

# 연면방전의 특성과 절연체의 영향 및 그 응용

## A Study on the Effects of Insulating Material Barrier on the Surface Creepage over Discharge

李 承 院\*  
(Sung Won Rhee)

### [ABSTRACT]

In the design of electrical equipment insulation, it is customary to place pressboard and other insulating material at right angle to the electrical discharge path, which is based on the insulation tests performed on equipment under various conditions such as types of insulation, applied voltage and other unique situations.

Since electrical equipment manufacturing started only recently, there is a scarcity of available data on insulation problems, which make it difficult for the design engineers.

The author undertook this study to provide such analytical design data for various conditions based on the experiment conducted on the equipment being manufactured, thus reducing possible errors in the process.

### 서 론

전기기기의 절연에 있어서 방전로와 직각으로 프레스·보드 등으로 절연물을 만들어 주는데 이것은 재료의 종류 및 형태, 인가전압의 종류, 그리고 그때 그때의 특수조건 아래서 행한 절연과피 실험에 근거를 두어야 한다.

우리나라에서 전기기기 제조 역사가 극히 짧기때문에 제작상 분석되는 모든 조건에 관한 실험치가 적어 각 제작소는 제작중 많은 고초를 겪고있는 형편이다. 그리하여 본인은 제작중 종합된 현상은 과학적으로 분석하여 각 경우에 따른 실험을 행하여 그 결과를 제시 함으로써 제작상의 과실을 덜어주고자 본 연구를 택한 것이다.

### 1. 절연재료의 전기적 특성

#### (1) 역률, 캐파시턴스, 유전체 상수

유전체의 전기적 특성을 조사하기 위하여 본 연구에

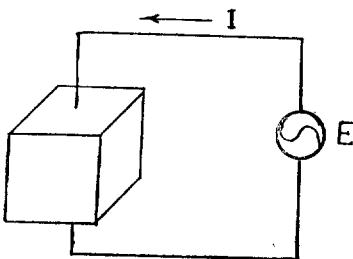


그림 1

서는 상·하면에 금속 전극을 붙인 입방체 모양의 유전체를 사용 하였다.

교류 전압이 전극에 인가되면 이 입방체를 전류가 흐르게된다. 이 전류는 두가지 성분으로 분석 되었는데 하나는 전압과 동위상이고 다른 하나는 전압보다 90°가 빠른 위상이었다. 전자는 손실 성분으로서 열로 변환되고, 후자는 용량성분이다.

표는 현재 국내에서 사용되고 있는 각종 유전체의 측정 결과인데 전 전류에 대한 손실성분의 비는 1% 정도였다. 그러므로 전기기기 제조에 있어서 이

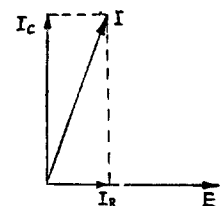


그림 2

점을 유의하여 전체손실 허용한도내에 이것이 포함되도록 하여야 할것이며, 특히 대형기의 유도시험에 있어서

\*正會員 : 서울工大 電氣工學科 教授

연면방전의 특성과 절연체의 영향 및 그 응용

표

재 료	유전상수	역 륵
기체	1.0	0.00
액체 변압기 유	2.2	0.001 (25°C)
Water(중류수)	80.0	—
고체 먼(Varnished)	4.6	0.07(20°C)
Maple(oil 함침)	3.5	—
종이(oil 함침)		
3-mm Rope 12499-1	3.1	0.003 (20°C)
5-mm Rope 4348-1	4.1	0.0035(20°C)
5-mm Varnished 994-1	3.2	0.004 (20°C)
26mm Crepe 7650-2		
Unstretched	3.4	0.003 (20°C)
Stretched 50%	2.8	0.002 (20°C)
Pressboard (oil 함침)	4.5	0.0056
	4.75	0.0070
	4.55	0.0115

는 이질 유의하여 착오가 없도록 하여야 될것이다. (유도시험기 용량조정).

