

침전극의 곡률반경에 따른 트리개시전계 및 트리진전 특성

Dependence of needle tip Curvature of the Inception Stress and Propagation of electrical tree

박영국, 김완수, 이홍규, 이용희, 임기조, \*강성화,  
Y.G. Park, W.S. Kim, H.G. Lee, Y.H. Lee, Kee-Joe Lim and \*S.H. Kang

Chungbuk Nat. University, \*Chungcheong College

**Abstract** - Inception and propagation of electrical tree and properties of partial discharge(PD) pulses accompanying with tree as a function of needle tip radius in low density polyethylene were discussed. To study on these characteristics in different tip radius, we used specimens with needle-plane electrode system made of LDPE, observed inception and propagation of electrical tree by optical microscope with computer and investigated the characteristics of the phase resolved PD pulses accompanying with propagation of electrical tree.

The PD quantities detected and analyzed were PD magnitude, mean phase angle, average discharge, and the statistical characteristics of the PD pulses.

As the tip radius  $r$  increases, tree inception stress  $E_i$  converges to constance value. This result suggests that tree inception stress  $E_i$  increases due to stress relaxation when the tip radius is small.

Branch-type electrical tree was formed when  $E_i$  is 640~750[kV/mm], bush-type electrical tree when  $E_i$  is 370~400[kV/mm], branch-like electrical tree when  $E_i$  is 370~400[kV/mm].

**Key Words** - bush-type electrical tree, PD magnitude, average discharge, mean phase angle, average discharge, stress relaxation, tip radius, tree inception stress

1. 서 론

일반적으로 고체 절연체의 절연파괴는 단시간 파괴 보다는 전기트리 등의 열화과정을 경유하여 파괴되는 장기 절연 열화에 의한 파괴가 대부분이다. 일단, 고체 절연체에 전기트리가 발생하면 점진적인 열화과정에 의하여 고체절연체에 치명적인 손상을 유발하여 절연 특성을 상실케 하며 절연파괴에 도달한다[1]. 따라서 절연파괴에 의한 전기사고를 미연에 방지하기 위해서는 전기트리의 발생과 진전양상을 미연에 관측하는 것이 상당히 중요하다.

전기트리의 발생과 진전은 국부적인 전계의 집중에 따른 부분방전의 발생에 기인하므로 부분방전 펄스는 전기트리의 발생과 진전에 관련된 많은 정보를 가지고 있다[2,3]. 따라서 전기트리에 수반되는 부분방전 펄스를 검출하여 해석하면 전기트리의 발생과 진전양상을 진단하는 것이 가능하다[4,5]. 그러나 현재 부분방전 펄스와 전기트리와의 직접적인 관계를 도출하는 것은 상당히 어려운 것으로 알려져 있으며[6,7], 많은 연구자들이 전기트리와 부분방전의 상관성을 연구하기 위하여 다양한 기법을 적용하여 연구 중에 있다[8,9,10].

본 논문에서는 LDPE 시편에서 전기트리의 발생시 침침단의 곡률반경에 따른 트리개시전계와 전기트리의 발생 및 진전시 수반되는 부분방전 펄스의 특성을 검토하였고, 사용된 특성량들은 부분방전 펄스의 최대 방전 전하량, 평균 방전전하량, 평균 방전위상각, 발생 빈도수, 절연파괴시간과 방전 펄스의 평균 방전전하량이다.

2. 실 험

시편은 밀도 0.92[g/cm<sup>3</sup>]의 펠렛형 LDPE 시료를 사용하였으며, 130[°C]에서 5분간 가열하여 1[°C/sec]의 속도로 급냉한 판상시료를 제작하고 20×20×2[mm<sup>3</sup>]의 크기로 절단한 후, 두개의 판상 시료에 침을 삽입하여 3 [mm]의 두께로 제작하였다. 이때 시편의 결정화도는 DSC (Differential Scanning Calorimetry) 측정결과 63[%]였다. 그림 1은 시편의 형상을 보여주고 있다. 제작된 시편은 광학현미경으로 관측하여 전극의 구조와 불순물의 혼입 등이 존재하지 않고, 침전극 끝단에 보이드가 존재하지 않는 시편만을 선별하여 실험을 행하였다.

