

## 기계적 스트레스가 XLPE에서의 전기트리 개시특성에 미치는 영향

신 두 성, 최 수 곁, 전 승 익  
LG전선(주) 전력연구소

### The Effects of Mechanical Stress on the Initiation Characteristics of Electrical Tree in XLPE

Doo-Sung Shin, Soo-Gul Choi and Seung-Ik Jeon  
Electric Power Research & Technology Center, LG cable Ltd.

**Abstract** - 절연체의 수명과 직접적인 관련이 있는 전기트리의 개시특성을 연구하는데 있어서, 전기트리의 개시시간이 매우 길기 때문에 실험적으로 절연재료의 수명을 구하는데 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 Weibull 해석을 이용하여, 일반적으로 사용되는 가속시험법에 의하여 얻어진 전기트리 개시전계를 사용하여 일정전압 인가시에 전기트리 개시시간을 추정하는 방법을 이론적으로 고찰하여, 실험에 적용하였다.

또한 기계적 스트레스에 의한 전기트리 개시특성을 평가하기 위하여 기계적 스트레스를 모의한 XLPE 시료에 대하여 이러한 기계적 스트레스가 전기트리 개시전계 및 개시시간 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 기계적 스트레스가 전기트리 개시전계 뿐만 아니라 개시시간을 현저하게 감소시켰으며, XLPE의 장기적인 신뢰성을 보증하기 위해서는 이러한 기계적 스트레스를 완화시키는 것이 매우 중요하다.

## 1. 서 론

XLPE와 같은 압출 케이블용 고분자 절연재료의 열화 요인에는 전기적, 기계적, 화학적 및 이들의 복합적 요인 등이 있다. 특히 전기트리는 즉각적인 절연파괴를 야기하지는 않더라도 장기적으로는 열화 프로세스의 결과로 나타나는 전기적 파괴의 주요한 파괴 메커니즘으로 알려져 있다 [1].

이러한 전기트리 현상은 복잡한 열화 프로세스의 결과이며, 전기트리는 국부적인 전계의 집중에 의하여 전하가 공급되어 고분자 내부에 공간전하를 형성시킬 수 있는 지역에서 발생을 한다. 또한 주입된 공간전하는 주파수, 온도, 기계적 스트레스 및 전극의 재질과 형상에 의하여 영향을 받으며, Maxwell 응력, hot electron, electroluminescence 및 전기화학트리와 같은 2차 트리를 생성시키기도 한다 [1].

전기트리의 프로세스는 개시와 진전의 2가지 프로세스로 구분할 수 있으며, 이러한 개시 및 진전의 특성은 매우 상이하기때문에 절연체의 수명, 즉 장기적인 신뢰성을 평가하기 위해서는 전기트리의 개시 및 진전특성을 분리하여 연구하는 것이 보다 바람직한 방법으로 생각된다.

본 논문에서는 Weibull 해석을 이용하여, 일반적으로 사용되는 가속시험법에 의하여 얻어진 전기트리 개시전계를 사용하여 일정전압 인가시에 전기트리 개시시간을 추정하는 방법을 이론적으로 고찰하였으며, 실제 전기트리 개시시간 측정 실험에 이를 적용하였다.

기계적 스트레스에 의한 전기트리 개시 특성을 평가하기 위하여 침전극의 삽입 깊이를 조절하여 기계적 스트레스를 모의한 시료에 대하여 기계적 스트레스가 전기트리의 개시전계 및 개시시간 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 이론적 고찰

일반적으로 저전압 또는 저전계에서는 전기트리 개시에 걸리는 시간은 매우 오래 걸리기 때문에 Step 전압인가 방법 또는 Ramp 전압인가 방법 등과 같이 전압을 높여서 시험하는 방법이 가속 시험으로 널리 이용된다 [2].

이러한 전압인가 방법으로 얻은 전압 또는 전계의 Weibull 분포로부터 시간의 Weibull 분포를 구하는 것은 아래의 가정이 성립하는 경우에만 가능하다.

- 전기 트리가 발생하는데 필요한 시간은 열화에 유효한 전압 또는 전계와 관련이 있다.
- 전기 트리 개시의 물리적인 메커니즘은 시험 전압 또는 전계 범위내에서는 바뀌지 않는다.

