 급격한 산업사회의 발달로 인해 전력기기의 종류와 설치개수가 꾸준히 증가하고 있다. 수많은 고전압 전력기기의 운용으로 인해 발생하는 온실가스는 지구온난화와 같은 환경파괴를 유발시키는 등의 문제를 발생시키고 있다. 고전압 전력기기의 전기적 절연을 위해 주로 사용되는 SF6와 같은 기체 절연체는 온실가스를 유발시키며, 현재 여러 나라에서는 고전압 전력기로부터 방출되는 CO2의 양을 최소화 하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 일본 교토에서 180여개의 국가가 온실가스 감축의 의무를 나누고자 교토의정서를 채택하였고, 온실가스를 유발하는 SF6를 대체할 수 있는 친환경 기체 절연체에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그 중에서도 본 연구에서는 친환경 기체 절연체인 Dry-air의 절연과외와 부분방전 개시전압 특성을 분석하였다. 다양한 구 전극의 크기와 전극 사이 간격 조건에서 AC 절연과외 및 부분방전 개시전압에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 산출한 전계 이용률을 고려하여 절연과외와 부분방전 개시전압에 대한 특성을 분석하였다. 실험결과, 구 전극의 크기와 전극 사이 간격이 증가할수록 절연과외와 부분방전 개시전압의 크기가 커지는 것을 알 수 있으며, 부분방전이 먼저 개시되고 절연과외로 이어지는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 전계 이용률이 0.52 이상에서는 부분방전이 개시되지 않고 곧바로 절연과외로 이어지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 1. 서 론

최근 산업사회가 발달함에 따라 전력수요가 증가하게 되면서 대도시 또는 인구 밀집 지역에 대용량의 전력공급이 요구되고 있으며, 이에 따라 고효율·대용량뿐만 아니라 고 신뢰성의 고전압 전력기기가 해결책으로 대두되고 있다. 고전압 전력기기의 고장으로 인한 절연사고의 피해를 최소화 하고자 절연에 대한 연구가 진행 중이다.

전국각지로 고전압 전력기기의 설치개수가 증가함에 따라 전력기기의 운용 중에 발생하는 ohmic loss 등에 의해 많은 양의 온실가스가 만들어진다. 이는 지구온난화와 같은 환경파괴를 유발하는 등의 문제를 야기하므로 그에 따른 대책이 시급하게 요구되고 있다. 고전압 전력기기에 사용되는 기체 절연체에는 다른 기체 절연체에 비해 절연내력이 우수한 SF6가 사용되어지고 있다 [1]. 하지만 SF6는 다른 기체 절연체에 비해 지구 온난화 지수 (GWP : Global Warming Potential)가 약 23,900배 높아 교토의정서에 의하여 사용이 제한되고 있다 [1]. 따라서 SF6를 대체할 친환경 기체 절연체에 대한 연구가 수행되어야한다.

절연사고를 일으키는 원인으로 크게 부분방전과 절연과외가 있다. 절연과외는 절연체의 절연강도보다 높은 전압에서 절연체를 통과하여 전류가 흘러 절연체에 손상을 주는 현상을 말하며, 두 전극이 완전히 전기적으로 도통되지 않은 상태에서 절연체 내의 공기 혹은 외부 기체에서 먼저 방전이 일어나는 현상을 부분방전이라 말한다. 특히, 절연과외와 비교하여 부분방전은 절연과외보다 낮은 전압에서 먼저 발생되며 방전노화현상으로 인해 절연체의 고유 절연내력 특성을 저하시킨다. 그러므로 절연과외뿐만 아니라 부분방전의 발생을 사전에 방지하기 위해서는 부분방전 개시전압의 특성을 분석하는 것이 매우 중요하다 [2].

본 연구에서는 Dry-air의 절연과외 전압과 부분방전 개시전압에 대한 특성을 분석하였다. 또한, 구 전극 직경과 전극 사이 간격에 따른 유한요소해석을 수행하였으며, 절연과외와 부분방전 개시전압의 이용률과의 연관성을 비교·분석하였다.

