

# 전기화재요인으로서의 트리잉 열화 신호 특성 분석

윤현주 · 신현택 · 홍진웅

광운대학교 전기공학과

## 1. 서론

화재 발생 재해요인의 가장 큰 비중을 차지하는 것이 전기화재이다. 이러한 전기화재는 1991년도부터 2000년도까지 10년 동안 화재발생 1순위를 차지하고 있으며 전기기기나 전력설비사용의 증가와 함께 점점 화재건수가 증가하고 있으며 이로 인한 인명피해 및 재산피해는 물론 국가 경제에도 크나큰 손실을 주고 있으므로 이에 대한 대책요인으로 안정된 전력요구가 최근에 강하게 요구됨에 따라 전기화재 징후의 조기 발견에 의한 화재의 발생을 미연에 방지할 필요성이 대두되고 있다.<sup>(1)</sup> 일반적으로 전력케이블에서 사용되고 있는 PVC시이즈를 사용한 전선과 폴라올레핀시이즈 시편을 제작하여 내화특성을 비교 연구하여 유독가스량의 측정, 연기밀도 및 저밀도폴리에틸렌(Low Density Polyethylene; 이하 LDPE)에서 발생하는 트리잉 열화 신호 특성을 분석하여 유독성가스로 인한 인명피해감소 및 전기화재 징후의 조기 발견에 의한 화재를 미연에 방지하고자 하였다.

## 2. 이론

초기 트리가 맨 처음에 발생은 본 실험에 사용한 저밀도폴리에틸렌에서 전극 침단 부분의 고전계 집중에 의한 진성 파괴 강도가 7(MV/cm)에 도달할 때이므로 그의 발생 조건은 최대전계강도의 식(1)에서

$$E_{\max} = \frac{2V}{R \ln(1+4x/R)} \geq 7[\text{MV/cm}] \quad (1)$$

여기서, V는 인가전압으로서 10kV, R은 침단 부분의 곡률 반경으로서  $3 \times 10^{-4}[\text{cm}]$ , x는 전극의 갭으로서 2(mm) 이라면  $E_{\max} = 8.45[\text{MV/cm}]$ 가 되어 20[°C]에서 LDPE의 진성파괴강도 7(MV/cm)보다 크며 전압인가 후 트리 발생까지 10(sec) 전후인 것이 많고, 맥스웰 응력을 계산해 보면

$$f = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon \gamma E_{\max}^2 = 73.3[\text{kg/cm}^2] \quad (2)$$

(2)가 되어 LDPE 기계적 인장강도 20[°C]때는 90(kg/cm<sup>2</sup>)가 되므로 맥스웰 응력에 의한 절연 파괴보다는 진성 파괴로 보는 것이 타당하다고 생각된다. 트리의 모양을 전계 모양의 관점에서 검토하면, 바늘 끝이 전계 내 각 점의 전계 방향을 접선방향으로 작용하는 곡선인데, 트리가 진전하는 방향은 전계 방향에 영향을 받는다고 생각되므로, 전계 방향을 나타내는 전기력선에 의하여 트리 진전 방향이 영향을 받는다고 생각된다. 이상과 같은 전지에서 쌍곡선 모양의 침 대 평판의 전기력선 및 등전위선을

등각사상법을 이용하여  $z = asinu$  변환을 실시하여  $w$  평면(평행평판)을  $z$  평면(침 대 평판)으로 변환하여 구하였다.

$$\left. \begin{aligned} x &= asinu \cdot \cosh v \\ y &= acosu \cdot \sinh v \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{x^2}{\cosh^2 v} + \frac{y^2}{\sinh^2 v} = a^2 \quad (4)$$

(3)식 양변을 제곱하고,  $u$ 를 소거하면(4)식은  $a$ 를 초점거리의  $1/2$ ,  $a \cosh v$ 를 장경의  $1/2$ 로 하는 공 초점인 원군의 식의 전기력선을 구할 수 있다.