전계  $E_i$  가  $\Delta t_i$  시간 동안 절연체에 인가되는 경우, 이러한 절연체의 열화시간과 전계사이의 관계는 일반적으로 식 (1)의 역n승의 법칙을 따른다 [2].

$$t \times E^n = const. \text{-----} \text{식 (1)}$$

여기서 t, E 및 n 은 각각 시간, 전계 및 수명지수이다  
따라서 일정한 전계  $E_j$  가  $\Delta \tau$  시간동안 가해진 경우 전체 열화량이 동일하다면,  $\Delta \tau$  는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \tau = \Delta t \left( \frac{E_i}{E_j} \right)^n \text{-----} \text{식 (2)}$$

step 전압 인가방식에서 n번째 단계의 전압에서 전기트리가 개시하였을 때, 일정한 전압  $E_j$  를 인가하였을 경우에 전기트리의 개시시간  $\tau_j$  는 식 (2)로부터 식 (3-1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_j &= \sum_{i=0}^j \Delta \tau_i = \sum_{i=0}^j \Delta t \left( \frac{E_0 + i \cdot \Delta E_i}{E_j} \right)^n \\ &= E_j^{-n} \sum_{i=0}^j \Delta t (E_0 + i \cdot \Delta E_i)^n \text{----} \text{식 (3-1)} \end{aligned}$$

한편, Ramp 전압인가 방식에 대해서는 전압 상승 속도  $a = \frac{dE}{dt}$  [kV/s]라고하면, 식 (3-1)을 다음과 같이 변환

할 수 있다.

$$\tau_j(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta \tau_i = \int_{t=0}^t \left( \frac{E_0 + a \cdot t}{E_j} \right)^n dt$$

$$= E_j^{-n} \int_{t=0}^t (E_0 + a \cdot t)^n dt \text{--- 식 (3-2)}$$

일반적으로 ramp 전압인가 방식에서 초기값  $E_0=0$  이기 때문에 식 (3-2)는 식 (3-3)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\tau_j(t) = E_j^{-n} a^n \frac{1}{n+1} t^{n+1} \text{--- 식 (3-3)}$$

여기서  $E(t) = a \cdot t$  이므로  $t$ 를 치환하면

$$\tau_j(t) = E_j^{-n} a^n \frac{1}{n+1} \left( \frac{E}{a} \right)^{n+1}$$

$$= \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{n+1} E_j^{-n} E^{n+1} \text{--- 식 (3-4)}$$

## 2.2 실험 및 고찰

기계적 스트레스가 트리 개시 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 침 대 침 전극을 사용한 2종류의 시료를 실험하였다.

침전극의 선단부 곡률반경은 각각  $5\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$ 이며, 침전극간의 거리는  $2\text{mm}$ 로 하였다.

한 종류의 시편은 곡률반경  $5\mu\text{m}$ 의 침전극을 약  $200\mu\text{m}$  깊이로 얇게 삽입하여 기계적 스트레스가 가해지지 않도록 준비한 시편이며, 다른 한 종류는 침전극을 약  $18\text{mm}$  삽입하여 기계적 스트레스가 가해진 시편이다.

시료 준비 과정에서 과도한 기계적 스트레스가 가해지는 경우 침선단부 근처의 XLPB에서 크랙이 발생할 수 있으며 또한 미세 보이드가 발생할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 침 선단부에서 크랙 및 미세 보이드가 발생하였는지 여부를 실험전에 현미경을 이용하여 모든 시료에 대하여 확인하였으며, 기계적 스트레스는 편광현미경을 이용하여 정성적으로 측정하였다.

그림1은 2가지 시편에서의 기계적 스트레스를 비교한 것이다. 침선단부에 미세 보이드 및 크랙은 없으나, 기계적 스트레스는 침전극의 삽입 깊이에 의해 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

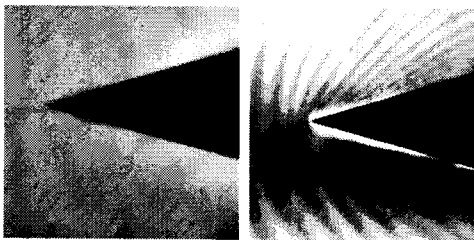


그림 1. 시료내 기계적 스트레스 비교

좌측 :  $200(\mu\text{m})$  삽입, 우측 :  $18(\text{mm})$  삽입

### 전기트리 개시전계에 미치는 영향

진술한 두 종류의 시편에 대하여 각각 ramp 전압인가 방식과, Step형 전압인가 방식에 대하여 전기트리

개시전계의 Weibull 분포함수를 얻었으며, 그 결과를 아래 그림 2와 3에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 Ramp 전압 인가 및 Step 전압인가 모두 기계적 스트레스에 의하여 트리개시 전계가 상당히 낮아졌음을 알 수 있다. 특히 Ramp 전압 인가시 트리 개시 전계의 감소폭이 큼을 알 수 있다. Ramp 전압 인가와 같이 짧은 시간에 전압이 상승하는 경우에는 다른 팩터가 전기트리의 개시에 영향을 미치는 시간이 짧기 때문에 기계적 스트레스의 영향이 현저하게 나타나는 것이라고 생각된다.