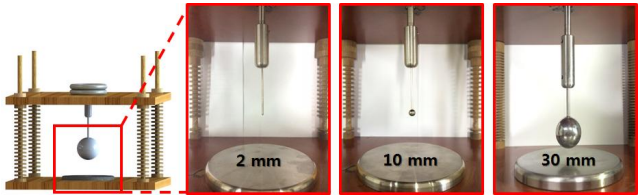
#### 2. 실험장치 및 방법

##### 2.1 전극시스템 구성

Dry-air의 구 전극 직경과 전극 사이 간격의 증가에 따른 절연과외와 부분방전 개시전압에 대한 특성을 분석하기 위해 다양한 형상을 가지는 구 대 평판 전극시스템을 설계·제작하였으며, 그림 1에 나타내었다.

<표 1> 전극시스템 사양

전극 재질	Stainless Steel
전극구조	구 대 평판
전극 간격 (mm)	30, 40, 50, 60
구 직경 (mm)	2, 10, 30
평판 전극(mm)	직경 120, 두께, 10, 곡률반경 5

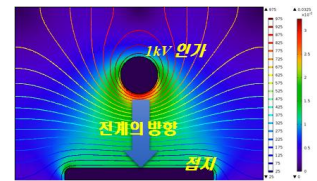


<그림 1> 구 대 평판 전극 시스템

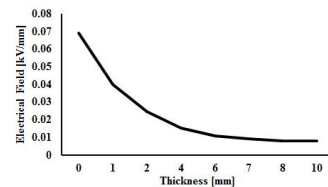
전극은 기계적 강도가 우수하며 AC전압 실험에서도 전극표면의 손상이 최소화될 수 있는 스테인리스 스틸 재질로 제작했으며, 구 대 평판 전극 시스템의 상세설명을 표 1에 나타내었다.

##### 2.2 유한요소해석을 통한 전계 이용률 산출

AC전압을 사용하여 구 전극 직경과 전극 사이 간격에 따른 다양한 전계 분포 특성을 살펴보기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구를 위해 사용된 구 대 평판 전극시스템은 간단한 구조를 가지고 있기 때문에 편의상 전극의 중앙을 중심으로 축대칭 구조를 가지는 2차원 구조로 해석하였다. 또한, 구 전극에 1 kV를 인가하였고 평판 전극은 접지하였으며, 구 전극에서 발생하는 전계는 전위가 같은 두 점을 통과하는 등전위면과 수직방향으로 진전하기 때문에 구와 평판 전극 사이의 수직방향에 대한 최대전계 및 평균전계를 계산하였다. 이렇게 산출된 최대전계와 평균전계의 비로 이용률을 산출하였으며, 표 2에 나타내었다 [3].



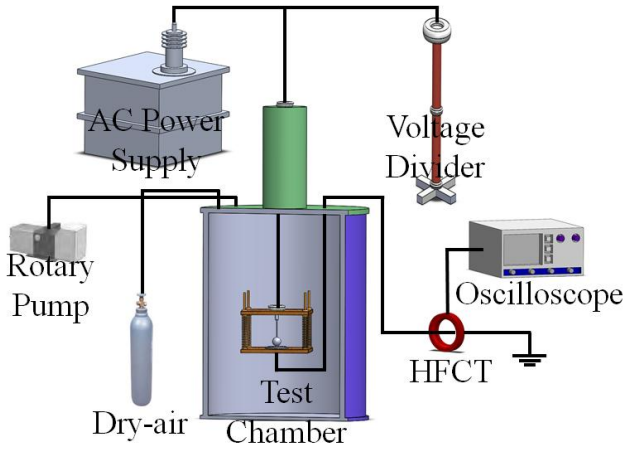
<그림 2> 구 직경 30 mm, 전극 간격 60 mm일 때의 유한요소해석



<그림 3> 구 전극과 평판 전극 간 최단 직선에서의 전계 분포

<표 2> 유한요소해석을 통해 산출한 전계 이용률

구 직경 \ 전극간격	2 mm	10 mm	30 mm
30 mm	0.141	0.395	0.657
40 mm	0.119	0.344	0.591
50 mm	0.103	0.313	0.544
60 mm	0.092	0.283	0.520



