

**송전 XLPE 케이블 절연층을 이용한 전기트리 형성과 부분방전 양상의 상관관계**

이전선\*, 김정태\*\*, 구자윤\*  
 \*한양대학교(EM&C), \*\*대진대학교

**A study on the correlation between the PD pattern and the formation of electrical trees by use of XLPE insulation for the underground power transmission cable**

J.S. Lee\*, J.T. Kim\*\*, J.Y. Koo\*  
 \*HanYang Univ. EM&C, \*\*DaeJin Univ.

**Abstract**

In this work, PD patterns and electrical trees are observed by use of the XLPE cable insulation, and the tree initiation voltage related to the contamination are also measured in order to calculate the electric stress necessary for the design of cable insulation. Throughout these works, correlation between the PD pattern and the shape of electrical tree has been observed that there may exist three distinct pattern of PD dependence on the stage of tree propagation. Such correlation could bring a basic information in connection with the partial discharge of cable system. It was also found that the electrical stress necessary for the initiation of electrical tree was measured to the 290kV/mm for the 154kV XLPE cables manufactured in KOREA.

**1. 서 론**

절연층 내에 존재하는 이물이나 돌기에서 발생하는 전기트리는 지중 송전 XLPE 케이블 시스템의 주된 절연 열화요인 중의 하나이므로[1], 송전케이블 제조시 결합에서 전기트리가 발생되지 않도록 결합의 크기를 결정해야 한다.

본 연구는, 국내 송전 케이블의 절연층 내에 결합 존재시 전기트리 형성전계 및 부분방전 패턴을 파악하여 케이블 진단기법의 기초자료를 제공하고자 한다. 국내 제작된 154 kV 송전 XLPE 케이블 절연층을 이용한 시편에 침 결함을 삽입하여 전기트리 발생 시켜 전기트리의 진전과정을 광학 관측 시스템을 이용하여 전압을 인가한 상태에서 실시간으로 관측하고, 아울러, 전기트리 성장에 따른 부분방전 양상 변화를 부분방전 검출 시험기를 이용하여 측정하였다.

**2. 실험방법**

**(1) XLPE 시편 제작**

154 kV XLPE 송전케이블 절연체를 3mm 두께의 도우넛형 시편으로 가공한 후, 자체 개발한 침 삽입장치를 이용하여 침을 절연층에 삽입하였으며, 침 끝의 곡률 반경을 다양하게 선택하였다.

침 삽입시 XLPE 시편이 겪는 기계적 스트레스를 최소화시키기 위해서, 본 연구에서 특별 제작한 침 삽입 장치를 이용하였다. 그림 1은 제작된 시편의 사진이다.

송전 케이블 절연층의 주요 결함을 모델링 하기 위하여, 급속성 이물의 경우, 이물 자체에서 전기트리가 개시되기보다는 이물의 어느 한 부분 즉, 가장 전계가 집중되는 부분에서 전기트리가 개시되기 때문에 절연층 내로의 침 삽입은 급속성 이물을 모델링하였다고도 할 수 있다. 또한, 돌기의 경우에는 반도전층으로부터 출몰된

것이므로, 도전율의 차이는 있지만 절연체와 비교해서 반도전체나 도체는 큰 차이가 없다고 여겨지기 때문에, 침 삽입은 역시 돌기도 모델링 한 것이라고 해석할 수 있다.

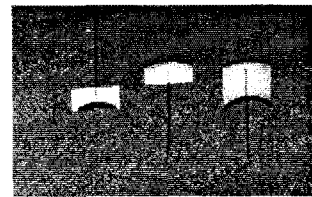


그림 1. 침이 삽입된 XLPE 시편

**(2) 시험장치 및 방법**

침 끝 이외에서 발생하는 코로나 방전을 방지하여, 시편의 침 끝에서 발생하는 1pC 이하의 미소한 부분방전 측정이 가능하도록 하였다. 또한 반도전층과 전극이 접촉하는 시편 고정 부위에 실버 에폭시 처리하여 전기트리가 형성되기 전에는 약 0.3 pC 정도의 측정 감도를 얻을 수 있었다. 시간에 따른 부분방전 특성은 Haefely사의 부분방전 검출기[2]를 이용하였고, 전기트리의 형성과 진전과정은 전압을 인가한 상태에서 실시간으로 관측되었으며, 광학장치와 CCTV를 이용하여 전과정을 녹화하였다.

