

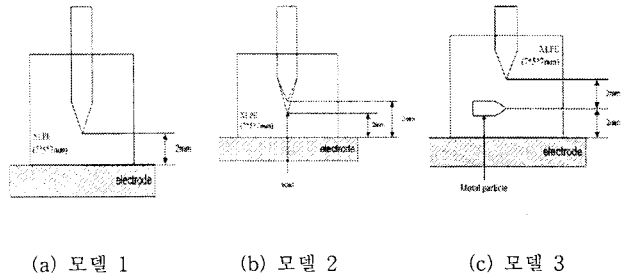
**XLPE 절연물내의 전기트리 진전 시 PD 검출 및 특성분석**

박성희, 정해은, 강성화\*, 임기조  
충북대학교, 충청대학교\*

**PD Detection and Analysis of Electrical Treeing Progress into XLPE Insulator**

Seong-Hee PARK, Hae-Eun JUNG, Seong-Hwa KANG\* and Kee-Jo LIM  
ChungBuk Univ., ChungCheong Univ.\*

**Abstract** - Solid insulation exposed to voltage is degraded by electrical tree process. And the degradation of the insulation is accelerated by voltage application. For this experimental, specimen of electrical tree model is made by XLPE (cross-linked polyethylene). And the size of the specimen is 7\*5\*7 mm<sup>3</sup>. Distance of needle and plane is 2 mm. Voltages applied for acceleration test are 12 kV to 15 kV. And distribution characteristic of degraded stage is studied too. As a PD detecting and data process, discharge data acquire from PD detecting system (Biddle instrument). The system presents statistical distribution as phase resolved. Moreover the processing time of electrical tree is recorded to know the speed of degradation according to voltage.



<그림 1> 3가지 형태의 결함에 따른 PD 모델

**1. 서 론**

전기트리 현상은 전기기기의 실제적인 수명에 중요한 영향을 주는 요소로서 국부 고전계 영역에서 시작되며, 전기트리의 진전에는 부분방전을 수반하게 된다. 절연체 내부에 존재하는 오염물, 전극과 폴리머 경계면 사이의 갈라짐, 섬유로 보강된 절연체의 경우 반도체 층의 돌출부, 그리고 절연체의 벌크 내에서 가스로 채워진 보이드 등과 같은 결함들은 국부적인 전계가 집중되어 전기트리가 생성될 수 있는 지점들이다. 전기트리의 발생 요인으로는 침 침단에 가해지는 반복적인 응력에 의한 기계적 피로, 침 침단에 존재하는 보이드, 기포 등에 의한 미소 부분방전, 전하 주입 및 추출에 의한 전기트리의 발생 등과 같은 이론들이 알려져 있다. 전기트리는 절연물 내에서 부분방전을 수반하게 되어 결국에는 절연파괴에 이르기 때문에 전기트리의 검출 및 진단은 전력기기의 안정성을 도모하는데 상당한 의미가 있다고 하겠다. 최근 노후 설비의 증가와 진단기술의 발달에 따라 상태기준 유지보수(condition based maintenance) 개념으로 전환되고 있다. 이러한 적용방식에서 중요한 위치를 차지하고 있는 기법이 전기적으로 여러 가지 정보를 유연하게 제공할 수 있는 부분방전(PD)에 의한 특성파악 기법이다. 절연물 내에서 전기트리가 발생하면 부분방전이 수반되므로 전기트리의 진전특성 및 진전속도 등을 부분방전의 특성을 분석함으로써 파악할 수 있다. 본 논문에서는 절연물 내에서 다양한 경로로 발생하게 되는 세 개의 전기트리 모델을 제작하여 전압을 인가한 후 전기트리의 진전 시 수반되는 부분방전 데이터를 취득하여  $\Phi$ -q-n 분포로 구현한 후 그로부터 도출된 통계적 분포 특성을 해석하였다. 또한 각 결함별 통계적 분포의 값을 트리 진전 단계별로 구별하여 특성을 분석하였으며, 이에 대한 트리 진전 속도 등의 특성도 파악하였다.

