

음향방출 계측법을 이용한 프랙탈 특성과 트리잉 파괴진단에 관한 연구

(A Study on the Diagnosis of Treeing Breakdown and Fractal Characteristics Using the Method of Acoustic Emission)

김성홍* · 심종탁* · 김재환*
(Sung-Hong Kim · Jong-Tak Shim · Jae-Hwan Kim)

요 약

전극들과 절연재료 사이의 결함과 고분자 절연체 내부에서 여러 가지 결함에 의한 부분 방전이 발생함으로 일어날 수 있는 절연 재료의 트리 열화를 파괴 예지할 목적으로 하였다. 부분 방전에 기인한 트리잉은 절연 재료의 파괴를 일으킬 수 있는 중요한 원인가운데 하나다.

최근에는 절연 파괴 예지와 절연 재료의 열화 진단을 하는 방법이 중요하게 되었다. 연구 목적은 자동 계측 시스템을 사용하여 인가전압 11(kV), 인공적인 침상보이드(1.5(mm))을 지닌 고분자 절연체 내부에서 음향 방출 시스템과 프랙탈 차원을 사용하여 트리 현상을 관찰하였다. 따라서 본 논문에는 최소자승법에 의한 회귀분석을 사용하여 위상각-음향방출 펄스크기-열화시간 양상과 위상각-음향방출 펄스수-열화시간과 프랙탈 차원의 관계를 통하여 파괴가 발생하기 전의 파괴 예지법으로 사용하였다.

Abstract

As the purpose of the breakdown prediction of tree degradation of insulating materials caused by partial discharge occurring at various defects in the polymer insulator itself and at the interfaces between electrodes and the insulating materials. Treeing due to partial discharge is one of the main causes of breakdown of the insulating materials.

Recently, the necessity of establishing the way to diagnoses the aging of insulation materials and to predict of insulation breakdown become important.

The purpose of our work are to use acoustic emission System and fractal dimension and to investigated the treeing phenomena in polymeric insulation under applied AC voltage 11(kV) with an artificial needle-shaped void(1.5(mm)) using the above system.

*정회원 : 광운대학교 공대 전기공학과(신기술 연구소) “이 논문은 1997년도 교내 학술연구비 지원에 의한 것임”
접수일자 : 1997. 2. 15

Therefore, In this paper show that the correlation of Φ -AEA-t, Φ -AEN-t, fractal dimension using regression analysis by the method of least squares can be used to predict the breakdown just before the breakdown occurs.

1. 서 론

최근 전력 수요가 나날이 증가함에 따라 안정된 전력 공급의 요구가 점차적으로 증가됨으로서 전력 기기나 전력 케이블을 시작으로 전력 계통에 있어서 절연 성능의 중요성이 한층 높아지고 있다. 그러므로 종래에 비해 절연 재료의 내구성, 전기적 특성 등이 우수한 고분자 재료가 광범위하게 이용되고 있다.

그러나 고분자 재료 내의 미소 보이드 또는 도체 경계에서의 보이드, 크랙(crack)등의 결함이 존재하면 부분방전의 원인이 되어 재료를 열화 시키고 절연파괴를 일으키게 된다는 것은 지금까지 알려진 사실이다. 이 문제에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나 완전한 대책은 아직 없다[1].

절연물 내부에 부분방전이 발생하지 않기를 바라지만, 발생되면 그 방전이 절연 수명에 치명적인 역할을 하기 때문에, 절연파괴만은 방지해야 한다는 관점에 파괴 예지를 위한 절연 열화 진단법이 확립되어야만 한다.

본 논문에서는 실제 전력케이블에서 발생하는 전기적 트리를 침대 평판 전극 형태의 시료에 11(kV)의 고전계를 인가하여 발생시킨 다음 광학현미경을 이용한 movie camera을 이용하여 트리형상을 촬영하여 열화 시간대별로 트리 길이와 프랙탈 차원을 구하였고, 독자적으로 개발한 음향 방출 계측 시스템을 이용하여 음향 방출 펄스 및 펄스수를 동시 측정하여 프랙탈 차원과 상호 비교하여 열화 과정의 진단 정보로 이용될 수 있는지의 상관 관계를 연구하였다[2]. 분석 방법으로는 프랙탈 차원의 값과 비례성을 보이는 정보를 얻기 위하여 트리 길이와 음향방출 펄스 진폭과 펄스수를 상호 비교 연구 하였고, 상용 주파 인가 전압 11(kV), 60(Hz)의 위상각에 의한 음향 방출 평균 펄스 진폭(이하 Φ -AEA라고 약한다)과 음향 방출 평균 펄스수(이하