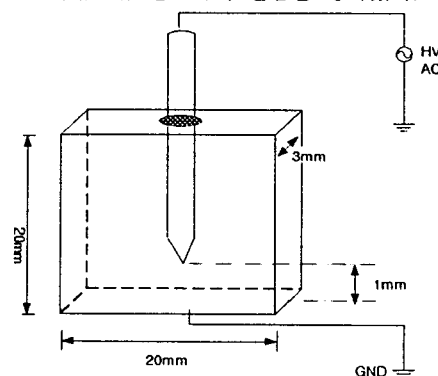


그림 1. 시편의 형상

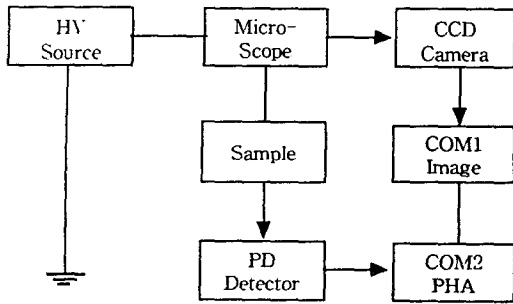


그림 2. 측정장치의 블록도

그림 2는 본 실험에서 사용한 실험장치의 Block Diagram 이다.

시편에서 발생한 전기트리의 진전양상을 광학현미경과 CCD 카메라를 사용하여 관측하고 컴퓨터1에서 화상 처리를 하였으며, PD 계측기에서 부분방전 신호를 계측하여 컴퓨터2에서 신호를 저장하고, 부분방전 전하량, 발생빈도수, 평균방전전하량, 발생위상각 등을 해석하였다.

본 실험에서 사용된 침전극은 광학현미경으로 침 침단의 곡률반경을 측정하여 선별해서 사용하였다. 전원은 PD free형 전원 공급 장치가 사용되었다. 전압인가 방식으로는 1분간 4.5[kV]까지 일정하게 상승시킨 후, 5.5[kV]까지 0.5[kV/min]로 스텝상승 시키고 5.5[kV]부터 0.2[kV/min]으로 전압을 스텝상승 시키면서 트리가 개시되는 시점을 관측하였다. 또한, 트리가 개시되는 시점의 전압을 트리 개시전압이라 하고, 이 전압 하에서 전기트리의 발생과 진전 및 이에 수반되는 부분방전 펄스의 경시변화를 관측하였다. 실험시 온도는 31[°C], 습도는 75[%RH]이었으며, 부분방전 펄수는 5[pC] 이상의 펄스만을 계측하였으며, 부분방전 펄스의 정확한 통계적 처리를 위해서 본 실험에서는 300주기의 데이터를 저장하여 통계 처리하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

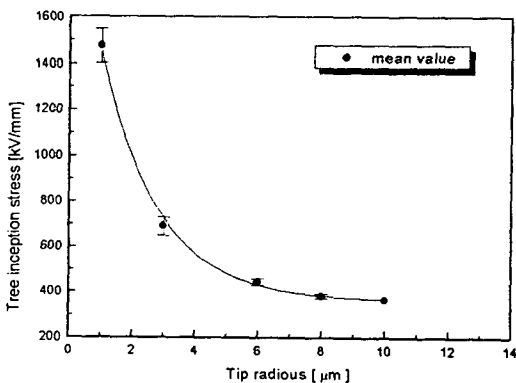


그림 2. 침 침단의 곡률반경에 따른 트리개시전계

그림 2는 침 침단의 곡률반경에 따른 트리개시전계의

변화를 도시한 것이다. 여기서 트리개시전계를 계산하기 위해서 Mason 방정식을 적용하였다[11].

침 침단 곡률반경이 1[ $\mu\text{m}$ ] 일 때 트리개시전계  $E_t$ 는 1400~1500[kV/mm]이지만 곡률반경이 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 이 결과는 실제 전계값  $E$ 는 곡률반경에 관계없이 일정한 값을 가지며, 침 침단의 전계가 공간전하 등의 2차적 요인에 의해서 완화되고 있는 것을 시사하고 있다 [12,13].