그리고 용량성분은 여러가지 유전체가 전극간에 놓여지면 이의 결정은 대단히 복잡하게 되나 일반적으로

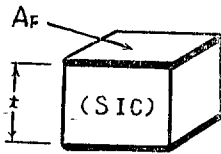


그림 3

$$\text{캐파시턴스} = \frac{0.86 \times \text{면적(SIC)cm}^2}{\text{두께(cm)}} \times 10^{-13} \text{ Farads}$$

의 식에 의하여 결정 지으면 되고, 충격과 전압 시험 시 고려되어야 될것이며, 그 실제 응용에 있어서는 세심한 주의를 하여야 할 필요가 있다.

(2) 파괴력

입방체의 절연 물질에 시험 고전압을 인가했더니 거의 순간적으로 비교적 작은 임피던스의 통로가 전극간에 형성되었다가 드디어는 파괴됨을 볼수있었다. 이 파괴 순간의 인가전압을 V라하고 그 물질의 두께를 t라고하면 이 물질은 V/t의 전위경도에서 파괴 된 것이다. 실험결과는 이 파괴전위경도가 자재의 두께에 따라 변할수있게 되었다. 또 절연체별로는 기체보다는 액체, 액체보다는 고체유전체가 더 높았다.

기체, 특히 공기의 절연파괴 작용에 대한 일반이론이 성립되어 있고 액체와 고체에 대해서도 몇가지 이론이 성립 되어 있으나 실제의 경우에 있어서 별로 도움이

되지 못한다. 그것은 실제로 사용하는 절연물질들이 대개 균등질이 아닐뿐만 아니라 순수한 물질일수 없기때문이다. 따라서 이 연구의 목적도 유전체 파괴에 있어서 원자와 분자를 취급하는 이론은 피하고 실험에 의해서 관찰된 파괴력과 파괴실험에서 결정된 실제 작용되는 이론만 적용시켜야 됨을 알게 되었다.

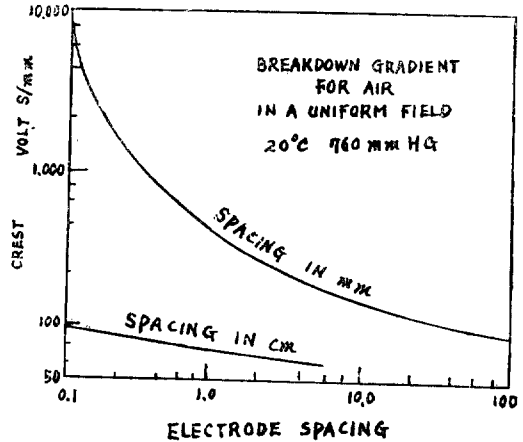


그림 4

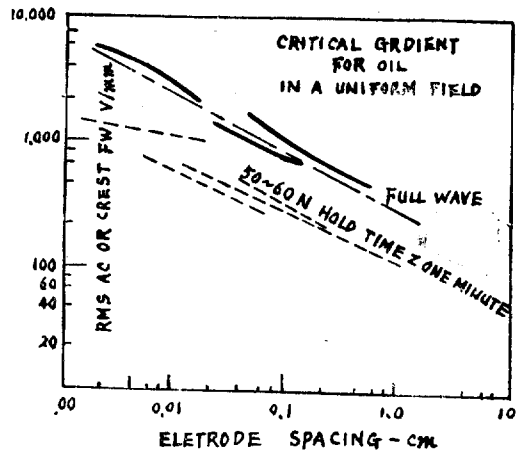


그림 5

그림은 일정한 stress 조건과 실온에서 공기, 변압기유 및 약간의 고체유전체들의 절연파괴력을 측정 한 결과이다. 이로부터 다음 몇가지의 현상을 알게 되었다.

1) 재료의 두께

일반적으로 파괴전위경도는 재료의 두께가 증가할수

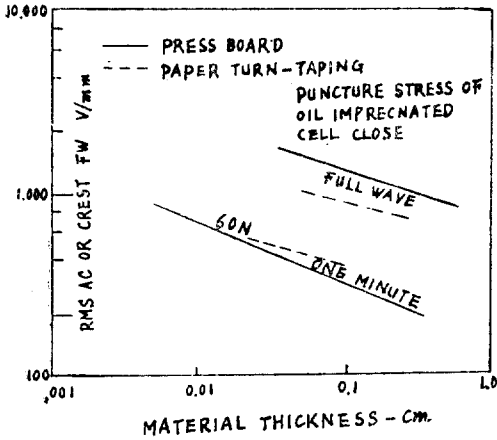


그림 6

특 감소한다.