Φ -AEN라고 약한다)에 대한 3차원 분포 양상을 이용하여 트리 개시 및 진전의 메카니즘을 연구하기 위하여 독자적으로 개발한 음향 방출 계측 시스템과 부분방전 검출기를 복합 운용하여 연구에 착수하였다[2~3].

그렇게 함으로서 프랙탈 차원에 의해 열화 과정을 진단해 보며, 불투명한 재료와 복잡한 전극 배열에 적합하고 전자기적인 간섭을 받지 않고 트리 진전 실시간(real time)과 서비스 상태의 감시가 가능한 음향 방출 특성을 이용하여 변압기 및 케이블 접속부의 부분방전을 효과적으로 계측할 수 있는 시스템을 구축하는데 목적을 두고 있다[1, 4].

2. 시편 제작 및 실험 방법

본 실험에 사용된 시편은 저밀도 폴리에틸렌(이하 LDPE)으로서 밀도 0.92(g/cm³) LDPE의 펠렛(Pellet)을 사용하였다. 순수한 LDPE 펠렛을 자체 제작한 시료 제작기의 주형 위에 올려놓고 120(°C)에서 5분간 예열한 후 시료 중앙에 침전극을 꽂고 압력이 100(kg · f/cm²)가 될 때까지 5분간 단계적으로 가압하였다. 다시 5분 동안 주형을 가열한 후 시료의 투명도를 위하여 10(°C)의 물에서 급냉 하였다. 시편의 형태는 그림 1에서 나타낸 바와 같다. 시편의 규격은 30×40×3.5(mm³)로 제조하였으며 침 전극은 직경 0.56(mm Φ)인 스테인레스 스틸이며 예칭법에 의해 침 선단 곡률 반경10(μ m)으로 조정하여 시편에 주입하였다. 삽입시 시료의 변형을 없애기 위하여 다시 110(°C)에서 10분간 가열한 후 서냉하여 사용하였다. 인공적인 침상 보이드는 주입된 전극을 다시 빼내어 보이드 갭길이를 1.5(mm)의 시편을 제작하였으며, 이때 1기압의 공기를 봉입 하였다. 시료의 표면과 침전극 사이를 에폭시 수지 계의 접착제로 밀봉하였고, 실험 순서에 따라 실제 현미경(배율 80배)으로 관찰하여 보이드의 이상 유무를 확인

한 후 실험에 사용하였다. 전극의 형태는 침대 평판 이고 극간 거리는 3.5(mm)로 하였다.