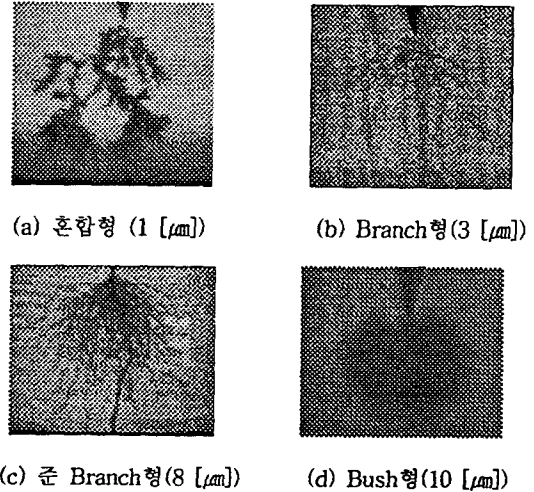


그림 3. 전기트리의 형상

그림 3은 서로 다른 전계하에서 발생된 전기트리 형상이다. 그림 2. (a)는 곡률반경 1[ $\mu\text{m}$ ]인 시편에 14시간동안 정전압 인가시의 트리형상이며, (b)는 곡률반경 3[ $\mu\text{m}$ ], (c)는 곡률반경 8[ $\mu\text{m}$ ], (d)는 곡률반경 10[ $\mu\text{m}$ ]인 시편에 트리개시전압을 인가 했을 때 발생한 트리 형상을 각각 보여주고 있다. 본 실험조건하에서 전기트리의 형상은 트리개시전계 값이 370[kV/mm]이하일 때 Bush형 트리, 370~400[kV/mm]일 때 유사 Bush형 또는 유사 Branch형 트리, 640~750[kV/mm]일 때 Branch형 트리, 1400[kV/mm]이상일 때 Bush형과 Branch형의 혼합형으로 성장하였다.

그림 4는 2.5[pC]이상의 방전이 개시된 때부터 첫 번째 교락이 발생 하는데까지 걸리는 시간을 곡률반경에 따라 도시한 그래프이다. 이때 인가전압은 트리가 개시된 시점의 전압으로 선정하였다. 침 침단의 곡률반경이 증가함에 따라 절연파괴에 이르는 데 걸리는 시간이 늘어남과 동시에 편차도 커진다. 이 사실은 트리개시전계가 비교적 높은 값(667[kV/mm])에서는 전기트리는 가지형으로 성장하고, 트리개시전계가 비교적 낮은 값(367[kV/mm]이하)에서는 전기트리는 부시형으로 성장함에 기인하는 것으로서, 본 실험 조건하에서 가지형 트리의 절연파괴에 이르는 시간은 2~7분이며, 준가지형 트리의 경우는 6~17분 정도이고, 부시형 트리는 18분 이상의 시간이 소요되었다. 또한, 트리 개시전계가 매우 높은 곡률반경인 시편 (1[ $\mu\text{m}$ ],  $E_t=1400$ [kV/mm]이상)의 경우에는 전기트리가 첫 번째 교락에 이르는 데 3시간 이상 소요되었고, 그 이후에도 수 시간 이상 방전이 지속되었다.