2) 이 물질은 대개 재료를 약하게 한다. 액체속에서 용해된 기체, 수증기 및 고체분자들은 그 파괴력에 영향을 미친다.

3) 전압과 시간

높은 전위경도와 지속시간이 파괴내력에 관계되는데 시간이 길수록 파괴력은 적다. 시간은 기체의 절연파괴에는 별로 영향이 없고 액체와 고체의 경우에는 영향이 크다. 시간효과는 일분간 주파수 전압파괴력에 대한 충격전압 파괴력의 비를 보면 잘 알수있다.

4) 기체분자의 성질

기체의 절연내력은 분자밀도(전압을 온도로 나눈것)가 높을수록 강하며 음전성의 기체 즉 자유전자를 잘 포획하는 기체는 그렇지않은 기체보다 절연 내력이 더 강하다.

5) 전극과 절연유

기름속의 금속전극을 고체유전체로 둘러싸면 그곳의 파괴력이 증가한다.

6) 고체절연체의 손실계수

손실계수가 높을수록 즉 내부에서 손실이 많을수록 열로 인하여 파괴가 빨라진다.

7) 통계학적 고찰

일정조건 하에서 한 재료에 대해 그 절연 파괴시험을 거듭하였을때 이 절연내력은 상당범위로 분산된다. 그렇기 때문에 설계시에는 이 분산범위를 고려해 넣어야 한다.

2. 전 계

전술한 내용의 실험에서는 평등전계내에서 같은 재질의 재료를 취급하였는데, 실제 전기기기 제조에 있어서는 절연물에 가해지는 전계의 세기가 균등하지 못하므로 가장 강전계 부분이 먼저 파괴 되는것이다. 그러므로 유전체 내의 전계강도가 어떻게 변화 하는가를 고찰할 필요가 있다.

여기서 문제의 복잡성을 피하기 위해서 2차원의 전계에 대해서만 고찰 했다. 구하는 방법에 있어서도 resistance paper mapping, digital computer 를 이용하여 수학적으로 결정하는 방법등이 있겠으나 다음과 같은 특수한 경우에 대해서 고찰하면 이것은 대개의 경우에 응용할수 있을것으로 생각된다.

1) 등전위면 사이에서의 직열 유전체.

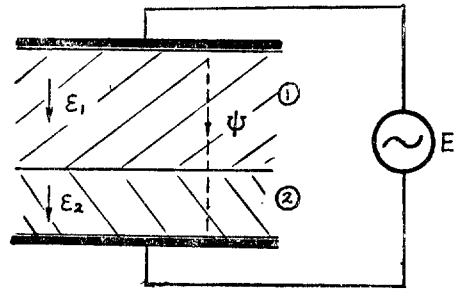


그림 7

그림 7에서 상하 전극은 등전위면이다. 전극간에는 유전체 ①과 ②가 있는데 전력선은 유전체를 직렬로 통과 하도록 되어 있다. 유전체 ①과 ②사이의 경계는 전력선에 대하여 직각이다. 그러므로 이것은 등전위면이다. 따라서 전위경도  $\epsilon$  와 유전체 상수  $k$  간에는 다음과 같은 동식이 성립된다.

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{k_2}{k_1}$$

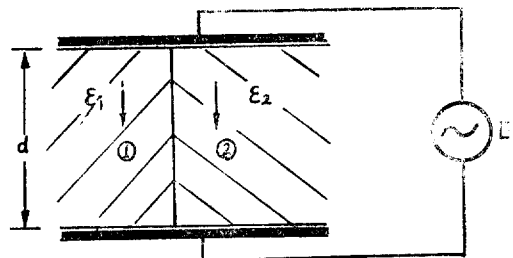


그림 8

연면방전의 특성과 절연체의 영향 및 그 응용

그러므로 유전체 상수가 작은 유전체가 더 큰 압력을 받게 되는 것이다.