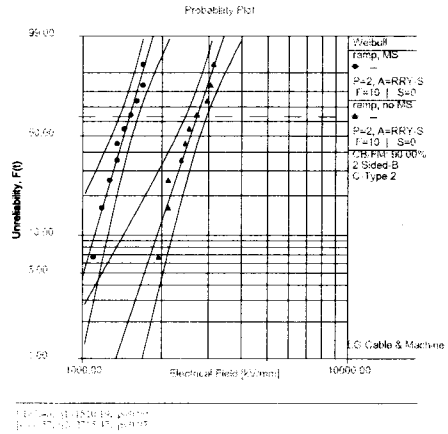


그림 2. Ramp 전압인가시 트리개시전계의 Weibull 분포

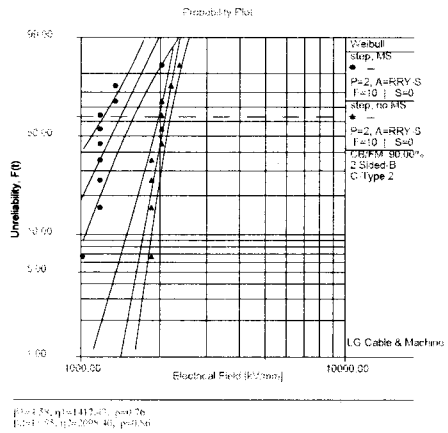


그림 3. Step 전압인가시 전기트리 개시전계의 Weibull 분포

MS(기계적 스트레스 있음), no MS (기계적 스트레스 없음)

### 전기트리 개시시간에 미치는 영향

그림 4는 침전극을 깊이 삽입하여 기계적 스트레스를 가한 시료의 전기트리 개시시간 측정결과의 Weibull 분포이다. 전압은  $10(\text{kVrms})$ 와  $14(\text{kVrms})$ 를 가하였으며 이때의 침선단부 최대전계는 각각  $850(\text{kV/mm})$ 와  $1,120(\text{kV/mm})$ 에 해당한다.

그림 5는 침전극을 약  $200\mu\text{m}$ 로 얇게 삽입하여 기

계적 스트레스의 영향을 없앤 시료에서 전기트리 개시시간의 Weibull 분포이다. 전압은 20[kVrms]와 26[kVrms]를 각각 인가하였으며, 이때 칩선단부의 최대 전계는 각각 1.690[kV/mm] 및 2.200[kV/mm]에 해당한다. 그림 4, 5에서 알 수 있는 바와 같이 칩선단부의 전계가 증가할수록 트리 개시 시간이 모두 짧아짐을 알 수 있다.

그러나 기계적 스트레스가 가해지지 않은 경우에 전기트리가 개시하는 전계는 XLPE의 파괴전계에 도달할 만큼 높은 전계이며, 기계적 스트레스가 가해진 경우에 비해 현저히 높기때문에, 동일한 전계에서 전기트리가 개시하는데 걸리는 시간을 비교하는 것은 실험상의 어려움이 있다[2].

따라서 기계적 스트레스가 가해진 경우와 기계적 스트레스가 가해지지 않은 경우에서의 전기트리 개시시간을 상대적으로 비교하기 위하여 일정 전계가 가해진 경우를 가정하여 전기트리 개시시간을 계산하였다.

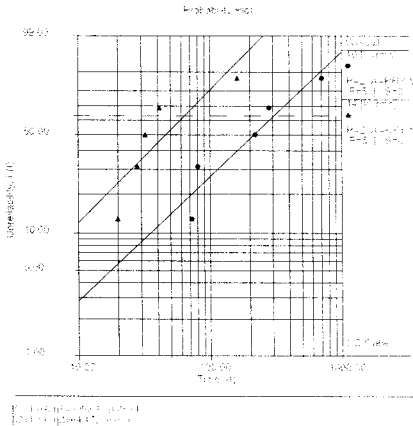


그림 4. 기계적 스트레스를 가한 시료의 전기트리 개시시간의 Weibull 분포

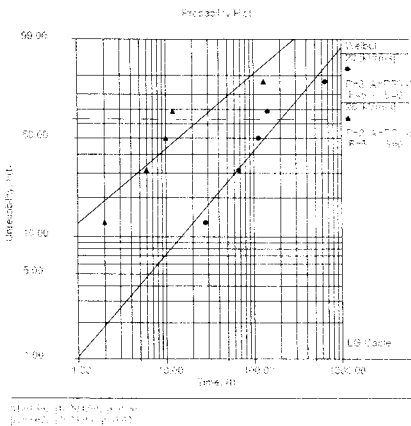


그림 5. 기계적 스트레스가 가해지지 않은 시료의 전기트리 개시시간의 Weibull 분포

계산할 때에 고려한 사항은 우선 실제적으로 유효한 전계값을 설정하는 것과 수명지수를 선택하는 것이다.