$$\frac{x^2}{\sin^2 u} - \frac{y^2}{\cos^2 u} = a^2 \quad (5)$$

트리 길이의 방향을 전기력선에 착안하여 보면 전적으로 대향 전극으로 향하여 침과 전기력선 상의 임의의 점에 있어서의 접선과 이루는 각도가 예각을 이루고 있지만, 트리 길이의 성장을 관측해 보면 진전하는 방향과 침이 둔각을 이루는 것도 있다. 따라서 트리 진전하는 방향이 둔각인 조건을 만족할 수 있도록 좌표변환을 하여 원전극 대 평판전극을  $w$  평면에서  $z$  평면으로  $z = \tan w$ 에 의하여 변환하여 (8)식을 구하였다.

$$(x + \cot 2u)^2 + y^2 = \left(\frac{1}{\sin 2u}\right)^2 \quad (6)$$

$$(y - \coth 2v)^2 + x^2 = \left(\frac{1}{\sinh 2v}\right)^2 \quad (7)$$

$$|E_z^*| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v}\right)^2}} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} (\cos 2u + \cosh 2v) \quad (9)$$

$c$  값에 변화하는 (6)식은 전기력선,  $v$ 의 값에 따라 변화하는 (7)식은 등전위선을 표시한다. 전기력선에 착안하여 보면 쌍곡선형 바늘일 때와는 달리 그의 방향이 대향전극과 역방향인 것도 있어 실험 결과에서 얻은 트리 모양과 대응한다.<sup>(8)</sup>

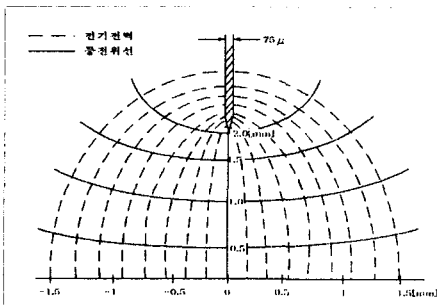


그림 1. 침(쌍곡선형)대 평판구조의 전기력선과 등전위선

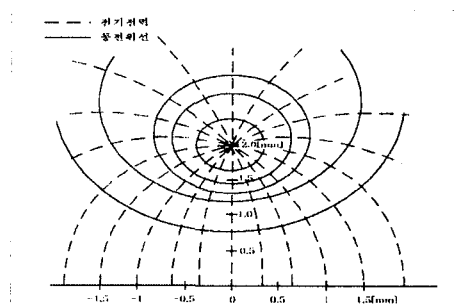


그림 2. 점 대 평판 전극의 전기력선과 등전위선

트리 외형에 대해서는 등전계선에 착안하여 보면  $u, v$ 에 의해서 결정되는  $z$ 평면에 있어서의 전계를 구하면 된다.  $v$ 를 등전위면  $u$ 를 전기력선으로 하는  $v/u$ 계에 있어서는 표준변환을 써서 전계 중의 임의의 점의 전계의 세기를 (8), (9)식으로 구할 수 있다.  $z$ 평면이 있어서의 복소 전계 세기의 공액 복소수를 구하면  $E^*_z = E_x + jE_y = -\text{grad } v$ 에서  $z$ 평면에서의 복소 전계 강도를 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3-1. 초기 트리의 발생