2) 등전위면의 병렬 유전체

그림 8과 같이 등전위면간에 유전체를 병렬로 배치할 것 같으면 전력선은 이 경계면과 병렬이 된다.

따라서 각 유전체는 명백히 같은 전위차에 있게 되고 거리도 같이  $d$ 가 된다. 그러므로

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \frac{V}{d}$$

가 되어 같은압력이 걸리게 된다. 따라서 파괴는 유전체 내력이 낮은 것에서 부터 일어난다.

3) 병렬 원통형 전극

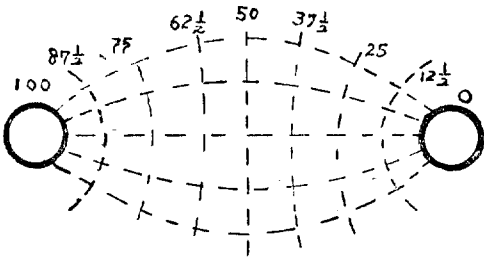


그림 9

그림 9와 같이 반경이 서로 같은 두 원통 사이에는 균일 유전체가 있다. 그리고 파선은 전계의 등전위면이다. 각 등전위면 사이의 전위차를 같게 했을때 각 면사이의 물리적 거리는 원통과 이에 제일 가까이 있는 등전위면간이 가장 짧고 그중에서도 두 원통 중심선과 일치하는 부분의 거리가 가장 짧다. 따라서 이런경우에는 이 부분이 먼저 파괴되는 것임을 알수 있을것이다.

4) 동심원통 전극

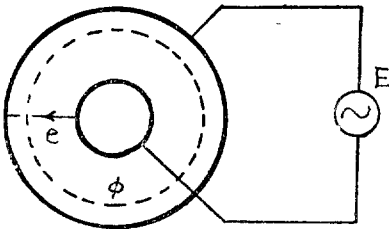


그림 10

그림 10과 같은 동심원통 전극간의 등전위선은 동심원이 될것이고 전력선은 반경 방향의 방사선이 될것이

다. 따라서 등전위면의 전계강도는 반경에 역비례한다. 따라서 반경  $r$ 의 등전위면에서의 전계의 세기는

$$\epsilon_r \approx \frac{1}{r}$$

이고, 최대 전위경도는 내부전극 표면이 된다.

5) 병렬 유전체를 가진 동심원통형 전극

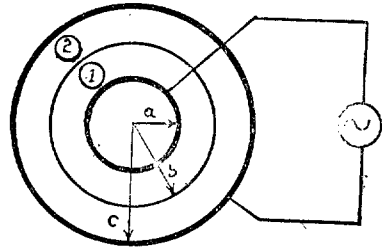


그림 11

유전체들 사이의 경계는 하나의 등전위면이 될것이며 두 물질에 있어서의 전위경도는

$$\epsilon_1 r_1 k_1 = \epsilon_2 r_2 k_2$$

로 표시된다. 여기서

$$a \leq r_1 \leq b, \quad b \leq r_2 \leq c,$$

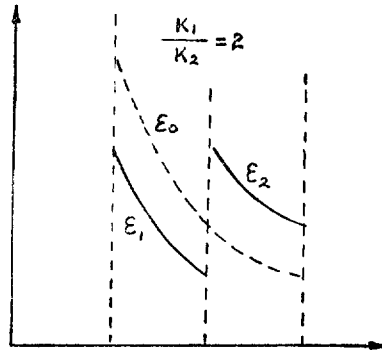


그림 12

$\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 동심원통에 있어서의 유전율비가 그리는 두 유전체의 반경에 따라 변하는 전위경도이다.

$\epsilon_0$ 는 전극간에 단일 유전체를 두었을 때의 반경에 따라 변하는 전위경도이고, 이것은 발산전계내에 있어서의 전계강도를 높은 전위강도영역에 더 높은 유전율의 유전체를 농음으로써 재 분포되게 할수 있음을 말한다.