**3. 실험 결과**

**3.1 XLPE 케이블의 부분방전 패턴**

XLPE 케이블의 전기트리 및 부분방전 방전량의 변화는 다음 그림 2와 같이 시간적으로 세단계로 구분이 가능하다.

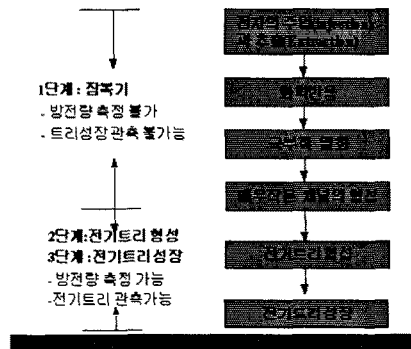


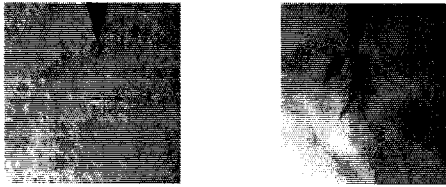
그림 2. 전기트리 및 부분방전 변화의 시간적 패턴

**(1) 1단계 : 잠복기**

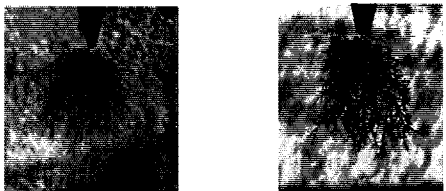
전압을 인가하기 시작하여 전기트리화 형성되기 이전 단계로서 0.5pC 이하의 아주 미소한 부분방전이 측정되기는 하지만 PD발생 위상은 불규칙하며 전압이 상승되어도 부분방전량의 증가나 발생위상의 규칙성은 나타나지 않는다.

**(2) 2단계 : 전기트리의 형성단계**

그림 3(a,b)는 곡률반경 5 $\mu$ m와 10 $\mu$ m의 칩 끝에서 전기트리 개시 후 15 초후, 그림3(c,d)는 2~3 초 후의 곡률반경 20 $\mu$ m 및 40 $\mu$ m인 칩 끝에서 발생한 전기트리 형상으로서, 각각 전기트리 형성 직후의 양상이다. 이같이 전기트리는 잠복기 이후 순간적으로 발생하고, 곡률반경이 작아 칩 끝에 형성되는 전계는 높더라도 인가전압이 낮은 경우에 개시되는 전기트리는 가지형태를 취하며 성장속도도 낮다. 곡률반경이 커져 상대적으로 칩 끝에 형성되는 전계가 낮으나 인가전압이 높은 경우에 개시되는 전기트리는 덩불 형태로서 순식간에 발생한다. 그림3과 같은 전기트리 형성 단계의 부분방전량은 5 $\mu$ m와10 $\mu$ m의 경우 수백 pC까지 급격히 발생되고, 20 $\mu$ m와 40 $\mu$ m의 경우는 수 nC까지 상승한다.



(a) 칩의 곡률반경 5 $\mu$ m 인가전압 : 7kV (b) 칩의 곡률반경: 10 $\mu$ m 인가전압: 10kV



(a) 칩의 곡률반경 20 $\mu$ m 인가전압 : 13kV (b) 칩의 곡률반경: 40 $\mu$ m 인가전압: 24kV

그림 3. 칩의 곡률반경에 따른 전기트리 형성시 양상

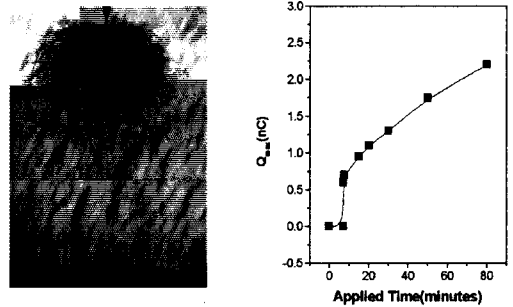
**(3) 3단계 : 전기트리의 성장**

트리가 일단 형성되면 초기에는 급속한 성장을 하지만 가지가 무성해지면서 성장속도는 감소하고 전기트리의 형태에 따라서 다양한 부분방전 패턴을 가진다. 전기트리의 형태에 따라 그림 4와 같은 덩불형(bush-like), 그림 5와 같은 가지형(tree-like)과, 그림 6과 같이 (가지+덩불)의 복합형으로 발생하는 형태의 3 가지로 구분할 수 있고, 이에 따라 각각 부분방전 패턴은 다르게 나타난다.