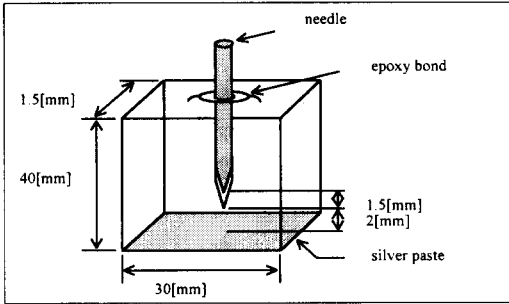


그림 1. 전극 구성
Fig. 1 Electrode Composition

실험 장치에 대한 블록 선도는 그림 2에 표시하였다. 인가 전압은 11(kV), 60(Hz)이며 전압은 승압 속도 1(kV/s)로 11(kV)까지 전압을 인가한 후 파괴시까지 일정하게 유지하였다. 고전압 회로는 음향 방출 검출 회로의 잡음을 일으킬 수 있는 코로나 방전을 억제하기 위해 실리콘 오일에 함침하였다. 음향 센서는 공진 주파수 300(kHz)을 갖는 PZT (Piezoelectric Lead Zirconate Titanate) 변환기가 사용되었고 평판 전극 바로 아래 거리 2(cm)에 설치하였고 음향의 원신호 자체는 너무 미약해서 80 (dB)의 차동 증폭기로 증폭하고 80(kHz)의 High Pass Filter를 사용하였다. 설계시 최대한의 노이즈를 제거하였고 문턱 준위는 증폭된 신호를 0.03(V)로 하여 확실한 음향 신호를 얻을 수 있었다. 위상각 특성을 보기 위해 인가 전압을 고전압 Probe(HP 34300A)로 전압을 강하시켜 디지털 오실로스코프 (HP 54501)의 채널1에 입력시켰다. 증폭된 음향 신호는 동기화를 거쳐 인가 전압 한 주기 동안의 펄스를 디지털 오실로스코프 채널2에 입력되어 Interface를 통해 PC로 전송되고 각 펄스의 위상 정보와 펄스 크기 정보를 얻는다[4]. 음향 방출의 평균 펄스는 인가 전압 1사이클을 정의 제로 크로스 점을 44개의 위상각으로 구분하여 각 구간마다의 3분 동안의 펄스를 평균한 값으로 사용하였다.

트리 형상을 광학 현미경을 통한 CCD 카메라를 이용하여 촬영후 Video 테이프에 녹화한 후 화상보

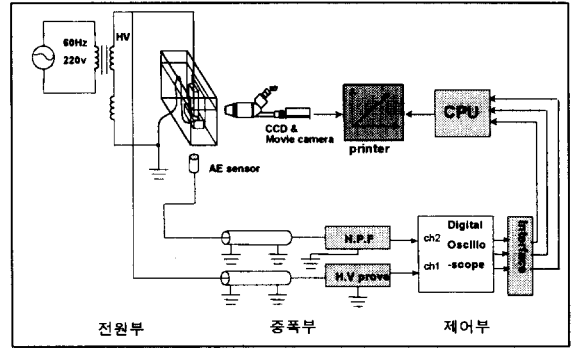


그림 2. 실험 장치의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of experiment device

드를 이용하여 PC로 입력되었다. 입력된 화상을 이용하여 트리 길이가 많이 성장하는 3분, 6분, 9분, 21분, 30분 별로 트리 길이와 Cover법을 이용하여 프랙탈 차원을 계산하였다.

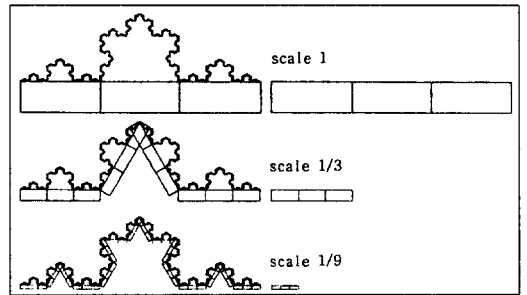


그림 3. 코흐 곡선
Fig. 3. Koch curve

Cover법을 이용한 프랙탈 차원의 식

$$Db = \log \frac{[N(s)]}{\log(1/s)} \quad (1)$$

N(s) : 박스의 수

s : 축소 인자

이와 같은 것은 단계적으로 성장하는 트리의 속성을 이용하여 통계적인 화상 처리를 하기 위하여 자기 유사성을 갖는 트리의 프랙탈 차원 해석에 대한 연구가 널리 진행되고 있다. 그림 5는 코흐 곡선으로서 축소 인자(scale)가 1/3, 1/9에 따라 제한된 공간 안에서 그들이 가지고 있는 모습과 비슷하게 크기가 작아지면서 무한히 자기 모습을 복제해 가는 자기 유사성을 갖고 있는 모습을 보여주고 있다[5~6].

3. 실험 결과 및 검토

3.1 트리 진전 및 프랙탈 차원

보이드 방전시 트리 형태는 잔가지가 존재하는 가지형 트리이고 파괴에 이르는 시간은 30분의 짧은 파괴 시간을 얻을 수 있었다.

인공보이드 길이 1.5[mm]의 시료에 전압 11[kV]를 인가 할 때 보이드 방전에서 트리로 진전하는 양상을 사진 1에 나타내고 있다. 사진 1의 (a)~(e)는 이퀄라이저 필터링을 거친 후 각각 열화 초기 3분, 6분, 12분, 파괴시 30분의 보이드 방전 트리 진전을 나타내고 있으며 이를 다시 프랙탈 차원으로 나타내기 위해 Cover법을 이용하여 나타내었다.

