

XLPE 케이블의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성 검토

論 文
49C-7-5

A Study on the Electrical Properties of Electrical Tree Degradation in XLPE Cable Insulation

姜 東 植* · 宣 鍾 好** · 李 弘 植*** · 朴 正 后[§] · 曹 井 守^{§§}
(Dong-Sik Kang · Jong-Ho Sun · Hong-Sik Lee · Chung-Hoo Park · Jung-Soo Cho)

Abstract - In order to improve the reliability of XLPE cables, it is necessary to understand the mechanism of electrical and water tree degradation. Especially, electrical tree initiation and propagation are important in XLPE cable insulation. This paper deals with the change of electrical properties of XLPE cable insulation with electrical tree degradation. To understand the electrical properties of XLPE insulation, specimens were prepared by 22.9kV distribution cable and made in a type of block. Ogura needles having tip radius of 10 μ m were inserted into each block pieces. AC voltages of 8kV, 10 kV and 12kV at 60Hz were applied to needle. We investigated the relationship between electrical properties(PD quantity, $\tan \delta$ and DC current) and the growth of electrical tree. The electrical properties of the specimens were measured from initiation of tree to breakdown and their characteristics were analyzed.

Key Words : Electrical tree, XLPE, 부분방전, 유전정접, 직류누설전류

1. 서 론

XLPE(cross-linked polyethylene) 절연재료는 1960년대에 개발된 이래 현재까지 전력용 케이블의 주절연체로 사용되고 있다. 이러한 XLPE 케이블은 재료관리에서부터 이물이 관리되고, 제조공정 중에서도 이물 및 보이드의 발생이 최소화되도록 관리된다. 그러나 제조공정의 주의에도 불구하고 케이블의 절연체 내에는 규정치 이하의 이물 및 제조불량으로 인한 큰 이물 및 보이드가 존재할 수 있다. 이러한 보이드 및 이물에 높은 전계강도가 가해지면 XLPE 절연체 내에는 전기트리가 발생하게 되어 열화되기 시작하며, 장시간의 열화현상 후 최종적으로는 전극간 절연파괴를 일으키게 된다[1].

전기트리의 검출을 위해서 부분방전측정법, 유전정접법 등 여러 가지의 측정법에 의한 진단장치가 개발되어 일부 사용되고 있지만, 현재까지 사용되고 있는 진단장치는 대부분이 한가지 진단법에 의하여 측정을 행하고 판정을 하는 방법을 사용하여 왔다[2,3,4]. 또한 전기트리는 인가전계의 크기에 따라 부시형트리, 가지형트리 등 여러 가지 형태로 분류되며 진전속도도 다른 것으로 알려져 있다[5]. 이러한

트리종류에 따라서 트리성장에 따른 전기적특성의 변화는 다른 것으로 알려져 있다. 그러므로 여러 가지 진단 인자를 사용하여 트리에 대한 특성치 변화경향을 분석하여 최적의 진단기법을 찾아내는 것은 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 실제 22.9kV 케이블에서 사용되고 있는 XLPE 케이블 절연층을 일정형태(20 x 20 x 3[mm])로 만든 다음 Ogura 침전극을 삽입하여 전압의 크기를 변화시켜 여러 가지 형태의 전기트리를 발생시켰으며, 초기상태에서부터 전기트리가 성장하여 절연층이 파괴될 때까지의 최대 부분방전 및 유전정접, 직류누설전류 및 성극지수의 변화특성을 관찰하였다.

2. 전기트리 특성

트리는 고체 절연체 중에서 발생하는 수지상의 절연파괴 부분을 말한다. 트리는 주로 두꺼운 고체절연물에서 보여지며, 국부 고전계에 의해서 절연층에 형성되는 것으로 일반적으로 전기트리와 수트리로 구분된다. 최근 XLPE 전력용 케이블에 관한 연구 및 생산기술 향상으로 3중 동시 압출방식 및 차수구조를 적용함으로써 절연층 계면의 돌기 및 보이드 크기 및 수량이 현저히 감소하였으며 수분침투 가능성도 많이 줄어들었지만, 외상에 의한 사고를 제외하고는 트리발생에 의한 절연파괴가 대부분을 점유하고 있다[1,6].

