

### XLPE에서 발생하는 전기트리 패턴의 프랙탈 분석

\*김덕근, \*\*임장섭, †이 진, ‡전기오, \*김태성  
\*전남대학교 전기공학과, \*\*목포해양대학교 해양전자·통신공학부,  
†목포대학교 전기공학과, ‡목포기능대학 생산자동화과

### Fractal Analysis of Electrical Tree Patterns Occurred in XLPE

\*Kim Duck-keun, \*\*Lim Jang-seob, †Lee Jin, ‡Chun Ki-o, \*Kim Tae-sung  
\*Chonnam National Univ. \*\*Mokpo National Maritime Univ. †Mokpo National Univ. ‡Mokpo Polytechnic College

**Abstract**-When the high voltage is applied on insulation materials that have voids and impurities inner one, then probability of electrical tree inception is increased at defects.

Electrical tree gives a profit to degradation analysis, because it is possible to observe by eyes and provides electrical degradation step. And electrical tree is divided to three types in usual - tree type, bush type and chestnut type tree. But these three types are divided not by method of quantitative analysis but visual and experiential analysis.

In this paper, three types of electrical tree were calculated by quantitative analysis using fractal mathematics and classified to fractal dimensions(FD).

FD of tree types are 1.1~1.4, bush types are 1.4~1.6 and chestnut type trees have above 1.6 FD.

#### 1. 서 론

지중 전력 케이블의 절연체로 사용하는 가교폴리에틸렌(XLPE)은 낮은 유전율, 저손실, 높은 절연파괴강도를 가지고 있다. 그러나 우수한 전기적 특성에도 불구하고, 장기간 사용함에 따라 열화현상(aging phenomena)이 발생한다.

절연체 내부에 불순물이나 보이드가 존재하면 부분방전 및 전기트리 열화현상이 발생할 확률이 높아진다. 이런 부분방전 및 전기트리 열화현상은 지속적인 상호작용을 통해 절연 내력을 저하시켜 최종적인 절연 파괴에 이르게 한다. 따라서 전력 케이블 절연층 같은 고체 절연 물질의 전기적인 특성을 파악하기 위해 전기트리 현상에 대한 연구는 본질적인 수단이며 그 중요성은 날로 높아져 가고 있다.

절연파괴는 단순히 전기적인 스트레스에 의해 발생된 다기보다는 여러 가지 스트레스가 복합적으로 작용한 결과라고 볼 수 있다. 절연 성능을 저하시키는 요인으로는 전기적, 화학적, 기계적, 열적 스트레스 등이 있으며, 이러한 스트레스들이 복합적이고 지속적으로 작용하여 절연파괴에 이르게 된다.

전기트리 열화는 절연체의 열화단계들 시작적으로 관측할 수 있기 때문에 절연체의 열화과정을 해석하는데

장점을 가지고 있다. 그러나 절연체 내부에서 발생하는 전기트리 열화 현상은 복잡한 패턴을 가지고 있기 때문에 정량적인 해석이 어려운 단점을 가지고 있다.

이러한 복잡한 트리 패턴을 정량적으로 분석하기 위해 복잡성과 난해성이 존재하는 모양에서 공통적인 성분을 추출해 복잡한 형태를 해석할 수 있는 프랙탈 수학을 이용해 전기트리 열화 패턴을 정량적으로 분석하였다.

#### II. 프랙탈 수학과 자기상사성

복잡한 형태를 정량적으로 표현할 수 있는 방법은 공통적인 형태를 찾아내서 이 형태에 대한 성질을 구체적으로 세밀하게 조사하는 것이다.

자연계의 모든 형상들은 정수치의 차원을 갖지 않는다. 따라서 수많은 차원의 정의가 고안되었는데 그 중 이해하기 쉽고 프랙탈과 밀접하게 관련되어 있는 것이 상사성 차원이다.

그림 2-1은 자기상사성을 갖는 Koch곡선이다. 프랙탈 도형으로 널리 알려진 Koch곡선의 일부분을 확대해서 보면 전체 또는 더 큰 부분과 같은 모양이 된다. 이것이 바로 자기상사성이다.