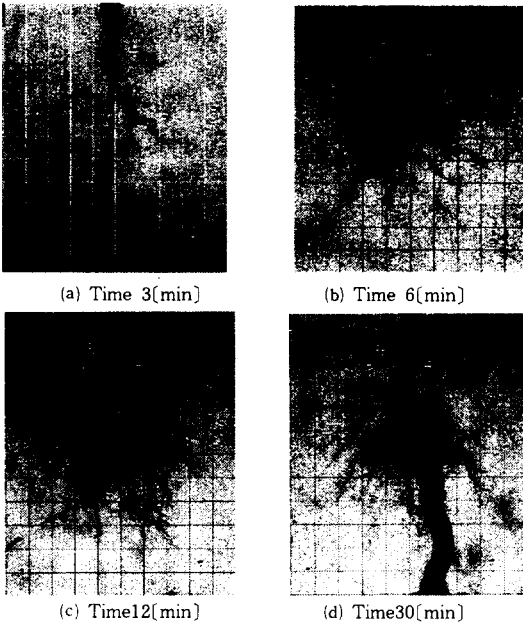


사진 1. 트리의 진전 양상
Fig. 1. Tree propagation type

트리 형상은 전 보고[7, 8]와 같이 잔가지가 많은 가지형 트리 진전을 볼 수 있었다. 트리의 길이(Lmax)는 방전갭 하부로부터 대향 전극으로 향하여 신장하는 트리 내부의 최대 트리 길이로 하였다. 과전후 2분 후에 트리의 발생 성장을 확인할 수 있었다. 트리의 성장은 1개소만이 아니고 복수의 장소로부터 일어나 그중 1~2개가 크게 성장하여 절연과

파괴에 이른다. 특징적인 것은 전 보고[7, 8]와 같이 갭 길이가 길어서 상대적으로 파괴에 이르는 시간이 빨랐으므로(30분) 트리의 발생과 진전 양상도 각 가지마다 독립적으로 발생됨을 알 수 있었다.

그림 4는 Cover법에 의하여 프랙탈 차원을 구하는 법을 나타낸 것으로서 양대수 그래프 상에서 양호한 직선 관계를 나타내었다. 이것으로부터 교류 전압 인가시 발생하는 트리는 자기 유사성을 갖는 프랙탈임을 확인할 수 있었고 그 형상의 복잡함의 정도인 프랙탈 차원은 직선 기울기의 절대 값으로부터 1.196임을 알 수 있었다.

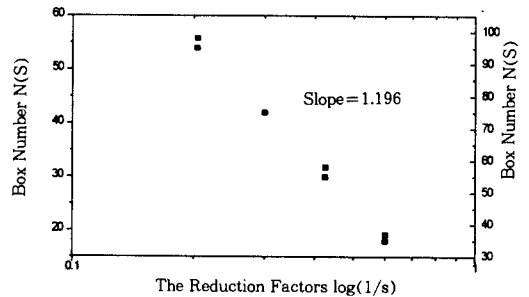


그림 4. Cover법을 이용한 프랙탈 차원의 추정
Fig. 4. The estimation of fractal dimension using Cover method

그림 5는 인가 전압 11[kV]에 대한 트리 길이와 프랙탈 차원을 나타내고 있으며 9분까지는 파괴가 급속하게 진행됨에 따라 트리의 길이와 프랙탈 차원의 증가를 알 수 있다. 이는 시간이 경과할수록 트리가 신장함에 따라 방전 전하량의 증가와 함께 전하가 이동하는 거리가 커짐에 따라 초기보다는 트리의 길이가 둔해짐을 알 수 있었다. 9분이 경과후 21분까지는 전압인가 초기 시간보다 비교적 완만하게 길