케이블 장기 사용중 발생하는 전기트리는 직경 수 μ m 정도의 미세한 채널구조를 가지며, 고전계에서는 부시형(bush type)으로 진전되며 저전계에서는 가지형(branch type)으로 진전된다. 또한 가지형이 부시형보다 트리 진전속도가 빠른 것으로 나타났다[5]. 이러한 전기트리의 진전 모델을 그림 1과 같이 생각할 수 있다. 그림 1에서 살펴보면, 전계가 집중

* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 先 任 研 究 員

** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 先 任 研 究 員

*** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 責 任 研 究 員 · 工 博

§ 正 會 員 : 釜 山 大 工 大 電 子 電 氣 通 信 工 學 部 正 教 授 · 工 博

§§ 正 會 員 : 釜 山 大 工 大 電 子 電 氣 通 信 工 學 部 正 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999 年 11 月 23 日

最 終 完 了 : 2000 年 6 月 1 日

되는 첨예부분에서 트리가 발생하면 부분방전 현상이 일어나고 트리 채널 내부를 침식시킨다. 이 때 부분방전에 의한 분해가스압력에 따라서 방전이 정지하는 경우도 있지만, 가스확산에 의해서 다시 방전이 일어난다. 트리 채널이 어느 정도 깊어지면 국부 집중방전이 일어나면서 트리가 진전한다. 이와 같이 방전은 진전하지만 트리 채널내의 압력 상태나 채널내벽의 방전 부산물 등에 의해서 방전이 억제되어 트리의 진전이 정지하는 경우도 있다[1,7]. 일반적으로 동일 시료 하에서 전기트리의 형상 및 성장률은 인가전압, 주파수, 침전극 곡률반경 및 온도 등의 영향을 받으며, 침전단의 전개집중 부위에서 발생하는 전자·정공의 주입 및 이동에 의하여 생성된 트리 채널 내의 가스 압력과 절연재료의 분자구조에 따른다[10].

트리 성장에 대한 방전에너지를 파악 할 수 있는 여러 발광현상 측정실험이 행하여 졌다. 보이드가 없는 시료조건으로 인가전압을 변화하며 측정된 실험 예를 살펴보면, 저전계 하에서는 시간경과에 따라 가지형 트리로 진전하면서 발광량의 증대현상을 보이나 발광량의 변동이 심한 것으로 나타났다. 반면 고전계 하에서는 시간경과에 따라 부시형 트리로 진전하면서 발광량의 증대현상이 적으나 발광량의 변동은 크지 않는 것으로 나타났다.[11]

일반적인 전기트리에 관련된 실험법으로서 CIGRE에 의해 제안된 방법에 의하면 침전극을 이용하여 트리를 발생시키도록 되어 있으며, 트리의 발생기준은 부분방전의 발생을 기준으로 하고 있다.

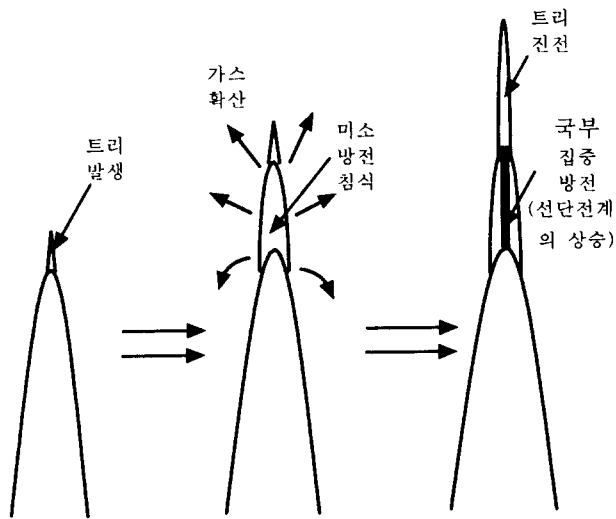


그림 1 전기트리의 발생 및 진전 모델
Fig. 1 Models of electrical tree initiation and propagation

3. 실험

3.1 시료제작 및 실험장치

XLPE 케이블의 전기적 열화인자 도출을 위한 실험으로 실제 이용되는 전력케이블을 사용하는 것이 가장 바람직하지만 일정한 시간 내에 많은 실험을 수행할 수가 없는 관계로, 본 연구에서는 국내 지중배전 선로에 이용되는 22.9kV 급 XLPE 전력케이블의 절연체로부터 20 x 20 x 3[mm]씩 잘