6) 모서리 대 모서리

그림 13은 모서리가 서로 대응하고 있는 한쌍의 병렬

았다.

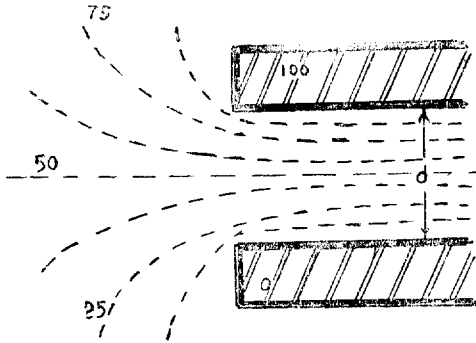


그림 13

평면전극인데 그 사이에 단일유전체를 두었을때 최대 전위경도는 두 전극이 인접한 모서리에 나타난다. 이 경우에는 모서리를 상대시키지 않고 한 전극을 이동시키면 평등전계에 가까워진다.

7) 모서리 대 평면

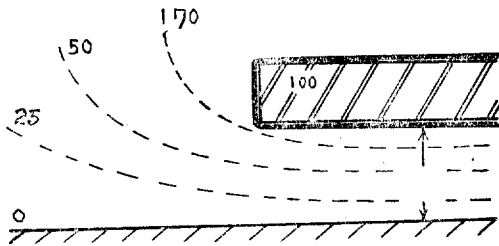


그림 14

그림 14는 그림 13의 상반부와 같은 것인데 등전위면도 그림 13에서의 상하대칭선 상부의 모양과 꼭 같다. 따라서 이 경우에도 단일유전체의 경우 전위경도는 모서리에서 최대가되어 모서리의 곡률 반경이 영이면 전위경도가 무한대로 되고, 반경이 커짐에 따라 즉 모서리를 둥글게 함에 따라 전위경도가 약해진다.

더욱 전위경도를 약하게 할려면 그림 15와 같이 모서리를 유전율이 더 큰 유전체로 둘러싸면된다.

절연체내의 전위분포를 균등하게 하는 것은 전기기기 절연에있어 중요한 문제다. 상술한 여러 경우를 종합하면 실제 전기기기를 절연하는데있어 정량적 해결은 어려울 것이나 같은 재료를 기지고 가장 효과적으로 하는 데는 큰 도움이 될 것으로 생각되어 연구고찰 하여 보

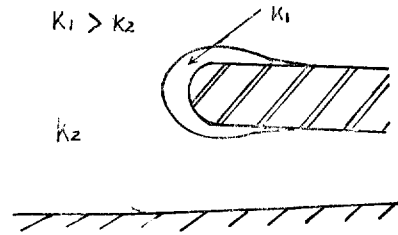


그림 15

3. 합성 유전체의 절연파괴

한쌍의 전극사이의 절연체가 한가지 이상의 물질로 구성되어 있을때 이것을 합성유전체라 부른다. 그 물질들은 두개의 일반적인 종류로 나누면 고체와 유체로 분류할수 있는데 후자는 기체와 액체를 포함한다. 전기기기 중 변압기의 경우를 보면 쉽게알수 있는데, 고체절연체의 체적은 유체의 체적에 비하면 적다. 유체는 보통 염가이고 사용하기가 용이하여 많이 쓰이나 고체보다는 절연내력이 약하고 유전율이 낮아 대부분의 절연파괴는 이 유체에 의하여 유발된다. 이 파괴의 원인이되는 현상을 고찰하여보면,

1) 코로나

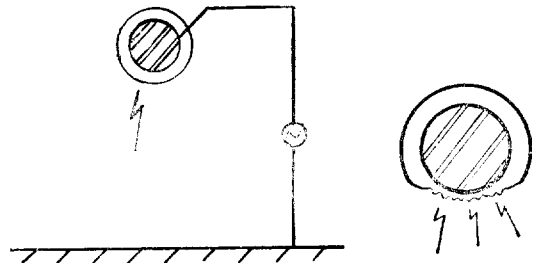


그림 16

그림 16 과 같이 평면전극과 반대편에 고체물질로 절연된 원통사이의 전압을 인가하고 점차 증가시켰을때 고체절연체의 외부에접한 유체가 과도한 응력을 받아 파괴되었다. 이 파괴현상을 관찰한 결과 이온화된 통로가 형성되어 평면을 향하여 진행해 나감을 알수있었다. 이 이온화된 통로는 일시적인 도전로가 되어 원통과 평면 사이의 유체를 연결하는 코로나 스트리머가 전체를 의곡 시킴을 알수있었다. 여기서 스트리머가 발생