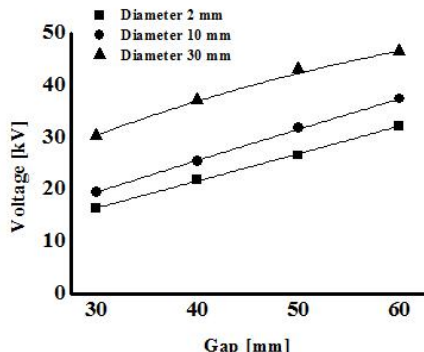
〈그림 4〉 실험개략도

### 2.3 고전압 실험 장비 구성 및 실험 방법

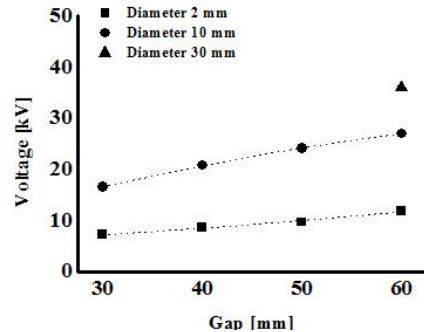
Dry-air의 AC전압에 대한 절연파괴와 부분방전 개시전압 특성을 살펴보기 위해 60 Hz, 100 kV / 60 kV의 용량을 가지는 AC 절연파괴 시험장치를 사용하였으며, 그림 4에 실험 개략도를 표현하였다. 구 대 평판 전극시스템이 설치되어 있는 Test Chamber에 존재하는 기체를 Rotary Pump로 20분간  $10^{-2}$  Torr까지 탈기시킨 후, Dry-air를 1기압까지 가압하여 실험을 수행하였다. 절연파괴 실험은 AC전압 시험장치를 통해 전압을 1 kV/s의 속도로 상승시키며 절연파괴 전압값을 측정하였다. 부분방전 실험은 절연파괴 실험 후, 전압을 0 kV부터 천천히 인가시키면서 MAGNELAB사의 HFCT (High Frequency Current Transformer)로 부분방전 개시전압을 측정하였고, 400 M/S, 100 MHz인 오실로스코프로 파형을 확인하였다. 실험은 표 1과 같은 실험조건에서 각 5회 반복하여 수행하였으며 구와 평판 전극 표면을 손상을 최소화하기 위해 샌드페이퍼 (CC261-800)를 사용하여 표면을 정리하고 알코올로 세척·건조시킨 후, 실험을 수행하였다.

### 2.3 실험 결과 및 분석

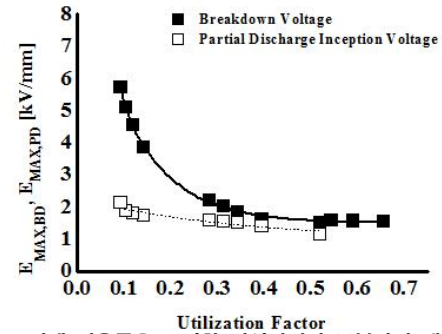
본 논문에서는 Dry-air의 절연파괴와 부분방전 개시전압에 대한 특성을 분석하였다. 실험결과, 구 전극의 크기와 전극 사이의 간격이 증가할수록 절연파괴와 부분방전 개시전압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 6에 나타낸 바와 같이 구 전극 직경이 30 mm일 때 전극 간격이 30 ~ 50 mm에서 부분방전이 개시되지 않고 곧바로 절연파괴가 발생하는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 그림 5와 6을 통해 살펴본 결과, 낮은 전압에서 먼저 부분방전이 개시되고 어느 특정 전압 이상에서 절연파괴로 발전하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 7에서는 전계 이용률을 고려하여 실험결과를 정리하였을 때의 절연파괴와 부분방전 개시전압의 특성을 나타내었다. 전계 이용률이 증가함에 따라 절연파괴 최대전계 ( $E_{MAX,BD}$ )와 부분방전 개시전압 최대전계 ( $E_{MAX,PDIV}$ )가 지수 함수적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 전계 이용률의 크기가 0.52 이상의 준 평등전계 범위에서는  $E_{MAX,BD}$ 와  $E_{MAX,PDIV}$ 의 크기가 약 1.5 kV/mm에서 더 이상 낮아지지 않고 포화하는 경향을 볼 수 있었으며 이는 부분방전이 발생하지 않고 곧바로 절연파괴가 발생하는 것을 의미한다. 그러나 0.52 이하의 전계가 평등하지 않은 범위에서는 먼저 부분방전이 발생하고 절연파괴가 발생하며, 구 전극의 크기가 작을수록  $E_{MAX,BD}$ 와  $E_{MAX,PDIV}$ 가 커지는 것을 볼 수 있었다. 이는 유한요소해석 시, 구 크기가 작을수록 구에 집중되는 최대전계의 크기가 크기 때문인 것으로 판단된다.