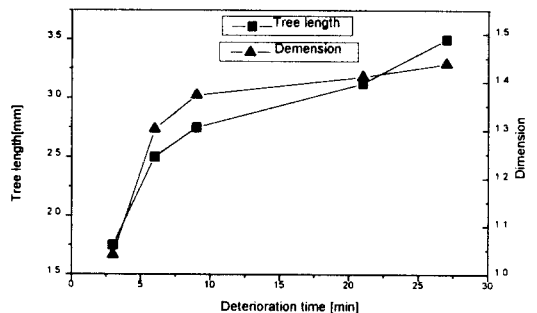


그림 5. 트리 길이와 프랙탈 차원
Fig. 5. Tree length and fractal dimension

이가 신장됨을 알 수 있었다. 트리 길이(이하 Lmax)는 열화 초기에 급격히 증가되었다가 그 이후에는 완만한 증가를 보이다가 파괴 말기에 급속히 증가하였다. 프랙탈 차원과 Lmax는 전반적인 경향으로 보아서 비례한다고 볼 수 있다.

그림 6은 AEA의 특성과 프랙탈 차원을 나타내고 있다.

AEA의 특성은 트리 발생 초기로부터 파괴에 이르기까지 증가와 감소를 나타내고 있으나 전체적으로는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 AEA의 진폭 특성과 프랙탈 차원의 상관관계는 발견할 수 없었다.

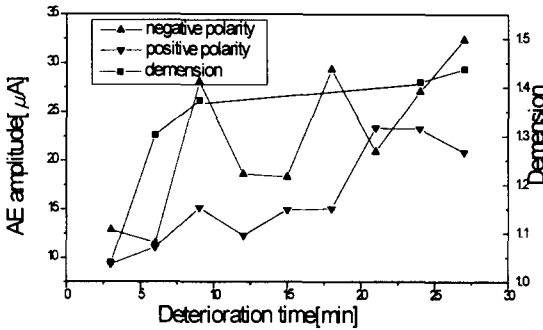


그림 6. AEA의 특성과 프랙탈 차원
Fig. 6. The characteristics of AEA and fractal dimension

그림 7은 AEN의 특성과 프랙탈 차원을 나타내고 있다. 발생 펄스는 열화 초기에는 작은 진폭을 갖는 펄스수의 증가를, 열화가 가속됨에 따라 큰 진폭을 갖는 펄스수의 증가를 보여주고 있다. 열화 말기인 20분 이후에는 작은 진폭을 갖는 펄스수의 급격한 감소를 보이다가 파괴에 이르고 있다.

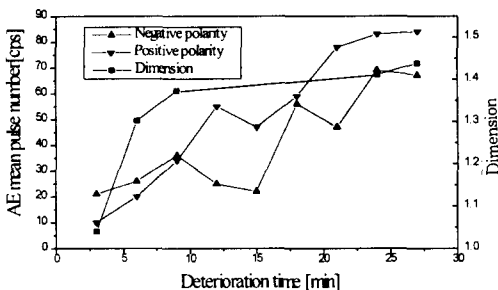


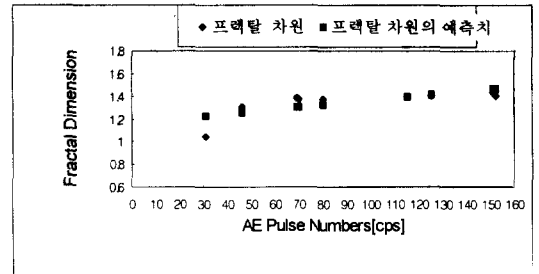
그림 7. AE 펄스수와 프랙탈 차원
Fig. 7. The pulse number of AE and fractal dimension

그림 8은 그림 7의 관계를 정량적으로 나타내기 위하여 회귀분석을 행하였다.

통계표를 보면 AEN과 프랙탈 차원의 선형성 여부를 평가하는 상관계수 r은 73[%]로서 많은 상관성을 나타내고있다. 그러나 상관계수로는 기울기나 y절편을 설명할 수 없으므로 최소 자승법(AEN과 프랙탈 차원간의 편차의 자승 합이 최소인 곡선)을 이용하여 회귀직선을 구하여 AEN과 프랙탈 차원의 관계를 정립하여 열화정보로 이용하였다. 여기에서 구한 회귀직선에 얼마나 기여하는지의 정량적인 값으로 표현하기 위하여 결정계수(r^2)를 구하였다. 구한 값은 53[%]정도 회귀직선에 기여한다고 할 수 있다. 그렇게 함으로서 AEN가 가지고 있는 고유의 정보, 즉 평균 펄스수의 증가에 따라서 열화의 정도를 알 수 있다고 사료되며 이 정보를 프랙탈 차원에 접목시켜 이용할 수 있으리라 생각한다. 전반적인 경향으로 보아 유사한 그래프를 나타내고 있어서 열화 진단의 정보로 사용될 수 있으리라 판단 된다.

