

고체유전체에서 발생한 부시형 전기트리에 수반된 내부 부분방전 펄스 해석

강성화[†] · 홍현문* · 류부형**

충청대학 산업안전과 · *동해대학 전기통신설비과 · **동국대학교 안전공학과
(1999. 12. 27. 접수 / 2000. 2. 26. 채택)

Internal PD Pulses Analysis Accompanying with Bush-type Tree in Solid Dielectrics

Seong-Hwa Kang[†] · Hyun-Mun Hong* · Boo-Hyung Ryu**

Department of Industrial Safety Engineering, Chungcheong College

*Department of Electrical Communication Installation, Tong Hae College

**Department of Safety Engineering, Dongguk University

(Received December 27, 1999 / Accepted February 26, 2000)

Abstract : Correlation between propagation of bush-type electrical tree and internal partial discharges(PD) was discussed. We used specimens with needle-plane electrode system made of LDPE(Low Density Polyethylene), observed inception and propagation of electrical tree by optical microscope interfaced with computer and investigated characteristics of phase resolved PD pulses accompanying with propagation of electrical tree. Electrical tree generally grew bush-type tree. PD data detected and analyzed were average discharge current and statistical operator of q -n, ψ - q_{avg} , ψ -n, ψ - q_{max} distribution. Parameters used were skewness, kurtosis, average discharge phase, cross-correlation factor, asymmetry and etc. In generally, average discharge current had good linear relationship with propagation of bush type electrical tree on this experiment. Peak discharge magnitude and repetition rate were increased, but they had not good linear relationship.

Key Words : bush-type electrical tree, partial discharges, average discharge current, skewness, kurtosis

1. 서 론

고체절연체에 전기트리가 발생하면 점진적인 열화과정에 의하여 치명적인 손상을 유발하여 절연특성을 상실케 하며 절연파괴를 초래한다¹⁾. 절연파괴에 의한 전기사고를 미연에 방지하기 위해서는 전기트리의 발생과 진전양상을 미연에 관측하는 것이 상당히 중요하며, 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. 그러나 현재 부분방전 펄스와 전기트리와의 직접적인 관계를 도출하는 것은 상당히 어려운 것으로 알려져 있으며, 많은 연구자들이 전기트리와 부분방전의 상관성을 연구하기 위하여 다양한 기법을 적용하여 연구 중에 있다^{4~6)}.

본 논문에서는 LDPE 시편에서 해초형 전기트리의 발생, 진전양상과 이에 수반되는 부분방전 펄스의 특성을 연구하여 전기트리의 성장 단계를 추정하기 위한 일반적이고 유효한 파라미터를 선정하였다. 이를 위하여 전기트리의 성장특성과 이에 수반되는 부분방전 펄스의 최대 방전전하량, 평균 방전전하량, 평균 방전전류, 발생

[†] To whom correspondence should be addressed.
shkang@chch.ac.kr

빈도수와 방전 펄스의 $q-n$, $\psi-q_{avg}$, $\psi-n$, $\psi-q_{max}$ 분포 및 이들의 왜도, 첨예도, 비대칭도 등을 검토하였다.

2. 실험

시편은 밀도 $0.92[g/cm^3]$ 의 펠렛형 LDPE 시료를 사용하여, $120^\circ C$ 에서 5분간 가열하여 판상 시료를 제작하고 $20 \times 30 \times 0.75$ mm 크기로 절단한 후, 두 개의 판상 시료에 침-평판 전극을 형성하고 전기트리의 개시·진전의 관찰을 용이하게 하기 위하여 두께 1.5 mm의 2차원적인 형태로 시편을 제작하였다. 침 전극과 평판전극의 간격은 1 mm로 하였다. 시편의 형상은 그림 1과 같다⁷⁾. 침 전극 부위에 보이드나 불순물이 존재하면, 전기트리의 특성 및 부분방전의 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 제작된 시편은 광학현미경으로 관측하여 결함이 없는 시편만을 선별하여 실험을 행하였다.