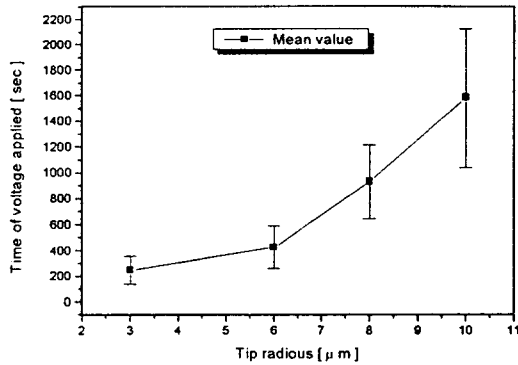


그림 4. 침 첨단의 곡률반경에 따른 방전지속 시간

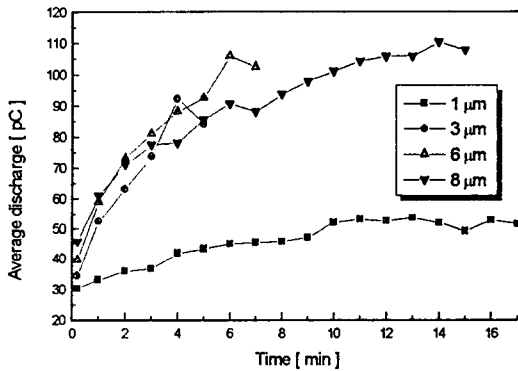


그림 5. 전압인가 시간에 따른 평균방전전하량 분포

그림 5는 전압인가시간에 따른 부분방전 펄스의 평균 방전전하량 분포를 도시한 것으로서, 트리 발생초기 (~0.2[mm] 트리성장)에는 곡률반경 3[ $\mu\text{m}$ ], 6[ $\mu\text{m}$ ], 8[ $\mu\text{m}$ ]의 경우에 모두 급격한 기울기를 가지다가 방전중기(0.4~0.6[mm] 트리성장)로 갈수록 기울기가 완만해짐을 알 수 있다. 이것은 트리가 길이 방향으로의 진전보다는 폭 방향으로 진전되면서 트리체널이 증가하는 것에 의한 것으로 사료된다.

방전말기(0.8[mm]이상의 트리성장)에는 곡률반경 3 [ $\mu\text{m}$ ], 6[ $\mu\text{m}$ ], 8[ $\mu\text{m}$ ]의 경우 모두 절연과피 직전에 기울기가 다시 증가한 후 감소하는 경향을 보였다. 이것은 절연과피 직전에 500~700 [pC]의 큰 부분방전 펄스가 다수 발생하는데 기인하는 것으로서, 존재하는 트리첨단 중 하나에서 가지가 형성된 후 급속하게 절연과피에 이르게된다. 그러나 고체 고분자재료에 있어서 절연과피는 트리가 교락된 다음에 순간적으로(nano-second) 나타나는 것은 아니며 몇몇 경우에는 한 시간이상 걸리는 경우도 있다[12,13].

곡률반경이 1[ $\mu\text{m}$ ]인 시편의 경우에는 평균방전전하량 분포가 다른 시편과 비교해 완만한 기울기를 가지면서 증가하다가 일정한 값으로 안정화되는 경향을 보였으며,

방전말기에는 평균 방전 전하량이 30[pC]이하로 떨어진 후 방전을 지속하였다. 이는 첫 번째 교락이 있는 후에도 지속적인 방전을 하면서 2차 3차의 교락이 이루어지는데 기인한 결과로서 이 현상은 1~7시간정도 지속되었다. 이러한 사실은 위에 제시된 위에 설명한 내용을 뒷받침 해주는 결과라고 할 수 있다.

그림 6은 전압인가시간 즉, 전기트리의 성장에 따른 부분방전 펄스의 평균 방전위상각의 변화추이를 도시한 것으로서, 평균 방전위상각은

$$\bar{\phi} = \left( \sum_{j=1}^n \phi_j \cdot a_j \right) / \sum_{j=1}^n a_j \quad (1)$$

로 표현된다. 여기에서  $\phi_j$ 는 부분방전이 발생한 위상각을  $j$ 로 나누었을 때 각각의 위상각,  $a_j$ 는 각각의 위상에서의 방전전하량으로써 방전전하량을 기준으로하여 방전이 실제로 가장 활발하게 발생한 위상각을 나타내는 값이다.