**2. 실험**

**2.1 실험 구성**

전기트리방전 실험에 사용된 절연재료는 대한전선에서 생산되고 있는 22.9 $\mu$ m 피복 전선의 XLPE(cross-linked polyethylene) 절연물 부분을 절개한 시편을 사용하였고 침전극은 스테인레스 스틸을 사용하였다. 절연물에 트리 발생용 침을 삽입할 때 침과 절연물 사이의 경계면이 완전히 밀착되도록 하기 위해 XLPE에 150℃의 온도의 hot press를 이용하여 가열·압축한 상태에서 시료를 제작하였고, 바늘 끝부분의 잔여변형을 경감하기 위하여 30분동안 담금질하였다. 침전극 샘플은 5 $\mu$ m의 반경을 가지는 Ogura<sup>®</sup> 바늘을 사용하였다. 실험 시에는 침단과 절연물 표면에서 발생하는 표면방전을 막기 위해 침전극 표면, 절연물과 침이 닿는 면 등에 절연재료인 에폭시를 도포하여 실험을 진행하였다. 또한 코로나 방전과 표면방전의 발생을 억제하여 보이드 방전 데이터를 취득하기 위해 절연유에 함침하여 실험하였다. 트리발생 모델은 <그림 1>의 (a), (b), (c)와 같이 세 가지 형태를 제작하였다. 모델 1은 절연물에 침이 존재하여 트리가 발생하는 경우이고, 바늘 끝과 평판전극 사이의 모델의 갭거리는 2mm이다. 모델 2는 침단 말단 부분에 보이드가 존재할 경우이고, 보이드로부터 전기트리 방전을 묘사하고 있다. 모델 3은 절연물 내에 금속이물이 존재하는 경우를 선정하였다. PD모델 용량은 7\*5\*7 mm<sup>3</sup>이고, 약 110℃에서 가열되어도 유지되도록 구성하였다.

**2.2 실험 방법**

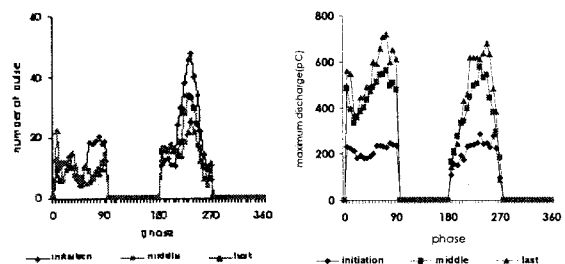
침에서의 트리 발생 모델에 대한 실험은 13kv를 인가하여 실험을 하였으며, 실험시에는 동일한 상태의 데이터 취득을 위하여 트리발생 후 전체구간의 10% 성장시점을 트리 발생 개시시점으로 선정하였으며, 성장 후 20 ~ 30%, 50 ~ 60%, 80% 이상의 총 세 단계로 구별하여 트리방전에 대한 데이터를 취득하였다. 침 끝단에 보이드가 존재하는 트리방전에 대한 실험은 침단에 보이드가 없을 경우와 비교하기 위해 13kv에서 방전양상 및 특성을 분석하였으며, 마찬가지로 트리 성장 후 20 ~ 30%, 50 ~ 60%, 80% 이상의 진행시점을 세 단계로 구별하여 부분방전 데이터를 취득하였다. 금속이물이 존재하는 트리방전에 대한 실험은 고체 절연물 내에 금속 등의 이물이 존재하는 경우의 방전양상에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 실험전압은 다른 트리 실험과 동일한 특성을 파악하기 위해 13kv로 하였으며, 침전극에서 금속이물로 향하여 성장하는 트리진전 특성에 대한 데이터 취득과 금속이물에서 대전극으로 향하는 트리진전에 대해 부분방전 데이터를 취득하였다.

부분방전 데이터를 통계적으로 처리하여 나타내기 위해서는 최소 100주기 이상의 부분방전데이터를 취득하여야 한다. 데이터는 1주기를 기준으로 sampling한 것의 정보를 갖기 때문에 1주기의 위상각을 64개의 구간으로 구분하고, 방전전하량을 크기별로 64개의 구간으로 분할한 후에 각각의 위상각 구간에서 발생한 부분방전의 개수를 방전전하량의 크기별 구간으로 계수하여  $\Phi$ -q-n 분포를 도출하였다. 또한 이것으로부터 통계적 분포를 도출하여 특성을 분석하였다.