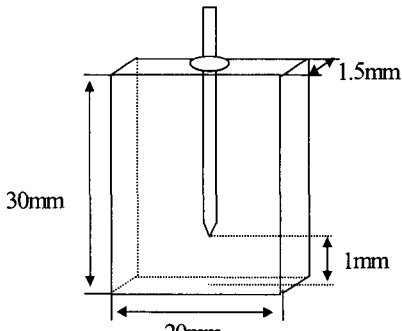


Fig. 1. Shape of specimen

본 실험에 사용한 실험장치의 Block Diagram은 그림 2와 같다.

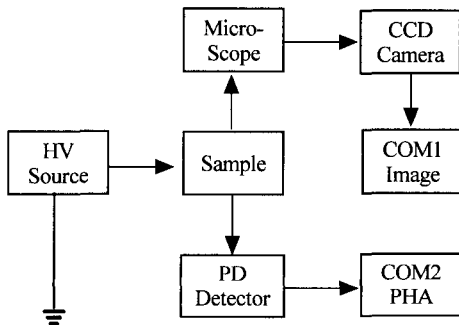


Fig. 2. Block diagram of measuring system

시편에서 발생한 전기트리의 진전양상을 광학현미경과 CCD 카메라를 사용하여 관측하고 컴퓨터에서 화상처리를 하여 전기트리의 진전길이 및 형상의 특성을 분석하였으며, PD 계측기에서 부분방전 신호를 계측하여 컴퓨터에서 신호를 저장하고, 부분방전 전하량, 발생 빈도 수, 평균 방전 전류 등을 해석하였다. 또한 부분방전 신호의 통계적 분포를 도출하고 이들로부터 왜도 및 첨예도를 각각 식(1) 및 (2)를 적용하여 계산하였다^{4,5)}.

$$\text{Skewness} = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\sigma^3} \quad (1)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\sigma^4} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 측정 값, p_i 는 i 번째 위상 각에서 x_i 값이 나타날 확률, μ 는 평균값, σ 는 표준편차이다. 전원으로는 PD free형 전원 공급 장치를 사용하여 침 전극에 9 kV의 전압을 일정하게 유지하여 전기트리의 발생과 진전 및 이에 수반되는 부분방전 펄스의 경시변화를 관측하였다. 부분방전 펄스는 5pC 이상의 펄스만을 계측하였으며, 부분방전 펄스의 정확한 통계적 처리를 위해서 본 실험에서는 300주기의 데이터를 저장하여 통계 처리하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구의 실험조건 하에서 발생한 전기트리의 성장은 대부분의 경우에 그림 3에 나타낸 바

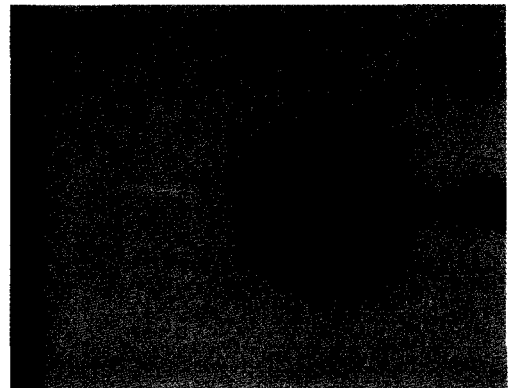


Fig. 3. Shape of bush-type tree

와 같이 해초형으로 성장하였다. 그림은 50% 성장한 트리의 일례를 나타낸 것이다. 전기트리가 해초형으로 성장한 것은 트리 채널 내 벽면에서의 부분방전이 가지 침단 부분으로의 방전에 비하여 활성화되어, 전기트리의 성장보다는 새로운 트리 채널의 형성이 더 활발해졌기 때문으로 생각된다.