라내어 시료로 사용하기로 하였다. 전기트리 발생을 위한 침전극은 전기트리 실험용으로 많이 사용되고 있는 Ogura 바늘(곡률 반경은 10 μm, 선단 각도는 30 °)을 이용하였으며, 전극의 형태는 그림 2와 같은 침대 평판 구조로 하여 시료의 중앙 부위에 바늘을 삽입하여 바늘 끝에서 대향전극까지의 갭 길이는 일정하게 3 [mm]로 설정하였다. 바늘 삽입을 위한 취부금구를 제작하여 시료를 고정한 후, 열풍기로 시료의 온도를 90 - 100 °C로 유지시킨 다음 서서히 바늘을 갭 길이 지점까지 삽입한 다음 상온으로 서냉한다. 이때 냉각도중 바늘이 밀려나오는 것을 방지하기 위하여 시료와 전극의 경계를 에폭시 수지로 견고하게 유지시켰다. 전극이 삽입되지 않은 반대쪽 표면은 실버 페이스트(Dotite D-500)를 얇게 도포하여 대향전극을 형성하였다.

이와 같이 준비된 시료는 전압인가시 발생하는 연면방전을 방지하기 위하여 제작한 실리콘유가 들어있는 아크릴 측정용기(300 x 150 x 50[mm])에 담근 후, 그림 3과 같이 자체 제작한 전기트리 가속열화 실험장치에 결선하여 인공적으로 전기트리를 발생되게 하였다. 또한 트리의 진전형태를 분석하기 위한 그림 3과 같은 관측시스템을 구성하였다.

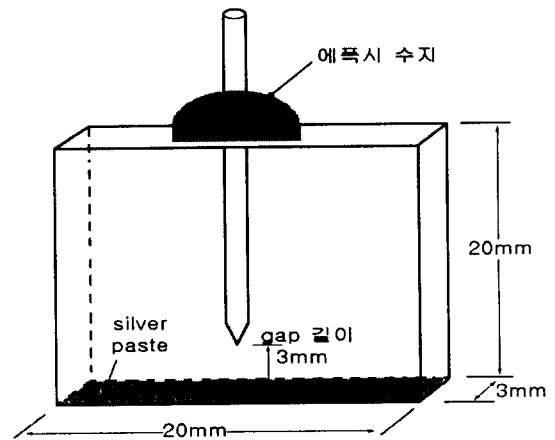


그림 2 전기트리용 시료 형상
Fig. 2 Configuration of the specimens for electrical tree

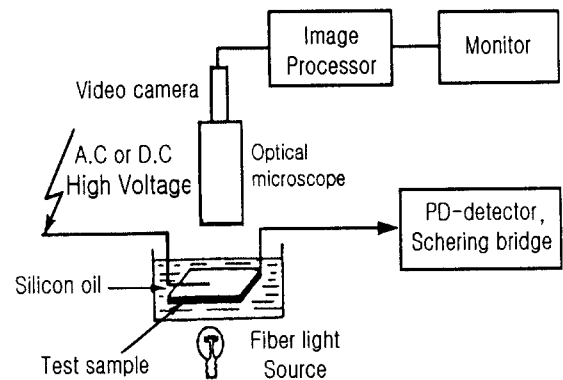


그림 3 전기트리 가속열화 측정장치 개략도
Fig. 3 Schematic diagram of electrical tree accelerated aging measurement system

3.2 실험방법

3.2.1 부분방전 실험

시료에 삽입된 침전극에 가해지는 가속열화 인가전압은 교류 60[Hz]인 8kV, 10kV, 12kV로 하였으며, 각각의 인가전압 조건에서 발생하는 부분방전은 부분방전 측정기(NIHON model CD-5)로 그림 4와 같이 구성하여 최대 부분방전량의 변화를 측정하였다. 이때 부분방전 측정전압은 시료에 연속으로 인가되는 각각의 전압으로 하였으며, 각 시료에서 트리가 발생하기 시작하여 절연층이 파괴될 때까지 부분방전량의 변화 및 트리의 진전형태를 연속하여 측정하였다.

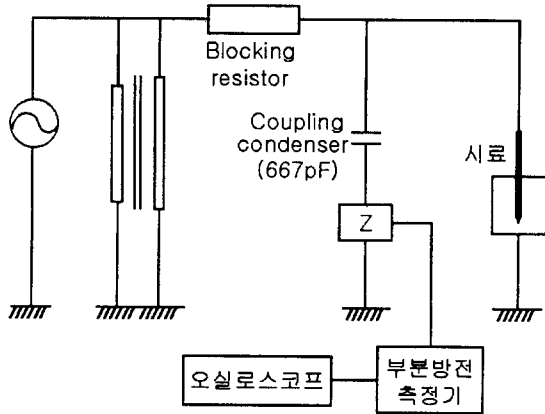


그림 4 부분방전 측정 실험회로
Fig. 4 Schematic diagram of partial discharge measurement system