**2.3 실험 결과**

<표 1> 모델 1의 단계별 열화시간

모델 1 (13kv)	Primary stage (20~30%)	Middle stage (50~60%)	Last stage (80%)
Processing time	11 min	38min	85min



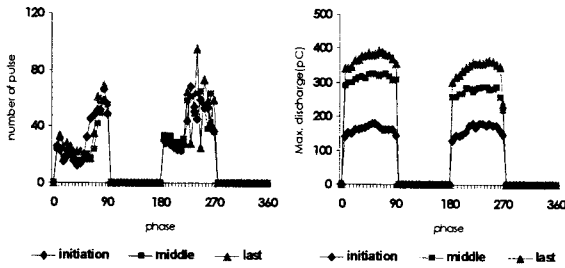
<그림 2> 모델 1의 Hn(φ)와 Hq(φ) 분포

<표 1>에서 침단에서 진전되는 트리 결함에 대한 열화시간을 나타내고

있다. 초기진전 시 트리의 진전속도는 상당히 빨리 진행하며, 말기로 갈수록 성장속도가 저하되고 있으며, 증기에서 말기의 진전시간이 증기까지의 진전시간과 비교해 보았을 때 현저하게 길어지고 있음을 알 수 있다. <그림 2>에서  $\Phi-n$  분포는 인가전압 위상각과 방전펄스 발생빈도를 나타내며, 음의 주기에서의 방전 횟수가 양의 주기에서의 방전 횟수보다 현저하게 크게 나타나는 것을 확인할 수가 있다.  $\Phi-q$  분포는 전체의 측정주기 동안 인가전압의 임계 위상각에서 측정된 최대방전 전하량을 나타내며, 그림을 통하여 위상각에 따른 방전량의 크기는 초기에서 말기로 진전할수록 많은 변화를 보이며 커진다는 것을 확인할 수가 있다.

<표 2> 모델 2의 단계별 열화시간

모델 2 (13kv)	Primary stage (20~30%)	Middle stage (50~60%)	Last stage (80%~)
Processing time	3 min	13min	58min

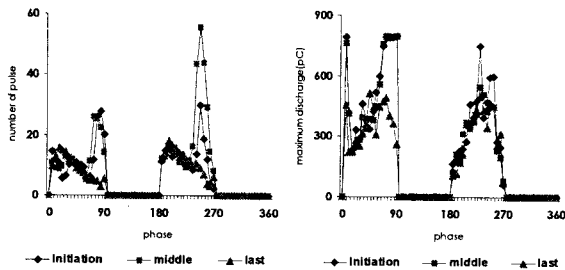


<그림 3> 모델 2의  $H_n(\phi)$ 와  $H_q(\phi)$  분포

<표 2>에서 초기 진전시간은 3min으로 상당히 빠르게 진행되는 것을 알 수 있으며, 말기까지의 진행시간도 모델 1과 비교하여 빠른 진전을 보이고 있다. 이는 침결합의 보이드에서 발생한 절연파괴가 트리진전에 영향을 미치고 있음을 보여준다. <그림 3>는 모델 2의  $H_n(\phi)$  분포에서는 열화진행시의 특성이 잘 나타나지 않고 있으며, 전체적으로 방전의 횟수 및 분포양상이 비슷하게 나타나고 있다.  $H_q(\phi)$  분포에서는 열화가 진행될수록 방전량의 크기가 현저하게 증가하고 있음을 나타냈으며, 열화진행의 특성을 가장 명확하게 구별해 낼 수 있는 분포임을 확인할 수가 있다.

<표 3> 모델 3의 단계별 열화시간

모델 3 (13kv)	Primary stage (20~30%)	Middle stage (50~60%)	Last stage (80%~)
Processing time	5 min	15min	43min



<그림 4> 모델 3의  $H_n(\phi)$ 와  $H_q(\phi)$  분포

<표 3>에서 초기에서 증기까지의 성장속도(성장길이/시간)는 열화증기에서 말기로의 성장속도에 비해 훨씬 빠른 진전을 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 금속이물로부터 진전하는 트리는 충분히 위험성을 지니고 있음을 보여준다 할 수 있다. <그림 4>는 모델 3의 분포는 모델 1과 2와는 다르게 열화초기와 증기에서의 방전량과 횟수가 오히려 크게 나타나고 있다. 이는 침을 통한 방전과 금속이물을 통한 방전이 복합적으로 나타나고, 내부공간전하의 영향으로 금속이물의 전계는 약화되어 방전전하량은 초기에서 말기로 갈수록 양의 주기에서 커지며, 음의 주기에서는 변동이 없는 형태를 보이고 있다. 또한 음의 주기에서는 트리진전시 생성되는 공극에 의한 코로나성 방전의 형태가 나타나므로 초기, 증기에서가 말기보다 더 많은 방전횟수를 보이는 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