전기트리의 성장단계별 부분방전의 특성을 검토하기 위하여 전기트리의 성장단계를 10%, 50%, 80%로 3단계로 구분하여 부분방전의 변화 추이를 검토하였다. 전기트리에 수반되는 부분방전은 동일한 조건하에서도 시편마다 다르게 나타나기 때문에, 일반적인 특성을 도출하기 위하여 30개의 시편에서 발생된 부분방전의 특성을 평균하여 검토하였다.

그림 4는 부시형 전기트리의 성장양상을 검토하기 위하여 전압 인가시간에 따른 전기트리의 성장특성의 일례를 도시한 것이다. 부시형 전기트리는 발생초기에 급격히 진전하지만 약 20% 정도의 진전을 보인 후에 진전속도가 크게 완화되었다. 이러한 완화 현상은 방전으로 인하여 트리 채널 내에 생성된 개스의 압력이 증가하였기 때문으로 사료된다. 그후 전기트리가 약 80% 정도 성장하였을 때 급격히 증가하기 시작하여 전로과피에 도달하며 이때 부분방전의 활동도가 가장 활발하게 된다.

그림 5는 전기트리의 성장길이에 따른 부분방전 펄스의 평균 방전전류 특성의 일례를 도시한 것이다. 전기트리의 길이방향 성장과 부분방전의 평균 방전전류 사이에는 전기트리의 성장초

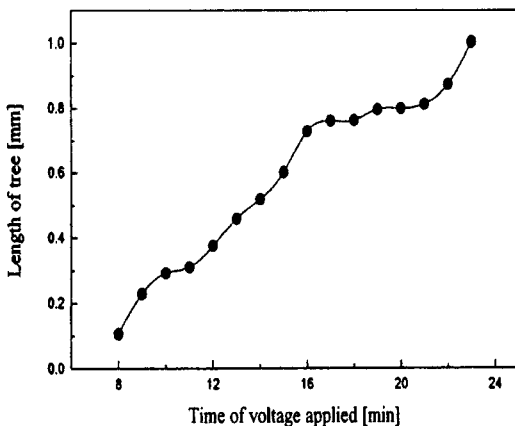


Fig. 4. Growth of bush type tree with duration of applied voltage

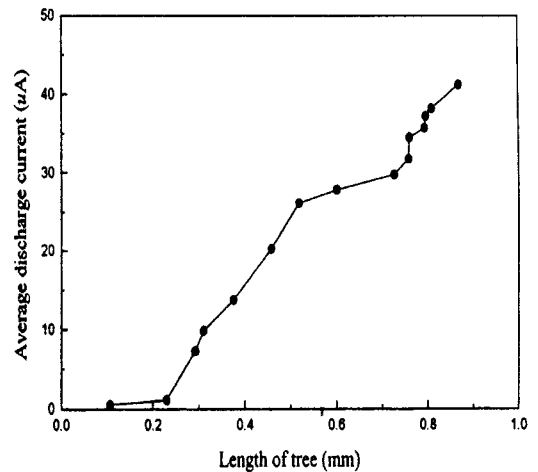


Fig. 5. Average discharge current with growing of bush type tree

기를 제외하면 비교적 선형적인 관계가 있는 것으로 관측되었다. 전기트리의 성장길이와 평균 방전전류의 선형성을 고려하면 평균 방전전류의 특성을 검토하므로써 전기트리의 성장정도를 추정하는 것이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 전기트리의 성장초기와 성장말기 및 절연과피 직전에는 선형성을 상실하고, 각각의 시편에서 발생된 전기트리마다 그래프의 기울기가 다르게 나타나므로 신뢰성 있는 결과를 도출하는데 어려움이 예상된다.