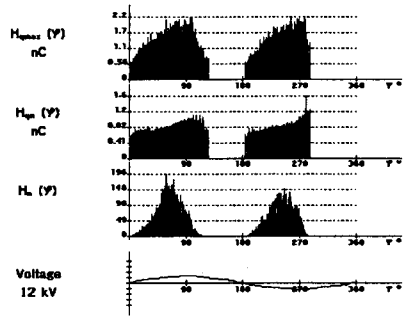
**덩불형**

덩불형 전기트리는 3 mm의 전극간 거리에 비교적 높은 전압(예, 10 $\mu$ m 칩의 경우 12 kV 이상)이 인가된 경우에 나타나며, 현미경을 통한 관찰에서 전기 트리 내부에서 상당히 큰 방전 현상이 칩 끝에서 발생하는 것이 관측되고 이 때의 방전량은 전기트리 형성후 10 초 정

도의 시간 동안에 1 ~ 3 nC까지 급격히 증가한다. 그림 4.(a)는 전기트리가 성장하여 60 분이 경과한 후의 덩불형 전기트리 사진이고, 그림 4.(b)는 인가 시간에 따른 최대 방전량의 변화이다. 그림 4.(c)는 전기트리 형성후 70분이 지난 후 5분동안 측정된 최대방전량, 평균방전량과 방전수로서 인가전압의 1/4와 3/4주기에 집중되는 것을 알 수 있다.



(a)전기트리 형상 (b) 시간에 따른 최대 방전량 변화

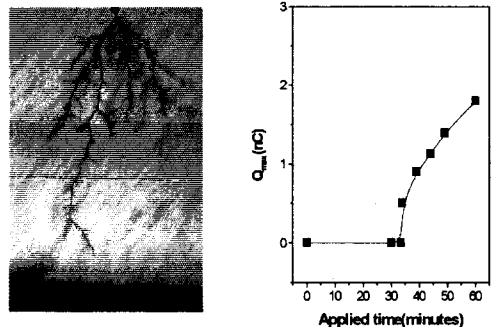


(c)  $\Phi$ -q-n 방전패턴

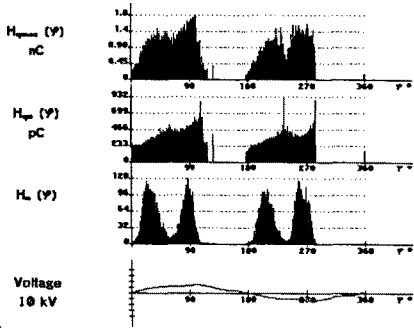
그림 4. 덩불형 전기트리의 형상 및 방전패턴

**가지형**

가지형 전기트리는 덩불형 전기트리 형성전압보다 대체적으로 낮은 전압에서 발생하고 방전량은 작게 나타나지만 전기트리는 빠르게 성장한다. 그림5(a)는 10 $\mu$ m 곡률반경의 칩에 3mm의 절연두께에서 9.9kV의 전압을 인가한 경우에 발생한 가지형 전기트리의 형상이고 그림 5(b)는 전압 인가 시간에 따른 최대방전량이다. 그림 5.(c)의  $\Phi$ -q-n 방전분포에서 인가전압의 정/부 피크 부근에서 방전량이 큰 펄스들이 발생하며 방전수의 분포도 덩불형과는 다른 패턴임을 알 수 있다.