전기트리의 시작은 상당히 미미하여 검출이 어려우며, 절연파괴의 단계인 말기로 진전 되어야 검출이 가능하기 때문에 상당히 위험하며 이것의 검출 또한 중요하다고 할 수 있겠다. 본 논문에서는 절연물 내에서 다양한 경로로 발생하는 전기트리의 특성을 파악하고자 세 가지의 발생모델을 제작하여 트리진전시 수반되는 부분방전 데이터를 일정주기 동안 획득하여 각 발생모델별 특성을 살펴보고자 하였다. 또한 각 결함에 대해 트리 진전의 단계별 진행시간을 측정하여 말기까지의 진전시간을 파악하여, 트리말기에서 절연파괴가 될 때까지의 추정을 위한 기본적인 특성으로서 사용하였다.

1. 절연물의 트리진전 진단기법으로서 부분방전검출은 방전원의 결합상태에 대한 유용한 정보들을 제공해 주었다. 즉, 전기트리의 진행시 수반되는 부분방전은 방전량, 방전횟수, 방전발생 위상각등 절연물의 현재 절연상태를 파악할 수 있는 정보를 얻을 수 있기 때문에 트리특성을 파악하는데 유용한 기법으로서 사용될 수 있다.

2. 트리결합은 말기로 진전되었을 경우의 검출이 중요한데, 이는 전력기의 유지·보수와 관련이 깊기 때문이다. 본 논문에서 선정한 각 트리발생모델은 말기로 갈수록 방전의 횟수 및 방전량이 증가하는 특성을 나타내었지만, 금속이물이 포함된 경우 트리방전의 특성은 금속이물에서의 복합적인 방전으로 인해 오히려 말기로 갈수록 방전량이 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 침결합으로부터 시작되는 트리를 초기단계로, 절연파괴가 발생되기 바로 전의 상태를 말기로 보았을 경우에는 말기의 방전량과 방전횟수가 증가되는 경향을 보여 전체적으로 살펴보았을 때는 말기로 진전이 될 경우에 부분방전 특성이 악화되는 경향을 나타내었다.

3. 트리 결함에 대한 부분방전 특성은 침결합에 보이드가 있는 경우와 금속이물이 삽입된 경우에서가 방전량 및 회수가 비교적 크게 나타났으며, 침결합에서만 성장하는 트리방전은 상대적으로 적은 값을 나타내었다. 이는 보이드 및 금속이물에 의해 방전이 복합적으로 발생되어 나타나는 현상으로 판단된다.

4. 각 결함별로 트리방전의 진전시간은 침합에 보이드가 존재할 경우가 진전시간이 가장 짧게 나타나는데, 이는 보이드의 절연파괴의 발생으로 인한 복합적인 요소로 인해 트리진전이 빠르게 진행되기 때문이다. 하지만, 금속이물이 포함되었을 경우에는 금속이물부터 절연파괴까지의 단계에 대한 검출이 중요하고, 이 단계에서의 트리진전 시간을 살펴보았을 경우에는 말기로의 진전이 가장 빠르게 진전이 되고 있음을 알 수 있다. 결국 복합적인 요인으로 인한 트리의 진행이 더욱 열화진행을 가속시키는 결과를 나타내는 것이라 할 수 있겠다.

### [감사의 글]

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF - 2005 - 041 - D00319)

### [참 고 문 헌]

- [1] R. Bartnikas, "Partial Discharges, Their mechanism, Detection and Measurement", IEEE Trans. on EI, Vol. 9, No. 5, p. 763 - 778, 2002.
- [2] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Temple Press, p. 1-14, 1989.
- [3] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda, "Classification of Partial Discharge", IEEE Trans. on EI, Vol. 28, No. 6, p. 917 - 922, 1993.
- [4] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 1, p. 82 - 97, 1992.
- [5] B. Fruth and L. Niemer, "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 1, p. 60 - 65, 1992.
- [6] E. Kuffel, W. S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals", Peagamon International Library, p. 377 - 411, 1984.
- [7] L. L. Alston, "High Voltage Technology", p 17 - 57, 1986
- [8] J. Densley, "Aging Diagnostics Extended Insulations for Power Cables", Proc. 5th Int. Conf. Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Leicester, UK, p. 1-15, 1995.
- [9] Suwaruno, H. Ichikawa, Y. Suzuoki, T. Mizutani and K. Uchida. "Partial Discharge Patterns of Electrical Treeing in Polyethylene", Proc. 4th Int. Conf. Properties and Application of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, p. 379-382, 1994.