그림 6은 전기트리의 성장단계에 따른 q-n 분포의 특성을 도시한 것이다. 30개의 시편에서 발생한 전기트리에 수반된 부분방전 펄스의 평균치를 나타낸 것이다. q-n 분포의 일반적인 특성은 전기트리의 성장초기인 10% 성장일 때는 분포가 거의 정규분포의 형상을 가지며, 전기트리가 성장함에 따라 분포가 일그러지는 것으로 나타났다. 이것은 전기트리의 성장초기를 추정할 수 있는 유효한 정보로 생각된다.

q-n 분포의 편차는 동일한 성장길이에서 발생한 부분방전이라도 심하게 나타나며, 편차의 정도는 전기트리의 성장이 10%일 때가 비교적 적게 나타난다. 이것은 각각의 시편에서의 전기트리의 개시와 성장초기의 특성은 일반적으로 유사하지만, 성장이 진행되면서 전기트리의 성장형상, 즉 트리채널의 빈도수 및 채널의 형성각도 등에 따라서 부분방전의 발생이 달라지기 때문으로 생각된다. 또한, 50% 성장시와 80% 성장시의 q-n 분포의 특성은 80% 성장시의 편차가

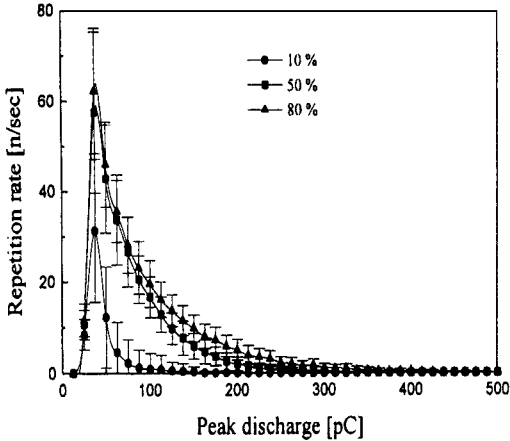


Fig. 6. q - n distribution of PD with growing of bush type tree

더 심하다는 것을 제외하고는 거의 유사한 특성을 나타낸다.

그림 7은 전기트리의 성장단계에 따른 ψ - q_{avg} 분포의 특성을 도시한 것으로 ψ - q_{avg} 분포는 인가전압의 각 위상각에서 발생한 부분방전의 발생빈도수 및 방전전하량을 동시에 검토할 수 있는 분포이다. 전기트리의 성장이 10%일 때와 50%일 때의 구별은 명확하다. 그러나 전기트리의 성장이 50%일 때와 80%일 때를 비교하면, 전체적으로 트리의 성장이 증가함에 따라 평균 방전전하량의 값이 상승하고, 크기는 50% 이상 상승한 것으로 나타난다. 그러나 분포의 편차가 심하기 때문에 경우에 따라서는 50% 성장시와 80% 성장시의 구분이 되지 않을 수도 있다. 그러나 ψ - q 분포에 비하여 평균적인 값의