3.2.2 유전정접 (tan δ) 실험

시료에 삽입된 침전극에 가해지는 가속열화 인가전압은 부분방전 실험에서와 같이 교류 60[Hz]인 8kV, 10kV, 12kV로 하였으며, 각각의 인가전압 조건에서 발생하는 유전정접은 schering bridge(Tettex type 2801)로 측정회로를 구성하여 유전정접량의 변화를 측정하였다. 이때 유전정접 측정전압은 시료에 연속으로 인가되는 각각의 전압으로 하였으며, 각 시료에서 트리가 발생하기 시작하여 절연층이 파괴될 때까지 유전정접량의 변화 및 트리의 진전형태를 연속하여 측정하였다.

3.2.3 직류전류 실험

시료에 삽입된 침전극에 가해지는 가속열화 인가전압은 부분방전 및 유전정접 실험에서와 같이 교류 60[Hz]인 8kV, 10kV, 12kV로 하였다. 각각의 인가전압 조건에서 트리가 일정한 크기로 성장하였을 때마다 교류전원을 제거하고 직류 전압발생 및 누설전류 측정기(AVO MEGGER-BM25)로 직류 5kV의 전압을 인가한 상태에서 RS232C로 연결된 컴퓨터로서 일반적으로 절연저항을 의미하는 1분에 해당하는 직류 누설전류와 10분누설전류에 대한 1분누설전류의 비인 성극지수(P.I.)를 측정한 후 다시 교류전압을 인가하는 방법으로,

각 시료에서 트리가 발생하기 시작하여 절연층이 파괴될 때까지 직류누설전류의 변화 및 트리의 진전형태를 연속하여 측정하였다.

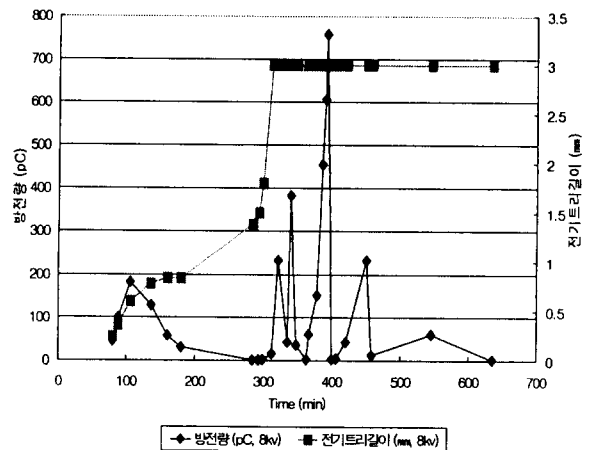
4. 실험결과

4.1 부분방전 실험결과

그림 5의 부분방전 실험결과에서는 인가전압 8, 10, 12kV에서의 가속열화 시간에 따른 전기트리 성장길이에 대한 최대 부분방전 변화량의 관계를 보여주고 있다. 여기에서 전계강도가 제일 작은 인가전압 8kV에서의 결과는, 가속열화에 따라 그림 8(a)에서와 같이 가지형 트리가 일정하게 성장함에도 불구하고 부분방전량은 일정한 증가경향을 보이지 않고, 트리가 접지전극에 도달하여도 즉시 절연파괴가 일어나지 않았다. 반면 인가전압이 10kV 및 12kV에서 나타난 결과는 트리가 성장함에 따라 부분방전량도 유사한 증가경향을 보이고 있다. 또한 전계강도가 높은 경우에는 가속열화에 따라 그림 8(c)에서와 같이 부시형 트리로 일정하게 성장하는 것으로 나타나 기존의 연구결과와 잘 일치되었다[5].

이러한 결과는 전계강도가 높을 경우 방전에너지가 높아 트리 성장길이에 해당하는 방전이 일어나서 최대 부분방전량과 트리길이가 비례하는 반면, 인가전압이 낮은 저전계강도에서는 방전에너지가 적어 트리 성장길이에 해당하는 부분방전이 계속 일어나지 못하고 간헐적으로 발생되며 트리 채널중 부분적으로 작은 방전이 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 현상은 발광현상을 통하여 측정된 실험결과와 잘 일치되는 것으로 보여진다[11]. 또한 트리가 대향전극에 도달하여도 즉시 절연파괴가 발생되지 않는 것은 방전에너지가 적어서 본 실험용변압기의 차단부를 동작시키지 못하기 때문인 것으로 고려된다.