회귀분석 통계량	
다중 상관 계수	0.725158
결정 계수	0.525854

(a) 회귀분석 통계량
(a) Statistics of regression analysis



(b) 회귀분석 그래프
(b) Graph of regression analysis

그림 8. AEN과 프랙탈 차원의 회귀분석
Fig. 8. Regression of AEN and fractal dimension

3.2 ϕ -AEA-t와 ϕ -AEN-t의 분포 특성

그림 9는 인가전압 위상각에 따른 음향 방출의 평균 펄스 진폭의 열화 시간(이하 ϕ -AEA-t라고 약한다)의 분포 특성을 나타낸 것으로서 갭 길이가

긴 경우인 큰 펄스 진폭을 갖는 펄스의 호트러짐이 크다고 볼 수 있다. 전 보고[7, 8]의 경우 무보이드 경우와 보이드 방전시 펄스 발생이 급격히 상승했으며 인공적인 침상 보이드의 길이가 길수록 큰 펄스 진폭을 갖는 펄스의 호트러짐이 크게 발생함을 볼 수 있었다. 정극성시는 열화 초기부터 말기까지 피이크(위상각이 $\pi/2$)를 넘어선 영역에서 펄스 발생을 보이지만 펄스 발생 분포 중심은 저위상($\pi/6 \sim \pi/4$)영역에서 발생하고, 부극성시는 펄스 발생 위상 분포의 폭이 넓어지면서 분포 중심의 호트러짐이 크고 열화 초기부터 열화가 진전됨에 따라 저위상으로 이동하다 파괴 말기 고위상 영역에 이른다. 정극성시 저위상각에 머무르는 이유는 교류 전압 인가시 부의 반사이클 피크로부터 극성이 변화하여 정극성의 피이크는 부극성의 방전에 의해 잔류 전하의 영향을 최고로 받기 쉬운 영역이 정극성의 위상 초기이며 정극성 피크 근방에서는 잔류 전하 영향을 최고로 받기 어렵기 때문에 피크 부근에서 펄스 발생이 둔화된다. 부극성시 파괴 말기 고위상으로 이동하는 이유는 Kitamura씨[3, 9]등의 연구에서 파괴에 가까울수록 트리 길이가 길어져서 방전시 높은 전압이 필요하기 때문에 고위상으로 약간 이동한다고 사료된다.

그림 10은 인가 전압 위상 각에 따른 음향 방출의 평균 펄스수의 열화 시간(이하 ϕ -AEN-t라고 약한다)의 분포 특성을 나타낸 것으로서 부극성시 펄스의 호트러짐과 정극성시 위상 분포는 ϕ -AEA-t의 분포 패턴과 유사한 형태를 보이지만 정극성시의 발생 펄스는 열화가 진행됨에 따라서 작은 진폭을 갖는 펄스수가 많음을 보여주고 있고 부극성시는