유한 길이의 직선을 기본으로 하여, 그것의 3등분한 중앙에 정삼각형을 그리고 하부의 선을 제거한 분할에 의해서 생기는 선의 총 길이는 최초 길이의 (4/3)배 이다. 다시 각 선들을 3등분하고 같은 분할을 반복하면 최초의 (4/3)<sup>2</sup>가 되는 것이다. 이러한 작업을 무한히 반복하면 유한공간 내에서 선의 길이가 무한대로 성장하는 특성을 갖는 코호곡선이 얻어진다. 상기와 같은 특성에는 같은 모양의 패턴이 반복적으로 생성되고 반복적인 작업 후에도 작업전의 패턴이 남아있는 것을 쉽게 발견된다. 이와 같은 특성을 자기상사성이라고 부르고 있다. 자기상사성을 갖는 임의의 패턴은 가정한다. 모형의 크기를 1/a로 축소한 후 자기상사성을 측정할 경우 패턴의 상사성은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$N(a) = a^D \quad (2-1)$$

이것을 코호곡선에 적용하면, 구간의 3등분을 4회 반복한 경우와 9등분을 16회 반복한 경우다음과 같은 수식이 성립한다.

$$4 = 3^D \quad (16 = 9^D) \quad (2-2)$$

이때의 차수(프랙탈 차원)  $D$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.26 \quad (2-3)$$

프랙탈 차원을 구하는 방법으로는 스케일 변환법, 회전반경법, 상관함수법 및 커버법등이 있다.

프랙탈은 자기상사성을 갖고 있지만, 이 방법은 임의의 스케일 이하의 미소한 변화를 무시하는 것에서 차원을 구하는 방법이다.

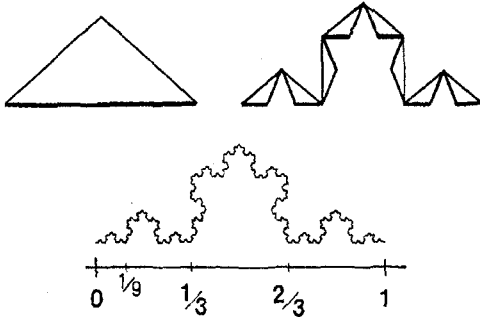


Fig. 1. The koch curve.

1차원의 경우, 어떤 스케일에서 측정된  $L_1$ 이라는 것을 스케일의 단위를  $a$ 배하여 측정하면 선분의 길이는 다음과 같다.

$$L_a = \frac{L_1}{a} \quad (2-4)$$

같은 모양의 문제에 대하여 2차원, 3차원으로 생각해 보면 즉 임의의 단위에서 정방형의 면적 및 체적이  $S_a$ 와  $V_a$ 로 평가되는 것은 스케일을  $a$ 배한 관계이며 다음과 같은 두 식으로 적용할 수 있다.

$$S_a = \frac{S}{a^2} \quad V_a = \frac{V}{a^3} \quad (2-5)$$

상기 수식을 1에서  $a$ 배까지 적용 가능한 일반화된 수식으로 작성하게 되면  $D$ 차원 공간 내에 있는 물체에 적용할 수 있는 다음의 수식이 가능하다.

커버법은  $D$ 차원의 공간 내에 있는 패턴을 주변거리  $r$ 과  $D$ 차원의 입방체로 덮어서 측정하는 방법이다. 그 때 필요한 초입방체의 최소수  $N(r)$ 은 다음의 수식과 같이 된다.