트리잉 열화 특성을 분석하기 위하여 전원으로는 KYONAN ELEC제 고압발생 장치를 사용하였으며, 내장된 시험용 변압기는 정격 60[Hz], 2차 전압 0~50[kV] 1.5[KVA]용이다. 전극부분은 표면에서의 연면방전을 방지하기 위하여 시료를 실리콘유(Silicon oil)에 함침 하였으며 실험은 상온에서 실시하였다. 전압 인가방식은 승압 속도 1[kV/s]로 7.5[kV]와 10[kV]를 각각 인가한 후 광학현미경(Olympus)으로 35배에서 파괴시까지 관측하였으며, 트리 길이가 0.1[mm]이상인 것만을 발생으로 간주하였다. 둘째로 트리의 길이와 모양에 관한 실험을 위하여 일단 초기 트리가 발생한 시료의 진전상황을 관측하기 위하여 교류 상용 주파수 전압(7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20)[kV]를 각각 4분간씩 인가한 후, 35배의 배율에서 현미경 관찰을 실시하여 트리 길이를 측정하였으며, 또한 절연파괴시간을 측정하였다. 그림3은 절연파괴시험용 시편의 형상을 나타내었으며, 그림4는 트리 형상을 나타내었다. 셋째로 인가전압 대 수명에 관한 실험을 위해서는 같은 실험장치를 가지고 교류 상용 주파수 전압(7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20)[kV]를 계속 인가 하였을 때의 파괴 시간을 측정하였다.<sup>(5)(6)</sup> 수명시간을 측정하기 위하여 시료가 파괴되는 순간에 고전압 차단기에 의해서 자동으로 차단되며, 전압인가 직후에서 파괴시간 까지 시간을 초시계(Stop watch)로 측정하여 그 값을 수명치로 취하였다.

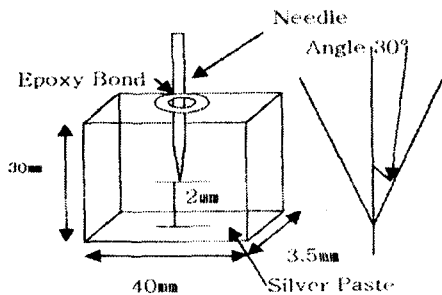


그림 3. 절연파괴시험용 시편의 형상



그림 4. 트리 형상

그림5의 A곡선은 전압인가 후 4분이 되었을 때의 트리 진전 상황을 현미경에 부착

된 사진기로 촬영하여 인가전압(7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20)[kV]에 대한 길이를 실측한 후 도시한 결과이다. 인가전압에 따라 같은 시간의 경과에 따른 트리 길이는 거의 비례하는 경향을 보이고 있다. 트리 내부를 유전체로 가정했을 때의 계산 결과 곡선B와 트리 내부를 도체라고 가정하여 계산했을 때의 결과 곡선C의 거의 중간치를 갖는 곡선임을 그림5에서 알 수 있다<sup>(2)(3)</sup>