했다더라도 완전파괴가 일어나지 않는 경우가 있었는데 이 경우는 전극간격이 클때와 원통에 두꺼운 고체 절연체가 있을 때였다. 이것은 기름과 같은 액체 절연체에서는 스트리머기포가 발생하기 쉽기 때문이며 이 기포는 기름보다 더 낮은 유전율과 더 약한 절연강도를 갖기 때문이다. 이 경우 기포들이 절연내력이 약한 영역으로 옮겨지지 않을 때는 더욱 이온화 되어 코로나는 광범위하게 진행되었다. 원통에 있어서 고체 절연체 표면에까지 연장된 코로나는 결국 금속에 이르는 통로에 침투해 들어갔을때 절연은 완전히 파괴되었다.

2) 연면방전

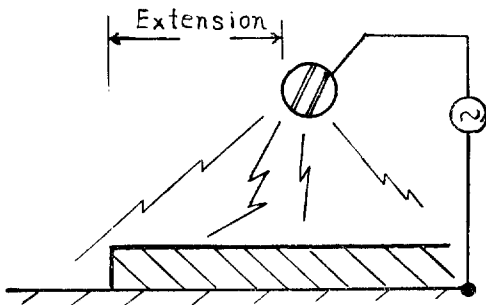


그림 17

그림 17은 원통에 고체 절연체를 넣는 대신에 절연막이 원통 반대편 평면을 덮고있는 것이다. 이 경우에는 원통에서 시작된 코로나 스트리머가 막에 부딪히게 되는데 절연막이 비교적 얇은 경우에는 첫번째 스트리머에 의해서 완전 절연파괴가 일어났다. 절연막을 점차 두껍게 하였더니 최미한 스트리머가 시작되어 결국 막의 코너리 주위에서 하부전극으로 스트리머는 이동 하였다.

완전절연파괴는 막 주위에서 연면방전이 일어나는것에 따라 일어났다.

전기기기에 있어서 대부분의 절연파괴는 지금까지 고찰된 여러가지 변화에 기인된 것으로 생각할수 있을것이다.

본 논문은 어디까지나 명확히 구명된 이론에 입각해서 기기를 제작할때 그 실천 방법을 실험적으로 제시하는데 있으므로 우선 현재 사용하는 절연재료를 우리의 사용작도에서본 역률, 캐파시턴스, 유전상수 및 파괴력등을 측정하기로 했다. 그리고 특히 파괴력을 어떠한 각도에서 보아야 하는가를 세밀히 분석하였다.

다음에는 전계에 대한 고찰을 하였는데 이론상 취급하는 절연재료는 그 재질이 균일하고 똑 같은 내력솔 가지고 있어 전계강도도 재료전체를 통하여 일정하다고 본다. 그런데 실제사용에 있어서는 절연내력은 균일하지 않고 절연파괴는 최대내력영역에서 일어남으로 그 내력이 유전체 내에서 어떻게 변하는가를 구명하였다. 그리고 합성유전체의 절연파괴에도 많은 고찰을 할려고 했으나 시간과 연구비 관계로 추후로 미루기로 하였으며, 끝으로 파괴원인에 속하는 코로나, 연면방전에 관한 고찰을 하여 실제 응용에 참고가 되도록 하였다.

참 고 문 헌

1. "Insulating Materials for Design and Engineering Practice" F.M. Clark, John Wiley & Sons, N.Y.
2. "Factors Controlling Electric Strength of Gaseous Insulation", Narbut, Berg, Works, Dakin AIEE TP-59-74.
3. "Impulse Ionization and Breakdown in Liquid Dielectrics" Sommerman AIEE TP-54-69.