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (2-6)$$

이러한 수식에서의  $D$ 가 프랙탈 차원이다. 상기의 수식에서 프랙탈 차원은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = -\frac{\log(N(r))}{\log(r)} \quad (2-7)$$

### III. 실험방법

#### 2.1 시료제작 및 화상계측

전기트리 열화현상을 화상계측하기 위하여 본 논문에서는 침-평판 전극을 사용한 시험법을 실시하였다. 크기는  $2(\text{cm}) \times 2(\text{cm})$ 이며 두께는  $1(\text{mm})$ 의 XLPE 시료를 제작하였다. 시료의 두께가 얇기 때문에 침전극( $\phi:170(\mu\text{m})$ )을 전기화학을 응용해 새롭게 제작하였다. 침전극과 평판전극과의 거리는  $2(\text{mm})$ 로 하였으며, 평판전극은 은페인트로 처리하였다. 전압은  $6 \sim 14(\text{kV})$ 까지 인가하였다.

시료에 고전계를 인가해 발생하는 전기트리를 광학현미경(Olympus SZA10, Japan)과 CCD 카메라(Olympus CS330, Japan)를 통해 시각적으로 관측하면서 트리 화상을 VTR에 녹화하고, 화상처리 보드(Coreco BANDIT, Canada)를 이용해 컴퓨터로 입력받는다.

입력된 화상은 본 연구에서 새롭게 개발한 프랙탈 알고리즘을 이용해 이진화 처리한 후, 침전극과 평판전극, 노이즈를 제거하여 트리만의 화상을 데이터로 저장하고 트리가 발생한 열화면적과 각각의 트리 패턴을 프랙탈 차원(FD)화 하였다.

사진 1은 본 연구에서 사용한 화상계측 시스템 장치이며, 그림 2는 실험과정에 대한 블록 다이어그램이다.

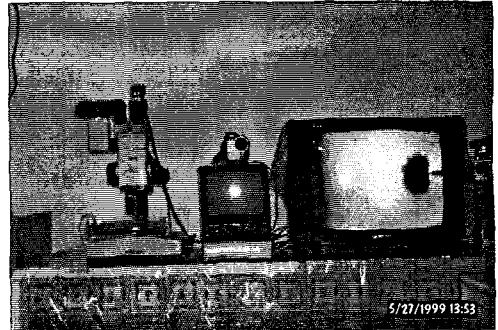


Photo. 1. Image processing system.

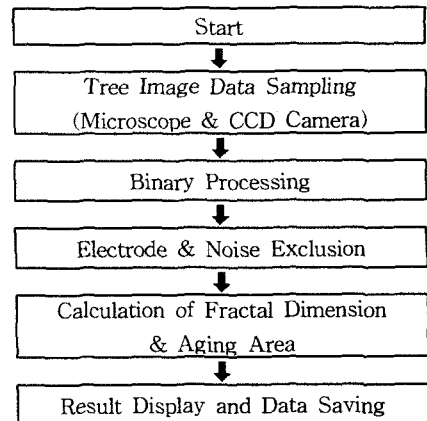


Fig. 2. The block diagram of experimental process.

## IV. 실험결과 및 고찰

### 4.1 트리 패턴과 프랙탈 차원화

전기트리 열화현상 진단방법은 시료에서 발생하는 트리를 시각적으로 관측하는 방법을 이용하였지만 전기적 트리현상은 재현성이 낮고 정성적인 기준이 정확하지 않다. 따라서 정확한 트리의 발생시각 및 진전과정을 관측하기 위해서는 화상처리를 이용한 연속적인 화상 데이터 처리가 필요하다. 이런 화상처리에 의한 전기트리 관측은 트리 진전과정의 정확도, 재현성, 신뢰성을 높일 수 있다.

그림 3은 화상계측에 의해 획득된 트리 패턴을 프랙탈 수학을 이용해 프랙탈 차원으로 정량화 하여 각각의 트리 패턴과 프랙탈 차원과의 관계를 분석한 결과이다.

저전계에서는 트리 형태의 트리패턴이 나타나고 고전계에서는 체스터너트형 형태, 중간 정도의 스트레스에서는 부시형 트리 패턴이 나타난다.