이상과 같은 전기트리 성장길이에 따른 부분방전 실험결과에서 고전계 조건에서는 방전에너지가 충분히 큰 방전이 연속되므로 최대 부분방전량 측정에 의하여 절연파괴 위험정도를 알 수 있으나, 저전계 조건에서는 방전에너지의 변화가 심하여 일정 크기의 연속된 방전을 볼 수 없으므로 최대 부분방전량에 의한 전기트리 성장경향을 파악하기가 곤란하였다.



(a)

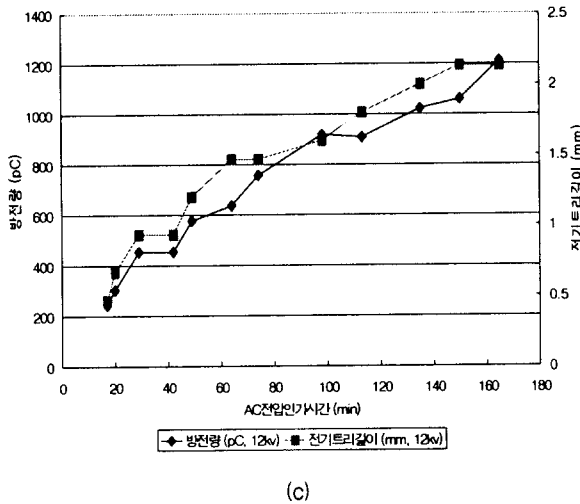
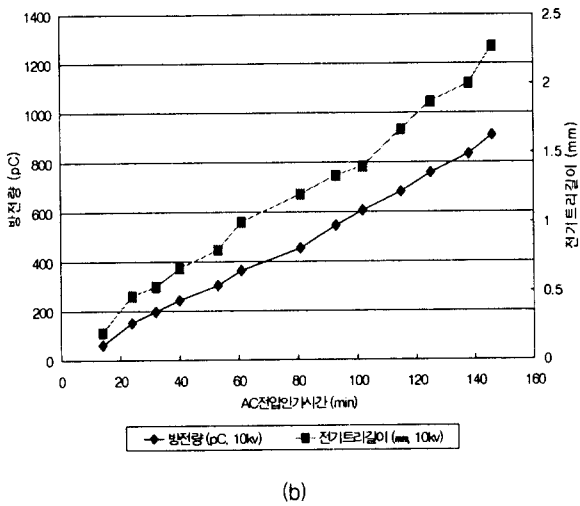


그림 5 전기트리 성장길이와 최대 부분방전량과의 관계
(a) 인가전압 8kV (b) 인가전압 10kV
(c) 인가전압 12kV

Fig. 5 Relation between electrical tree growth length and maximum partial discharge magnitude
(a) applied voltage is 8kV
(b) applied voltage is 10kV
(c) applied voltage is 12kV

4.2 유전정접 ($\tan \delta$) 실험결과

그림 6의 유전정접 실험에서는 인가전압 8, 10, 12kV에서의 가속열화 시간에 따른 전기트리 성장길이에 대한 유전정접 변화량의 관계를 보여주고 있으며, 유전정접값은 전압인가 시점부터 트리발생 후 파괴직전까지 측정하였다. 트리가 처음 성장할 때는 트리길이가 증가함에 따라 유전정접값도 증가하고 있지만, 트리길이가 일정 크기 이상으로 증가하면 유전정접값의 증가정도가 감소하는 경향을 보이다가, 절연파괴 직전에는 오히려 유전정접값이 진동을 하거나 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그림 7은 그림 6에서 나타난 10kV 조건의 유전정접 초기값은 높아 다른 전압 조건과 비교하기 어려우므로, 각 인가전압에서의 유전정접 차이값($\tan \delta_1$: 각

시점에서의 유전정접값 - 부분방전 발생전 초기치 유전정접값)과 전기트리 성장길이를 나타낸 것으로 유전정접 특성변화가 잘 나타나고 있다.