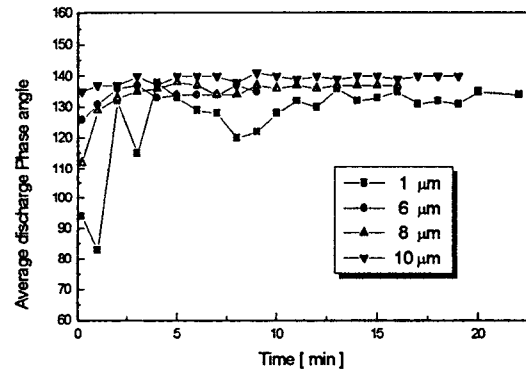


그림 6. 전압인가시간에 따른 부분방전 펄스의 평균발생(방전)위상각

전압인가시간에 따른 평균 방전위상각 분포는 방전 초기(0.2[mm] 트리성장)에는 증가하는 경향을 보이다가 중기(0.4~0.6[mm] 트리성장)에는 안정화되는 경향을 보였으며, 방전말기(0.8[mm]이상의 트리성장)에는 일정한 값으로 안정화되는 경향이 두드러졌다. 곡률반경 1[ $\mu\text{m}$ ] ( $E_f=1477$  [kV/mm])인 시편에서는 평균 방전위상각이 약 132~134 ° 에서 안정화되었고, 곡률반경 6[ $\mu\text{m}$ ] ( $E_f=445$  [kV/mm])인 시편에서는 평균 방전위상각이 약 133~136 ° 에서 안정화되었고, 곡률반경 8[ $\mu\text{m}$ ] ( $E_f=386$  [kV/mm])인 시편에서는 평균 방전위상각이 약 136~137 ° 에서 안정화되었으며, 곡률반경 10[ $\mu\text{m}$ ] ( $E_f=367$  [kV/mm])인 시편에서는 평균 방전위상각이 약 139~140 ° 에서 안정화되는 경향을 보였다. 즉, 트리 개시 전계가 낮을수록 즉, 곡률반경이 클수록 높은 방전위상각에서 안정화되는 경향을 보였다.

#### 4. 결 론

LDPE 시편에서 전기트리의 발생시 침 침단의 곡률반경에 따른 트리개시전계와 전기트리의 발생 및 진전시 수반되는 부분방전 펄스의 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 트리개시 전계는 침 침단 곡률반경이 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴하며, 이는 침 침단의 전계가 공간전하 등의 2차적 요인에 의해서 완화되고 있는 것으로 사료된다.
- 2) 트리개시전계가 370[kV/mm]이하일 때 Bush형 트리, 370~400[kV/mm]일 때 유사Bush형 또는 유사 Branch형 트리, 640~750[kV/mm]일 때 Branch형 트리, 1400[kV/mm]이상일 때 Bush형과 Branch형의 혼합형으로 성장하였다.
- 3) 전기트리가 절연파괴에 이르는 시간은 가지형 2~7분, 준가지형 6~17분, 부시형 트리는 18분 이상의 시간이 소요되었다. 또한, 트리개시전계가 높을 경우 ( $E_0=1400$ [kV/mm]이상)에는 전기트리가 첫 번째 교락에 이르는데 3시간 이상이 소요되고, 이후에도 방전이 지속되었다.
- 4) 트리개시 전계가 낮을수록(곡률반경이 클수록) 평균 방전위상각은 높은 위상각에서 안정화되는 경향을 보였다.

#### REFERENCES

- [1] E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", IEEE Trans. EI, Vol EI-13 NO 4, pp. 277-288, 1978.
- [2] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE, Trans. EI, Vol EI-12, No.1, pp. 2-18, 1976.
- [3] C. Laurent and Mayoux, "Analysis of the Propagation of Electrical Treeing Using Optical and Electrical Methods" IEEE, Trans., EI-15, pp. 33-42, 1980.
- [4] K. J. Lim, S. H. Kang, H. W. Park and M. N. Kim, " Correlation between Partial Discharges and Electrical Treeing in Low Density Polyethylene blended with Organic Additives" Proc. of ICPADM 94, IEEE, Brisbane, Australia, pp. 409-411, 1994.
- [5] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials" IEEE Trans. EI, Vol. 2, No. 4, pp. 641-652, 1995.
- [6] T. Okamoto and T. Tanaka, "Auto-correlation Function of PD Pulses under Electrical Treeing Degradation", IEEE, Trans., EI, Vol.2, No.5, pp. 857-865 October 1995.

- [7] J. H. Mason, "Enhancing the Significance of PD Measurements", IEEE, Trans., EI, Vol.2 No.5, pp. 876-888, October, 1995.
- [8] F. H. Kreuger, E. Gulski and A. Krivda, "Classification of Partial Discharges", IEEE, Trans., EI, Vol.28, pp. 917-931, 1993.
- [9] T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-aided Measurement System", IEEE, Trans., EI-21, No.6, pp. 1015-1019, 1986
- [10] E. Gulski and A. Krivda, "Influence of Aging on Classification of PD in HV Components", IEEE Trans., EI, Vol. 2, No. 4, pp.676-684, 1995
- [11] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE, Trans. Elec. Insul., Vol. EI-12, No. 1, pp.2-18, 1976.
- [12] A. Ishibashi, T. Kawai and S. Nakagawa, ' A Study of Treeing Phenomena in the Development of Insulation for 500kV XLPE Cables', IEEE, Trans. EI, Vol.5, No.5, pp. 698-700, 1998.
- [13] N. Shimizu and C. Laurent, "Electrical Tree Initiation", IEEE, Trans. EI, Vol.5, No.5, pp. 653-655, 1998.