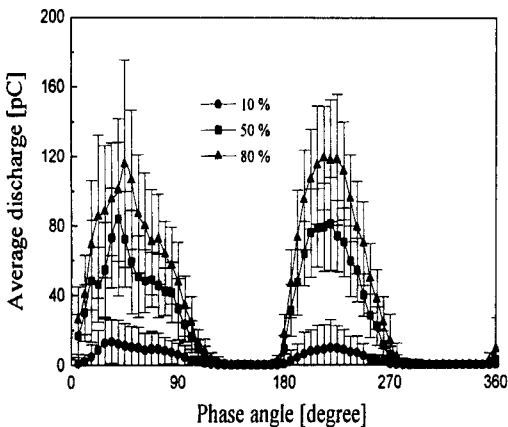


Fig. 7. ψ - q_{avg} distribution of PD with growing of bush type tree

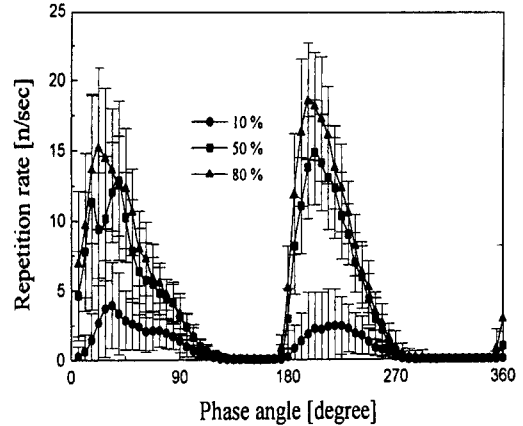


Fig. 8. ψ - n distribution of PD with growing of bush type tree

차이가 비교적 크고, 표준편차도 작기 때문에 전기트리의 성장정도를 추정하는데 유효할 것으로 생각된다.

그림 8은 전기트리의 성장단계에 따른 ψ - n 분포의 특성을 도시한 것이다. 전기트리의 성장에 따른 발생빈도수는 일반적으로 전기트리가 성장함에 따라 부분방전이 가장 많이 발생하는 위상각이 낮아지는 경향이 있다. 이것은 전기트리가 진전함에 따라 트리 채널의 첨단부위에 축적되는 공간전하의 양이 점차 증가하고, 인가전압의 극성이 바뀌는 순간에 전계가 증가하여 낮은 인가전압에서도 방전이 발생하기 때문이다.

그림 9는 전기트리의 성장단계에 따른 ψ - q_{max} 의 특성을 도시한 것이다. q - n 와 ψ - n 분포에 비하여 전기트리의 성장에 따른 변화량이 더 크게

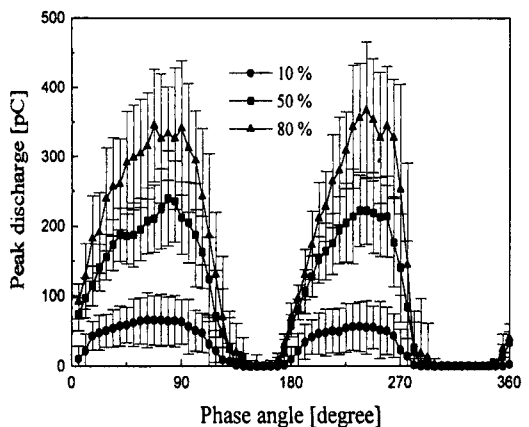


Fig. 9. ψ - q_{max} distribution of PD with growing of bush type tree

나타났으며, 분포의 편차도 크게 나타났다. 전기 트리의 성장이 10%일 때는 위상각에 따른 부분 방전의 크기가 거의 일정하게 나타나지만, 50% 성장시와 80% 성장시에는 인가전압의 최대치 부근에서 부분방전의 방전전하량이 커진다. 이것은 각각의 트리채널에서 발생하는 방전중에서 상대적으로 높은 방전개시전압을 갖는 트리채널의 방전이 인가전압의 최대치 부근에서 발생하기 때문으로 생각된다. 전기트리 개시의 초기에 나타나는 분포의 장방형 형태는 전기트리의 발생 초기단계를 추정하는데 유효할 것으로 생각된다. 그림 10은 전기트리의 성장에 따른 부분방전

의 ψ -q-n 분포의 특성변화를 도시한 것이다. 그림에서 x축은 방전전하량 [pC]이고, y축은 방전 위상각, contour는 발생빈도수를 나타낸다. ψ -q-n 분포는 부분방전의 방전전하량, 발생 빈도수 뿐만 아니라 부분방전의 발생 위상각을 동시에 검토하는 것이 가능하므로, 부분방전의 특성을 검토하는데 용이하다. 따라서 일부에서는 ψ -q-n 분포자체로 부분방전의 패턴을 분류하는 연구도 행해졌다[10]. 그러나 ψ -q-n 분포 자체만으로 부분방전의 특성을 정량화 하는 것은 데이터의 양이 많아지고, 특성화하기가 어려운 경우가 많기 때문에 ψ -q-n 분포로부터 여러 가지 분포를 도출하여 특성화하는 것이 바람직하다.