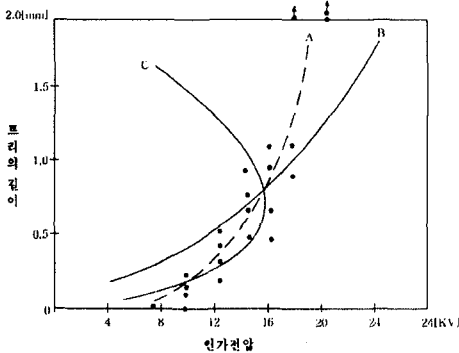


그림 5. 각 전압에 대한 트리 길이의 이론치와 실측치의 비교

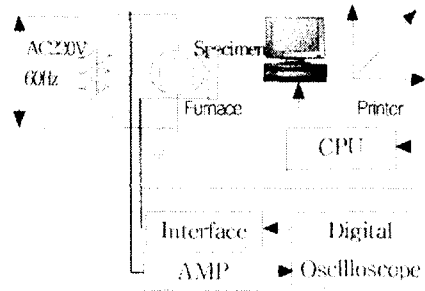


그림 6. 실험장치 블록선도

### 3-2. 연기밀도시험

본 실험에서 사용된 시편은 NFR-8과 FR-8 내화전선을 ASTM E 662에서 규정된 시험장치를 사용하여 동일조건에서 시이즈의 두께가 0.5[mm] 되도록 하여 전선축 방향 여러 조각으로 분리한 시편이 서로 밀착 및 겹치지 아니하도록 75[mm]×75[mm] 시편 대에 고정하여 실험을 하였으며 시험중 시편이 시편 대에 녹아 붙지 않도록 하기 위하여 시편 대와 시편 조각이 겹치는 부분에 두께 0.04[mm]의 알루미늄 박막을 제작하였다. 시험 편을 부착하지 아니한 시편 대를 시험대 위치에 고정시킨 다음 가열로를 점화하여 조사열량이  $2.5 \pm 0.05$ [W/cm<sup>2</sup>]이 되도록 가열로 인가전압을 조정후 광선투과장치를 작동시킨 다음 기준점 조정후 시험장치의 배출구를 차단하고, 시편을 부착한 시편 대를 교환한 다음 시험장치의 문을 닫은 후 시험기록계의 광선투과율이 최저가 된 다음 시험개시 20분에 가열로를 소화한 다음 배출구를 개방 기준점을 조정으로 제작한 후 절단한 시편은 증류수로 세척하여 불순물을 제거한 후 실험을 하였다. 연기밀도 실험장치는 그림6에 나타내었다.<sup>(4)</sup>

표 2. 측정된 연소가스농도

Combustion gas	Poisonous gas[ppm]		Fatal dose for 30[min]
	PVC	Polyolefin	
CO	5,520	1,400	4,000
CO <sub>2</sub>	46,300	43,500	100,000
HCl	6,173	0	500
NO <sub>2</sub>	1.5	1.4	250

그림 7에서 NFR-8 5.5[mm], 14[mm], 100[mm]인 각각 두께 0.5[mm] 시편을 Flaming 방법으로 20분 동안 측정된 결과 초기 1분에서 7분57초까지 급격한 증가를 보이다가 점진적으로 5.5[mm] > 14[mm] > 100[mm] 순서로 감소하는 연기밀도(Ds)를 측정할 수 있었다. 그림 8에서는 각각 두께 0.5[mm] 시편을 Non-Flaming 방법으로 20분 동안 측정된 결과 14[mm] > 5.5[mm] > 100[mm] 순서로 감소하는 Ds를 측정할 수 있었다. 그림 9에서는 FR-PVC 5.5[mm], 14[mm], 100[mm]인 내화전선 각각 두께 0.5[mm], 두께 1.5[mm], 두께 3.0[mm] 시편을 5.5[mm], 14[mm]는 Non-flaming 방법으로 20분 동안 측정하였으며 Flaming 방법으로 100[mm]를 측정하였다. 그림 10에서는 5.5[mm]인 내화전선 FR-PVC와 NFR-8를 각각 두께 0.5[mm]로 하여 Flaming 방법으로 상호 비교측정을 하였다.

따라서 Flaming 방법으로 측정된 발연량이 FR-PVC보다 NFR-8이 작은 Ds를 얻을 수 있었으며, 시편 두께를 증가할수록 Non-flaming에서 연기밀도가 높게 나타남을 알 수 있었으며 Flaming 방법에서는 완전연소로 인한 연기밀도의 값이 Non-flaming 방법보다 작은 값의 연기밀도를 구할 수 있었다. 이는 연소에 의한 내화전선 케이블의 확산속도가 빠름으로 인하여 Flaming 방법에 의한 연기밀도의 값이 높게 측정되었다고 사료된다.<sup>(5)(6)</sup>