〈그림 5〉 Dry-air의 절연파괴 특성



〈그림 6〉 Dry-air의 부분방전 개시전압 특성



〈그림 7〉 전계 이용률을 고려한 절연파괴와 부분방전 개시전압 특성

## 3. 결 론

본 논문에서는 Dry-air에 대하여 구 전극의 직경과 전극 사이 간격을 증가시키면서 절연파괴와 부분방전 개시전압에 대한 특성을 분석하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 산출한 전계 이용률을 고려하여 절연파괴와 부분방전 개시전압에 대한 연관성을 비교·분석하였다. 실험결과, 구 전극의 크기와 전극 사이의 간격이 증가할수록 절연파괴와 부분방전 개시전압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 구 전극 직경이 30 mm일 때 전극 간격이 30 ~ 50 mm에서 부분방전이 개시되지 않고 곧바로 절연파괴가 발생하는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 낮은 전압에서 먼저 부분방전이 개시되고 어느 특정 전압 이상에서 절연파괴로 발전하는 것을 확인할 수 있었다. 전계 이용률을 고려하여 실험결과를 정리하였을 때의 절연파괴와 부분방전 개시전압의 특성을 나타내었다. 전계 이용률이 증가함에 따라  $E_{MAX,BD}$ 와  $E_{MAX,PDIV}$ 가 지수 함수적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 전계 이용률의 크기가 0.52 이상의 준 평등전계 범위에서는  $E_{MAX,BD}$ 와  $E_{MAX,PDIV}$ 의 크기가 약 1.3 kV/mm에서 더 이상 낮아지지 않고 포화하는 경향을 볼 수 있었으며 이는 부분방전이 발생하지 않고 곧바로 절연파괴가 발생하는 것을 의미한다. 그러나 0.52 이하의 전계가 평등하지 않은 범위에서는 먼저 부분방전이 발생하고 절연파괴가 발생하며, 구 전극의 크기가 작을수록  $E_{MAX,BD}$ 와  $E_{MAX,PDIV}$ 가 커지는 것을 볼 수 있었다. 이는 유한요소해석 시, 구 크기가 작을수록 구에 집중되는 최대전계의 크기가 크기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 산출한 전계 이용률 0.52 이상의 준 평등전계 조건에 따라 절연설계를 수행한다면 보다 높은 안정성의 고전압 전력기기 개발에 도움이 될 것이라 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2010년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지 기술 평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (NO. 20124030200040 / 2단계)입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 임창동, 유봉선, 박원욱, "Mg 산업에서 SF6 가스의 사용과 Global Warming", 한국주조공학회지, 23권, 3호, p.109, 2003.
- [2] N, P, Kolev, N. M. Chalashkanov, "Modelling of Partial Discharge Inception and Extinction Voltage Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)" International Conference on Solid Dielectrics, pp.605-608, July, 2007.
- [3] 강형구, 고태국 "과냉질소 냉각시스템 가압용 기체의 절연내력특성 분석", 한국초전도·저온공학회, Vol. 13, No.1, pp.27-30, March, 2011