전계값을 고려할 때, 공칭전압  $U_m=400$  [kV]의 XLPE 케이블의 경우에 절연두께 23~29 [mm]를 가정하면 전계는 10[kV/mm]를 초과하지 않으며, 절연체에 5[ $\mu$ m]의 돌기가 있다고 가정하더라도, 이때의 최대 전계는 약 840[kV/mm]를 넘지 않는다.

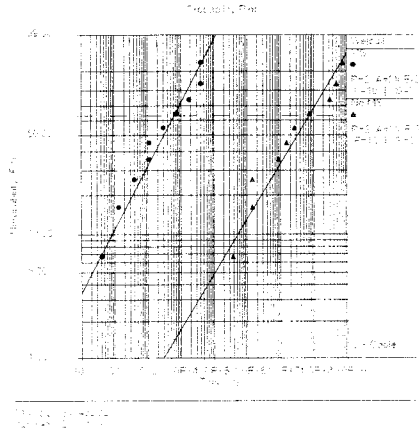


그림 6. 일정전계 인가시 전기트리 개시시간의 Weibull 분포의 계산결과 : 840[kV/mm]

MS (기계적 스트레스 있음), no MS(기계적 스트레스 없음)

또한 최근에 XLPE 케이블의 수명지수로 고려되고 있는  $n=15$ 로 가정하여, Ramp 전압인가 시 얻은 전기트리 개시전계의 데이터를 사용하여, 일정전계 840[kV/mm]가 가해진 조건에서 기계적 스트레스가 가해진 경우와 기계적 스트레스가 가해지지 않은 경우의 전기트리 개시시간 Weibull 분포를 구하였으며 각각 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 전기트리 개시확률이 63.2%를 기준으로 하였을 때, 기계적 스트레스가 가해진 시편의 경우에는 약 1시간 50분내에 전기트리가 개시하는데 비하여 기계적 스트레스가 가해지지 않은 경우에는 전기트리 개시에 걸리는 시간은 약 2년 6개월에 달하기 때문에, 전술한 바와 같이 실험적으로 비교하는데에는 현실적인 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 바와 같이 전기트리 개시전계 데이터로 전기트리 개시시간을 계산하면 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

한편, 계산에 고려한 조건은 상당히 가혹한 것으로서 실제로 케이블에서의 운전전계와 케이블 결합 등을 고려하면 수명지수  $n=15$ 의 경우에도 기계적 스트레스를 적절하게 완화시키는 경우 케이블의 수명 30년을 보증할 수 있다고 생각한다. 그러나 기계적 스트레스가 심각하게 가해진 경우에는 전기트리 개시시간은  $10^3 \sim 10^4$ 배까지 현저하게 저하한다는 사실을 확인할 수 있었다. 다만 이러한 기계적 스트레스의 크기가 실제 케이블의 제조공정에 의해서 발생하는 기계적 스트레스 크기와 어떠한 관계가 있는가에 대한 연구, 즉 기계적 스트레스의

정량적인 평가가 선행되어야 한다고 생각된다. 이러한 정량화를 통하여 실제 케이블에서 기계적 스트레스가 절연체의 장기적인 성능에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 기계적 스트레스의 영향을 정성적으로 분석하였으나, 향후 기계적 스트레스가 절연수명에 미치는 영향을 보다 깊이 연구하기 위해서는 기계적 스트레스를 정량화 하는 작업이 우선되어야 한다고 생각하며, 정량화된 기계적 스트레스가 전기트리의 개시 및 진전특성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하리라고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Step 전압인가 및 Ramp 전압인가 방법에서 얻은 전기트리 개시전계의 Weibull 분포를 바탕으로 전기트리 개시시간의 Weibull 분포를 얻는 방법을 이론적으로 고찰하였으며, 이러한 평가기법을 바탕으로, 기계적 스트레스가 XLPE의 전기트리 개시에 미치는 영향을 평가하였다. 실험결과로부터, 기계적 스트레스가 전기트리 개시전계를 현저히 감소시켰을 뿐만 아니라 케이블 절연체의 수명과 직접적인 관련이 있는 전기트리 개시시간을  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 배까지 현저하게 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

따라서 케이블의 압출공정이나 가교공정과 같은 제조공정시 XLPE의 장기적인 절연성능의 신뢰성을 보장하기 위해서는 이러한 기계적 스트레스를 적절하게 완화시키는 것이 중요하다고 생각되며, 향후 이러한 기계적 스트레스를 정량화하여, 기계적 스트레스가 케이블의 수명, 즉 장기적인 신뢰성과의 상관관계에 대한 규명이 필요하리라고 생각된다.

#### {참 고 문 헌}

[1] L.A. Dissado and J.C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1992.

[2] 電氣學會技術報告(日), 第 514号, 1994