이러한 현상은 전기트리 발생초기에는 트리가 왕성하게 생성 혹은 진전하여 방전전류값이 증가하지만, 일정 크기 이상 트리가 진전되면 방전전류값이 포화상태를 보이다 방전전류값이 감소하다가 절연파괴에 도달한 것으로 보여진다 [8]. 이러한 이유로 절연파괴직전에 유전정접값이 감소하는 것으로 고려된다. 또한 그림 8의 전기트리 형상을 살펴보면, 유전정접 실험에서도 부분방전 실험에서와 같이 저전계강도에서는 가속열화 시간에 따라 가지형 트리가 일정하게 성장하였으며, 고전계강도에서는 부시형 트리로 성장하는 것으로 관측되어 졌다. 본 연구에서 나타난 저전계강도에서 발생하는 가지형 트리는 축방향 트리진전길이도 길며 횡방향 트리 발생폭도 넓게 나타나 인가전압 8kV에서의 $\tan \delta_1$ 이 높은 것으로 보여진다.

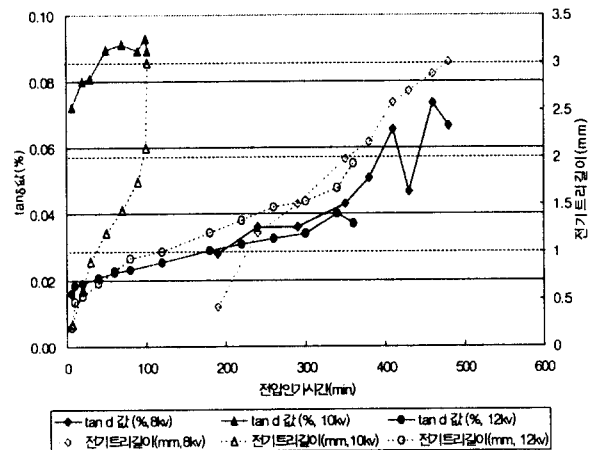


그림 6 전기트리 성장길이와 유전정접과의 관계
Fig. 6 Relation between electrical tree growth length and dielectric loss angle

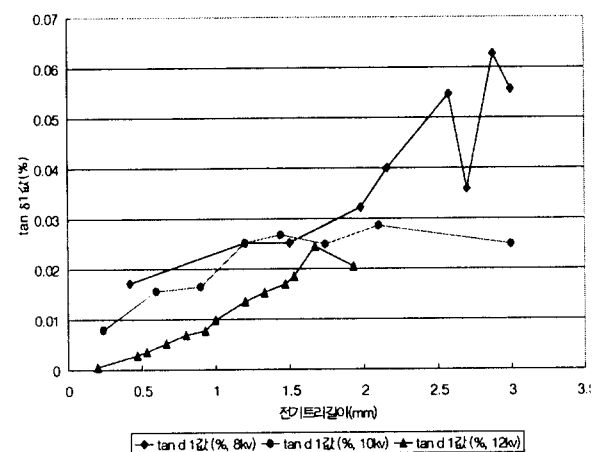


그림 7 전기트리 성장길이와 유전정접 차의 관계
Fig. 7 Relation between electrical tree growth length and dielectric loss angle difference