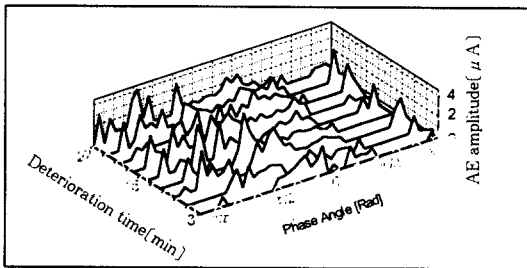


그림 9. ϕ -AEA-t의 분포 특성
Fig. 9. Characteristics of distribution ϕ -AEA-t

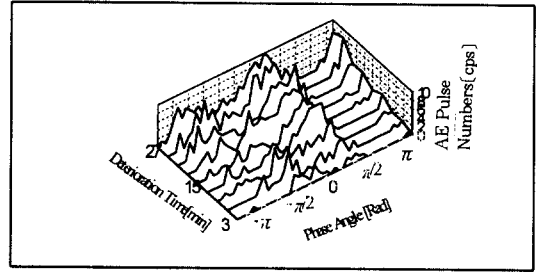


그림 10. ϕ -AEN-t의 분포 특성
Fig. 10. Characteristics of distribution ϕ -AEN-t

열화 초기에는 큰 진폭을 갖는 펄스수가 적었으며 열화가 가속됨에 따라 큰 진폭을 갖는 펄스수의 증가를 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구는 음향 방출 펄스를 계측하여 프랙탈 차원과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AC 11(kV)를 인가시 LDPE하에서 트리는 자기 유사성을 갖는 프랙탈이라 사료되며 트리 길이와 대체적으로 비례한다.

2) 위상각 분포 특성에 있어서 무보이드 경우 특성 위상 영역에 집중 하지만 본 연구에 ϕ -AEA-t와 ϕ -AEN-t의 경우 피크를 넘어선 고위상 영역까지 분포 중심의 호트러짐이 크다는 사실은 절연 진단의 정보로 사용되리라 생각한다.

3) 프랙탈 차원과 AEA의 진폭 특성의 그래프는 유사한 관계를 발견할 수 없었고 AEN과의 전반적인 경향으로 보아 유사함을 보여 파라미터를 이용한 열화 진단의 정보로 이용 될 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] L.A Dissade, J.C Fothergill, : "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers" Peter Peregrinus Ltd, pp. 69~154, 1992.
- [2] T. Okamoto, T. Tanaka, : "Change in Pulse-Mean ϕ -Q Distribution Patterns of Partial Discharge due to treeing Propagation", JIEE, Vol. 102-A, No.12, 1982.
- [3] Tairo et al. : "Phase Angle Analysis of discharge Magnitude distribution in a Fine Void", JIEE, Vol. 109, No. 12, 1989.
- [4] Koji Urame, YoshiYasr Ehara, Haruo Kishida, Tairo

Ito, : "Analysis of Treeing Phenomena by Discharge Luminescence in Each Phase Angle", JIEE, Vol.115. A, No.11, 1995.

- [5] 工藤勝利: "放電パターンにおけるフラクタル", 静電氣學誌, 16, 115, 1992.
- [6] 工藤 丸山 小林: "高分子絶縁材料中におけるトリ-のフラクタル性", 電學論 A, Vol.113-A, 480, 1993.
- [7] 朴材俊, 金在煥: "음향 방출 계측법에 따른 가교 폴리에틸렌 케이블의 트리잉 파괴 예지에 관한 연구", 조명 전기 설비 학회 논문지, Vol.7, No.4, 1993.
- [8] 朴材俊, 金相男: "인공적 침상 보이드의 갭 길이 변화에 따른 음향 방출 특성", 전기 전자 재료 학회, Vol.8, No.4, 1995.
- [9] Kitamura and S.Hirabayashi: "Tree Growth in Epoxy Resin at Final Stage of Internal Partial Discharge Degradation", JIEE, Vol.104, No.10, 1974.
- [10] Hiroyuki Matsuzaki, et al: "A Study of Phase-Angle Analysis Discharge at a Cylindrical Void in a Polyethylene Sheet," JIEE, Vol.108, No.3, 1988.
- [11] N.Yoshimura, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials", IEEE Trans. Elec. Ins. Vol. EI-17, No.4, 1982.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 성 흥(金成烘)

1964년 10월 10일생. 1988년 2월 광운대학교 전기 공학과 졸업. 1990년 2월 광운대학교 전기 공학과 석사. 1997년 동 대학원 전기 공학과 졸업(박사).



심 중 탁(沈鐘倬)

1966년 5월 11일생. 1989년 광운대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 석사. 1996년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



김 재 환(金在煥)

1934년 9월 10일생. 1958년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 홍익대 전기 공학과 졸업(석사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). '59~'73년 한국전력(주)근무. 1964년 불란서 전력공사 초청 도블 기술 연수. '73년~'75년 홍익공업전문대학 전기과 전임 강사. '75년~현재 광운대 전기공학과 교수.