(a)전기트리 형상 (b) 시간에 따른 최대 방전량 변화

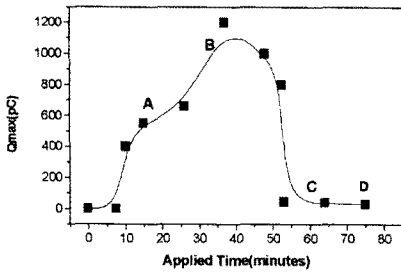


(c)  $\phi$ -q-n 방전패턴

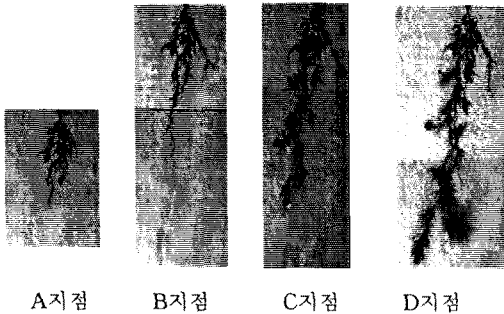
그림 5. 가지형 전기트리의 형상 및 방전패턴

(가지+덤불) 복합형

그림 6은 침의 곡률반경  $5\mu\text{m}$ 인 시편에 7 kV의 전압을 인가할 때 발생된 전기트리 사진과 시간에 따른 최대 방전량의 변화이다. 전압을 인가한 후 9 분경 전기트리가 개시되어 가지형 전기트리가 나타나고, A 부분에서는 방전량의 증가가 둔화되면서 솜털형의 잔가지가 추가로 발생되며, B 부분에서 접지 전극 쪽으로 1 개의 가지가 빠르게 성장되면서 다시 방전량의 증가가 더 커지고 있다. B-C 사이 구간에서는 다시 잔가지들이 많이 생기면서 방전량의 감소가 나타나며, C-D 부분에서는 다시 솜털 모양의 덩불형 트리가 발생되면서 방전량은 작아지고 일정하게 되어 최대 방전량이 30 pC 정도인 것으로 나타났다.



(a) 시간에 따른 최대 방전량 변화



(b) 시간에 따른 전기트리 양상

그림 6. (가지+덤불) 복합형 트리의 형상 및 방전패턴

3.2 침의 곡률 반경에 따른 전기트리 형성전계

침의 곡률반경에 따른 전기트리 형성 전계 산출을 위

해서 침의 곡률반경을  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$ 로 변환 시켰으며, 전기트리의 형성 여부를 판단하기위해서 부분방전 검출기와 CCTV를 이용한 광학적 방법을 사용하였다. 전압인가방법은 30분 간격으로  $20\text{kV/mm}$ 의 폭으로 상승시키는 스텝 시험을 수행하였다. 이 때, 각 곡률반경 별 시편의 수는 최소 10 개 이상으로 하여 시험의 편차를 줄였다.

곡률 반경에 따른 전기트리 형성 전계는 그림 7과 같이 산출되었으며, 곡률 반경이 커짐에 따라 전기트리 개시전계는 저하하는 것을 알 수 있다. 대체적으로 본 연구에서 사용된 국내 154 kV XLPE 케이블 절연층의 전기트리 개시전계는 케이블 설계 기준인  $290\text{ kV/mm}$  이상인 것을 알 수 있다.

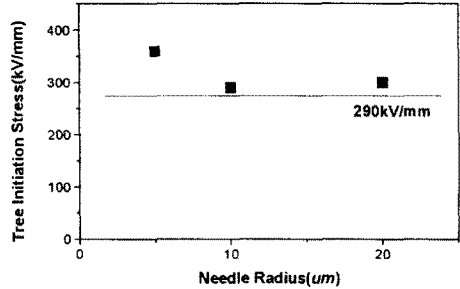


그림 7. 곡률반경에 따른 전기트리 형성전계

3. 결 론

국내 제작된 154 kV XLPE 송전케이블의 절연층 시편을 이용하여 측정된 전기트리 개시 및 진전과 부분방전 패턴은 다음과 같다.

- 전기트리 형성 및 성장은 1단계 잠복기, 2단계 전기트리 형성, 3단계 전기트리 성장으로 분류할 수 있다.
- 잠복기 이후 전기트리의 개시는 아주 급격히 순식간에 발생하며, 곡률반경이 크고 인가전압이 높을수록 폭발적인 덩불형태로 발생한다.
- 전기트리의 성장 패턴은, 덩불형, 가지형, (가지+덤불) 복합형으로 분류할 수 있고 덩불형의 트리의 방전량이 가장 크게 나타나고 성장속도는 가지형이 제일 빠르다.
- 전기트리의 성장속도와 방전량의 크기는 가지형과 덩불형에서 볼수 있듯이 전기트리의 양상에 좌우된다.
- 국내 154 kV 송전 케이블 절연층의 전기트리 개시전계는 설계 기준인  $290\text{ kV/mm}$  이상인 것으로 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] TANAKA Takesi, WATANABE Masaru, "Detecting the breakdown causes of XLPE cable by PPD method", JICABLE 91, B.1.1., 1991
- [2] Partial Discharge Detector TE571 operating manual, Haefely
- [3] Grace Jiang, Jinbo Kuang, Steven Boggs, "Critical Parameters for Electrical Tree Formation in XLPE", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp 292~296, April 1998
- [4] Hideo Tanaka, Naotaka Ichianagi, Zensuke Iwata, "A STUDY ON BREAKDOWN PHENOMENA IN XLPE POWER CABLE", 1991 CEIDP, p.255, 1991