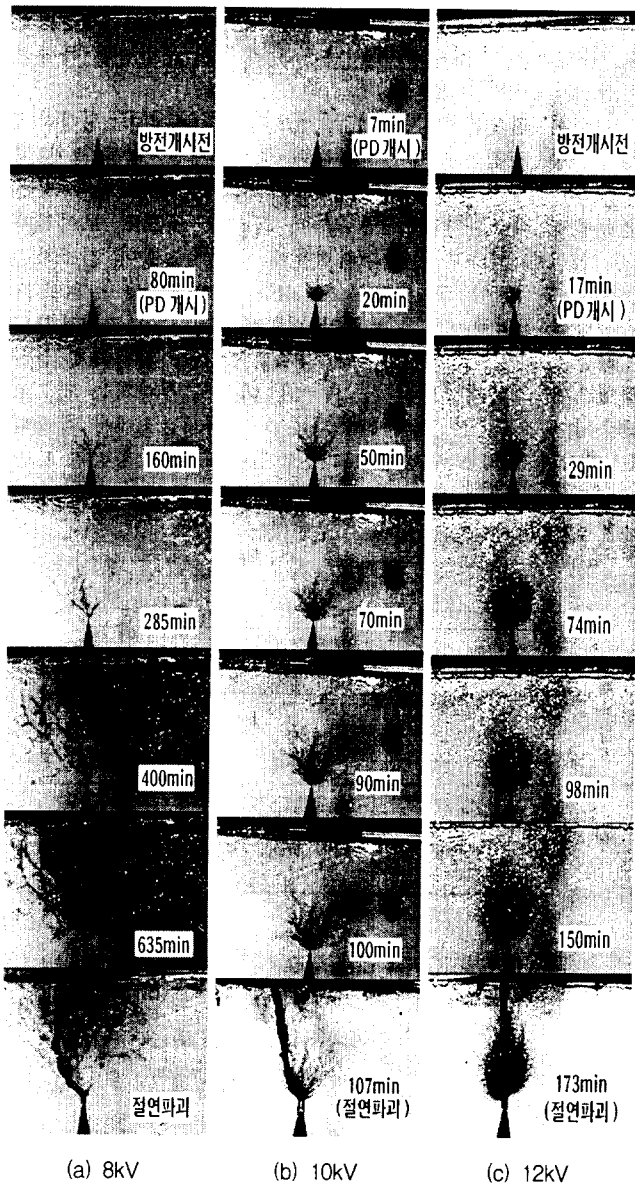


그림 8 인가전압에 따른 전기트리 성장 구조
Fig. 8 Electrical tree growth structures according to applied voltages

4.3 직류전류 실험결과

직류전류 측정실험에서는 인가전압 8, 10, 12kV에서의 전기트리 성장길이에 대한 직류전류 변화량의 관계를 고찰하였다. 8kV와 12kV에서는 전기트리 길이가 증가하여도 10분 누설전류가 본 계측기의 오차 측정한계인 10pA 이하로 나타났다. 그림 9는 가속열화 시간에 따른 전기트리 성장길이에 대한 1분 누설전류를 나타내었으며, 그림 10은 P.I.비(각 측정조건에서의 10분 누설전류에 대한 1분 누설전류의 비인 성극지수 / 초기 10분 누설전류에 대한 1분 누설전류의 비인 성극지수)를 나타내었다. 각 전압조건에서 전기트리는 계속 성장하였으나 1분 누설전류 및 10분 누설전류는 진동하는 경향으로 나타났다. 또한 P.I. 및 P.I.비도 경향을 판단하기 곤란하였다. 실제 직류전류실험이 전기트리에 의한 열화상

태에 민감한 특성을 가질 경우 트리길이가 증가할수록 누설전류크기는 증가해야하고, P.I는 감소경향을 보여야 하지만 그러한 경향을 보이지 않고 있다. 이러한 실험결과를 고려하면 전기트리 길이에 대한 직류전류 특성은 전기적 특성인자로 고려되어지지 않는다.

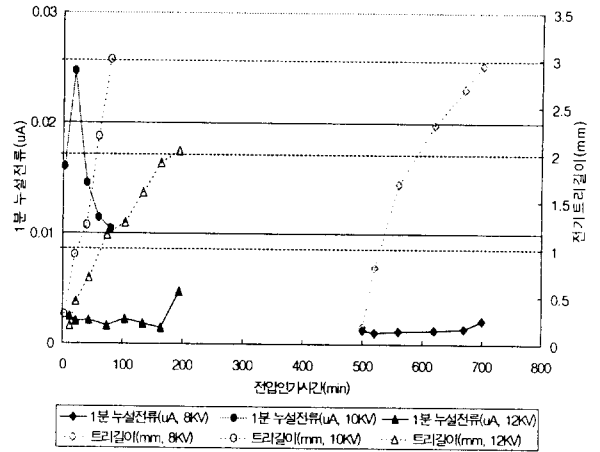


그림 9 전기트리 성장길이에 직류누설전류의 관계
Fig. 9 Relation between electrical tree growth length and dc leakage current

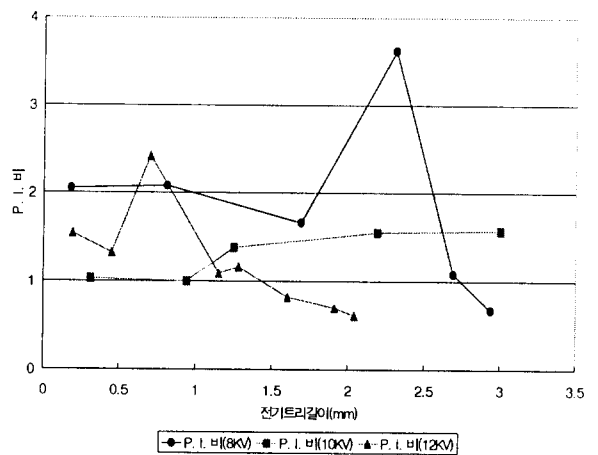


그림 10 전기트리 성장길이에 성극지수비의 관계
Fig. 10 Relation between electrical tree growth length and polarity index ratio

5. 결 론

본 논문에서는 향후 XLPE의 진단 파라메타 도출에 이용하기 위하여 실제 사용되는 XLPE 시편에 침전극을 삽입한 모델 전기트리 시료를 제작하고 가속열화 상태에 따른 전기적 특성실험으로서 부분방전 측정실험, 유전점정 측정실험, 직류누설전류 측정실험을 실시한 결과, 다음과 같은 특징들을 알 수 있었다.