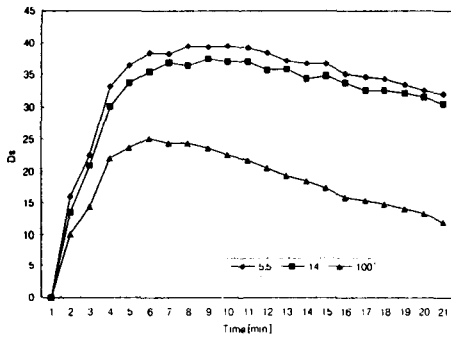


그림 7. Flaming방법에 의한 NFR-8 연기밀도특성

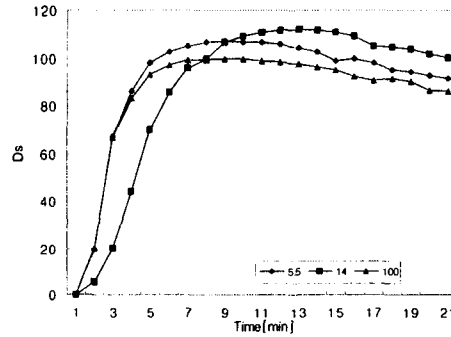


그림 8. Non-flaming방법에 의한 NFR-8 연기밀도특성

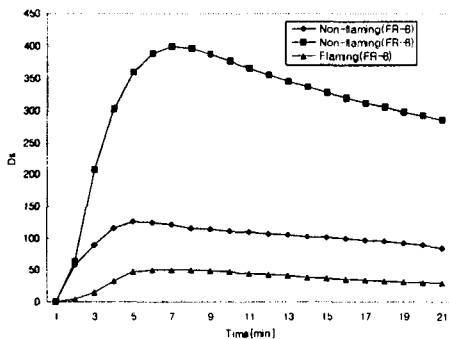


그림 9. FR-8전선의 연기밀도특성

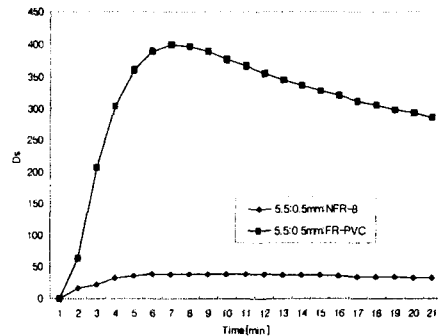


그림 10. 비연소방법에 의한 NFR-8, FR-PVC의 연기밀도특성

#### 4. 결론

전력 및 통신케이블에서 화재시 전선에서 발생하는 연기밀도 및 트리 진전방향이 전계의 방향에 영향을 받는다는 점을 착안하여 등각사상법을 이용하여 수식화할 수 있었다.

(1) 초기 트리의 발생에 관해서는 시편의 조직 양상이나 이물의 혼입, 결함 및 보이드등은 시편 자체의 요인과 침 전극의 곡률반경의 영향등 복합 요인으로 시간 분포가 상당히 임의성을 지녀 설명이 난해하나 최대 절연파괴강도의 계산치가 8.45(MV/cm)로서 진성파괴 강도 7(MV/cm)를 넘고 10(sec) 내외에서 트리가 발생하는 점으로 보아 트리의 발생원인이 진성파괴 임을 확인하였다.

(2) 같은 경과 시간에 있어 각 인가전압에 대한 트리 길이의 측정 결과는 대체로 트리 내부를 유전체로 가정했을 때의 계산결과와 도체로 가정했을 때의 계산결과의 중간값을 확인하였다.

(3) 절연파괴의 수명을 여러 인가전압에 대해서 구한 결과 인가전압의 증가에 따라 급히 수명이 감소함을 알 수 있었다.

(4) 폴리올레핀시리즈를 사용한 NFR-8 내화전선을 사용함으로 FR-PVC시리즈를 사용한 전선보다 연기밀도 변화량 및 일산화탄소 가스양의 감소효과를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

1. "2000 火災統計年報", 行政自治部, pp, 39~56,2001
2. F. W. Billneyer Moseley, "Textbook of Polymer Science", John Wiley and Son, New York, pp 229~261, 1984
3. K. Gilleo, "Polymer Thick Film", ITP, pp 21~53, 1996
4. T. Hayami, "CV CABLE" Corona, pp 107, 1990
5. Hirschler, Marcelo M, "Smoke Results from a Set of Over 100 Carpets in the NBC Smoke Chamber Statistical Analysis and Investigation of Afferting Factors", Fire and Materials, Vol 16, No 3, pp. 127~133, 1992
6. H.L.Frisch et al., "Two and Three Component Interpenetrating Polymer Networks", Polym. Eng. & Sci., Mid-June, Vol.25, No.8, pp.488- 493, 1985
7. A. Von Hippel, "Electric Breakdown of Solid and Liquid Insulators", J. Appl.Phys. Vol.8, pp.815-832, 1997
8. Erwin Kreyzig, "Advanced Engineering Mathematics", John Wiley & Sons, pp, 567~619, 1992