트리 형태의 트리 패턴은 1.1~1.4의 프랙탈 차원(FD)값을 갖고, 부시형 트리는 1.4~1.6FD 그리고 체스터너트형 트리 패턴은 1.5FD 이상의 값을 갖는다. 이런 트리 패턴은 인가된 전압에 의존해 고유한 프랙탈 차원으로 나타난다. 그러나 트리 개시 초기에는 고유한 프랙탈 차원값 보다 낮은 차원값을 갖게된다.

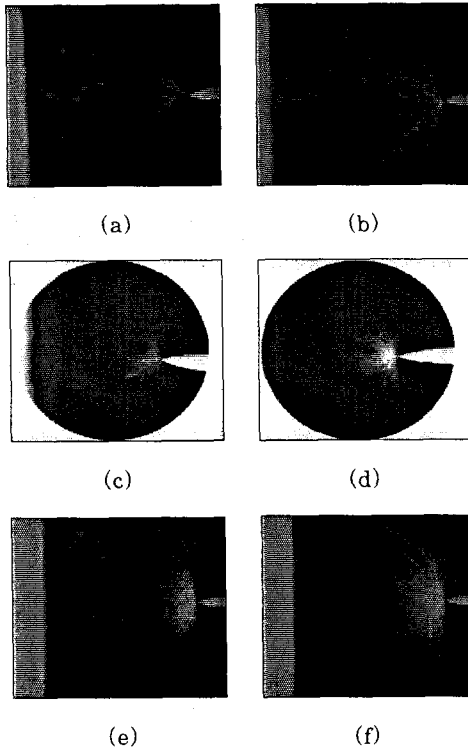


Fig. 3. The fractal dimension values according to tree patterns. (a),(b) are tree type trees, (b),(c) are bush type trees, (e),(f) are chestnut type trees. (a) FD=1.21, (b) FD=1.27, (c) FD=1.45, (d) FD=1.52, (e) FD=1.58, (f) FD=1.65.

### 4.2 프랙탈 차원을 이용한 정량화 프로그램

그림 4는 본 연구에서 새롭게 개발한 프랙탈 프로그램을 이용해 트리 화상을 입력받아 이진화 처리하고, 침-평판전극과 노이즈를 제거한 후 트리만의 화상을 프랙탈 차원화 한 결과이다.

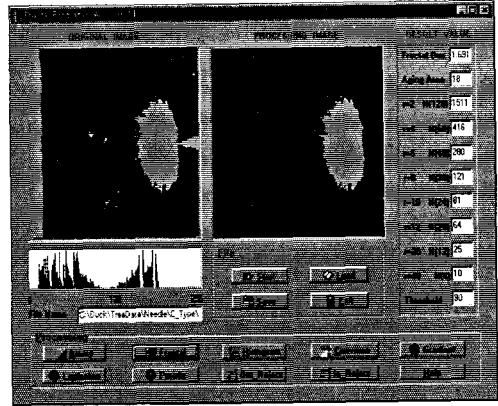


Fig. 4. Quantitative analysis program of tree image using the fractal algorithm.

## V. 결론

전기트리의 열화현상을 화상계측을 통하여 관측하고 각각의 트리패턴을 프랙탈 수학을 이용해 분석하고 프랙탈 차원화 한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 전기트리 패턴은 인가 전압에 의존해 고유한 프랙탈 차원을 갖는다.
2. 열화가 진행되는 동안 전기트리 패턴은 자기 상사성을 가지고 있다.
3. 트리형 트리는 1.1~1.4FD, 부시형 트리는 1.4~1.6FD, 체스터너트형 트리는 1.5FD 이상의 값을 갖는다.

## VI. 참고문헌

1. L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Williams, J. M. Alison, "Propagation of Electrical Tree Structure in Solid Polymeric Insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insul. Vol. 4, pp. 259-279, June 1997.
2. E. M. Lalitha, L. Satish, "Fractal Image Compression for Classification of PD Sources", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insul. Vol. 5, pp. 550-557, August 1998.
3. N. Shimizu, C. Laurent, "Electrical Tree Initiation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insul. Vol. 5, pp. 651-659, October 1998.