1. 부분방전 실험에서 인가전압 10kV와 12kV에서 발생된 부시형 트리는 최대 부분방전량이 전기트리 길이와 비례하

지만, 상대적으로 저전계강도에 해당되는 인가전압 8kV에서 발생된 가지형 트리에서는 최대 부분방전량이 전기트리 길이에 비례하지 않는 경향으로 나타났다.

2. 유전정접 실험에서 유전정접값 및 유전정접 차이값 ($\tan \delta_1$: 각 시점에서의 유전정접값 - 부분방전 발생전 초기 유전정접값)은 전반적으로 전기트리 길이에 비례하여 증가하는 경향을 보였지만, 절연과피 직전에는 감소하는 경향으로 나타났다. 이를 이용하여 추가적인 연구가 수행되면 절연과피 직전의 상태를 찾아내는데 활용할 수 있는 것으로 사료된다.

3. 직류전류 실험에서는 1분누설전류 및 10분누설전류가 진동하는 경향으로 나타났으며, P.I. 및 P.I.비도 경향을 판단하기가 곤란하였다. 그러므로 전기트리 길이에 대한 직류전류 특성을 이용하기가 어려운 것으로 보여진다.

참 고 문 헌

- [1] 速水敏行, "CV케이블", コロナ社, 1986.
- [2] 特別高壓回轉機・케이블의絶縁劣化診断技術調査委員会, "特別高壓回轉機・케이블의絶縁劣化診断技術", 日本電氣學會技術報告 第2部 267号, pp51-103, 1988. 3.
- [3] 木山謙一郎, "特別高壓 케이블의 壽命診断", OHM, pp27-33, 1996.10.
- [4] T.Hashizume, T.Tani, "A Reconsideration of Criteria for Insulation Diagnosis of 6.6kV XLPE Cable", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, pp193-196, 1993. 08.
- [5] Seeding, H.G. et. al., "Partial Discharge Characteristics of Electrical Trees in Polymeric Cable Insulation", Conf. record, Conf. on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, pp91-96, 1994.
- [6] 特別高壓 CV 케이블의絶縁劣化診断技術調査委員会, "特別高壓 CV 케이블의絶縁劣化形態と絶縁診断技術の動向", 日本電氣學會技術報告 第668号, 1998.
- [7] N.Hozumi et. al., "The Influence of Space Charge on the Growth of an Initial Electrical Tree in Polyethylene", T. IEE Japan, Vol. 111-A No.4, 1991.
- [8] 이광우 외, "부시형 전기트리에 수반되는 부분방전의 특성분석", 대한전기학회 춘계학술발표연구회 논문집, pp124-128, 1999.
- [9] 강동식 외, "XLPE의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성의 변화", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp2136-2138, 1999.
- [10] N.Yoshimura et. al., "Influence of Morphology on Tree Initiation and Growth in Polyethylene", T. IEE Japan, Vol. 117-A No.4, 1997.
- [11] S.Kobayashi, K.kudo, "交流トリーの進展に伴う發光現象のカオス性", T. IEE Japan, Vol. 116-A No.8, 1996.

저 자 소 개



강 동 식 (姜 東 植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년~현재 한국전기연구소 신전력기기그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1573, Fax : 055-280-1589

E-mail : dskang@keri.re.kr



선 중 호 (宣 鍾 好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~현재 한국전기연구소 신전력기기그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1578, Fax : 055-280-1589

E-mail : jhsun@keri.re.kr



이 흥 식 (李 弘 植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 전기물리연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1491, Fax : 055-280-1406

E-mail : hslee@keri.re.kr



박 정 후 (朴 正 后)

1945년 4월 8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업(공박). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수

Tel : 051-510-2369, Fax : 051-513-0212

E-mail : Parkch@hyowon.cc.pusan.ac.kr



조 정 수 (趙 井 守)

1935년 2월 21일생. 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 부산대 공대 전기공학과 대학원 졸업(공박). 1983년~1984년 미국 Oregon Univ. 교환교수. 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수

Tel : 051-510-2365, Fax : 051-513-0212

E-mail : chojs@hyowon.cc.pusan.ac.kr