따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 전기트리의 성장특성과 이에 수반되는 부분방전 펄스들의 특성을 검토하였다. 전기트리의 개시와 성장특성과 부분방전 특성은 밀접한 관계를 갖지만, 인가전압, 전극의 형태 등의 주위환경에 많은 영향을 받기 때문에 각각의 특성량 단독으로는 특성화하기가 용이하지 않으므로 여러 가지 특성량을 동시에 관측하여 특성화하였다.

표 1은 전기트리의 성장에 수반된 부분방전 펄스의 분포로부터 도출한 통계적 연산자들을 나타낸 것으로 전기 트리가 50% 성장하였을 때의 일례를 나타낸 것이다.

일반적으로, 부분방전 펄스의 분포파라미터는 전기트리의 성장에 대하여 일정한 관계를 나타내는 것으로 나타났다. 그러나 위상각에 따른 최대 방전전하량 값을 나타내는 ψ -q_{max}는 분포의 특성상 왜도, 첨예도의 값이 일정한 경향을 갖지 않으며, 전기트리의 성장에 무관하게 나타나기

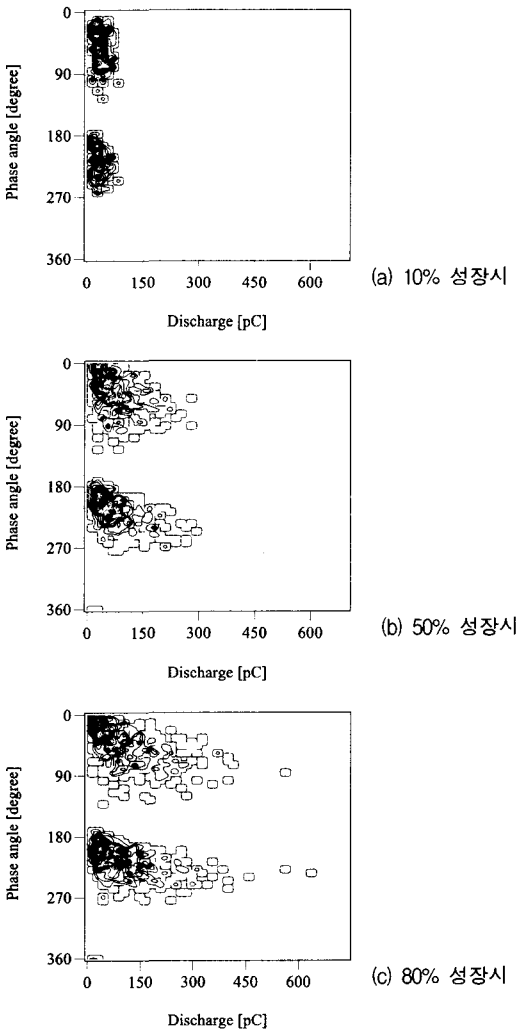


Fig. 10. ψ -q-n distribution of PD with growing of bush type tree

표 1. 부분방전의 분포파라미터

Table 1. Distribution parameters

	Distribution			
	$H_n(q)$	$H_{qn}(\psi)$	$H_n(\psi)$	$H_q(\psi)$
skewness +	1)0.1365	3)-0.135	11)-0.109	
skewness -		4)0.1797	12)0.1144	
kurtosis +	2)0.5097	5)0.1704	13)0.1261	
kurtosis -		6)0.2570	14)0.1488	
asymmetry		7)0.0948		
cc		8)0.0811		
phase +		9)0.0533	15)0.0470	17)0.0685
phase -		10)0.2219	16)0.2163	18)0.2355

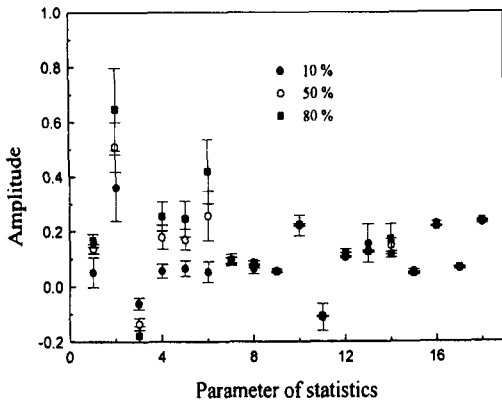


Fig. 11. PD distribution parameters with growing of bush type tree

때문에 특성의 고찰에서 제외하였다.

그림 10은 전기트리의 성장에 따른 부분방전 분포파라미터의 변화특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 q-n 분포의 왜도와 첨예도 값, ψ -q_{avg} 분포의 음의 주기 왜도와 양의 주기 및 음의 주기의 첨예도 값이 전기트리의 성장과 더불어 비교적 명확하게 증가한 것으로 나타났다. 따라서 분포 파라미터로부터 전기트리의 성장을 고찰하는 것에 유효한 것으로 사료된다.

그러나 전기트리가 성장함에 따라서 분포 파라미터들이 대체로 증가하는 경향을 가지지만, 50% 성장과 80% 성장의 표준편차 값이 비교적 크기 때문에 경우에 따라서는 50% 성장과 80% 성장에서의 부분방전 분포 파라미터의 차이를 구별할 수 없는 경우도 발생한다.

4. 결론

전기트리의 발생과 진전 양상을 예측에 적용하기 위하여 부분방전 펄스를 획득/해석하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) LDPE에 침-평판 전극을 형성하여 9kV의 전압을 인가한 결과 전기트리는 일반적으로 부시형 트리로 진전하였다.
- 2) 전기트리의 성장에 수반되는 부분방전 펄스의 평균 방전전류는 부시형 전기트리의 길이 방향 진전과는 선형적인 관계를 나타내었다.
- 3) 전기트리의 성장초기인 10% 진전과 50%, 80% 성장시와는 비교적 모든 분포들로부터 구

분이 가능한 것으로 나타났다.

4) 전기트리의 성장중기와 말기인 50% 성장시와 80% 성장시의 비교는 부분방전 펄스 분포중에서 ψ -q_{avg}와 ψ -q_{max} 분포가 유효한 것으로 나타났다으며, q-n 분포의 왜도와 첨예도 값, ψ -q_{avg} 분포의 음의 주기 왜도와 양의주기 및 음의 주기의 첨예도가 유효한 것으로 나타났다.

5) 부분방전 펄스의 특성을 검토하여 해초형 전기트리의 성장정도를 추정하는 것은 부분방전의 평균 방전전류 및 분포의 왜도와 첨예도 등을 검토함으로써 가능하지만, 신뢰성 있는 결과를 도출하기 어려운 경우도 발생하며, 특히 전기트리의 성장의 형태가 심각하게 다른 경우에는 보다 일반적인 특성량의 도출을 위하여 더 많은 연구가 필요하다.

감사의 글 : 본 연구는 1999년도 충청대학 학술연구비에 의해 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- 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) F. H. Kreuger, E. Gulski and A. Krivda, Classification of Partial Discharges, IEEE, Trans., EI, Vol. 28, pp. 917~931, 1993.
- 5) T. Okamoto and T. Tanaka, Novel Partial Discharge Measurement Computer aided Measurement System, IEEE, Trans., EI-21, No. 6, pp. 1015~1019, 1986.
- 6) L. Satish and W. S. Zaengl, Can Fractal Features be Used for Recognizing 3-d Partial Discharge Patterns? IEEE, Trans., EI, Vol. 2, No. 3, pp. 352~359, 1995.
- 7) 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.