

에폭시수지의 트리성장에 따른 초음파 신호검출

Detection of Ultrasonic Signals Associated with Tree Growth in Epoxy resin

이 상우*, 송 현직*, 이 광식*, 이 동인*, 김 인식**

(Sang-Woo Lee*, Hyun-Jig Song*, Kwang-Sik Lee*, Dong-In Lee*, In-Sik Kim**)

Abstract

Ultrasonic signal characteristics related with the growth of electrical trees in epoxy resin are examined under 60[Hz] ac voltage application along with a CCD camera and PD current methods.

The ultrasonic sensor with a resonant frequency of 200[kHz] supported by a mechanical spring is attached directly to the lower-side of plane electrode.

The magnitude of partial discharge and count rate of ultrasonic signals have been measured according to the tree growth from a needle tip in an epoxy sample.

Key Words(중요용어) : epoxy resin(에폭시 수지), electrical tree(전기트리), ultrasonic signal(초음파신호)

1. 서 론

에폭시수지는 기계적 강도가 높고 전기적 절연 성능이 우수할 뿐만 아니라 성형이 비교적 용이하므로 오늘날 고전압용 절연재료로서 널리 사용되고 있다. 에폭시수지를 전기 절연물로서 사용할 경우 일반적으로 도체인 전극과 알제형으로 제작되고 있으므로 재료의 결함이나 기기의 제작 시에 이물(異物)이 혼입되거나 미소 보이드(void) 또는 크랙(crack) 등이 발생될 수 있다. 고전압이 인가된 고체 절연물내에 보이드 등이 발생되면 유전율의 차이에 의해 보이드 내부의 전계는 집중되어 부분방전이 발생되고 절연재료는 트리(tree) 형태로 열화되어 결국 절연파괴에 이르게 된다. 그러므로 고분자 재료의 트리잉파괴(treeing breakdown) 특성은 절연성능과 기기의 절연수명에 매우 중요한 영향을 미치는 전구파괴현상(prebreakdown phenomenon)이므로 트리의 발생 및 성장에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다.

고전압 전기회로에서 부분방전이 일어나면 반드시 방전음이 수반되고 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며 이러한 방전음을 효과적으로 검출하기 위해 초음파센서가 이용되고 있다. 초음파센서를 이용하여 전력용 유압변압기 또는 커패시터 내부에서

파발생되는 부분방전을 비교적 정확히 검출할 수 있다는 연구보고가 최근 많이 발표되고 있다.^{3,4)} 그러나 볼드형 전력변압기와 같은 전력기기에서는 고체절연물이 사용되고 이러한 절연매질에서는 트리잉파괴가 가장 심각한 문제가 되고 있으므로 트리의 발생 및 성장에 따른 초음파신호검출에 관한 연구는 매우 미흡한 상태이므로 연구의 필요성을 느낀다.⁵⁾ 트리잉파괴는 심한 불평등 전극구조에서 국부적인 고전계에 의해 발생되고 있다. 일단 트리가 발생되면 시료의 일부를 수[μ m] 정도의 극히 미세한 공동을 형성시키고 그 공동내부에서 부분방전이 계속 발생하면 트리는 대향전극을 향해 성장하게 된다. 따라서 트리의 진전은 트리내부에서 발생하는 코로나 스트리머에 의해 많은 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 최대 평판전극을 사용한 에폭시수지의 시료에 60[Hz] 교류전압을 인가하여 트리를 발생시킨 경우 트리의 길이에 따른 부분방전 전하량의 크기, 초음파신호의 크기 및 방전전류의 크기 등을 조사 비교하였다. 트리에 의한 열화상태를 조기에 효과적으로 파악하기 위해서는 방전전류 및 초음파 신호의 크기는 정량적인 측정이 요구되므로 본 연구에서는 펄스계수회로를 구성하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시편제작

트리를 용이하게 형성시키기 위해서는 대단히 높

* : 영남대학교 전기전자공학부
** : 경일대학교 전기공학과

은 전계가 필요하므로 본 실험에서는 침대평판 전극을 사용하였다. 교류전압을 인가하면 가장 전위경도가 높은 침전극의 선단으로부터 트리채널(tree channel)이 형성되어 평판전극을 향해 성장하게 된다. 본 실험에 사용된 시료는 고온 경화용 주형 수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형 에폭시 수지(상품명: Araldite B41 HT 903)와 가사 시간이 길고 반응시 발열량이 적은 산무수물 계통의 경화제인 Methpa(Cyba Geigy Co, Swiss)를 사용하였다. 시편 제작시 에폭시수지는 접착력이 매우 강하므로 이형용 용이하게 하기 위하여 에폭시수지와 반응하지 않는 PET 제품을 사용하였으며, 2시간 30분 동안 130[°C]로 가열하고 30분 동안 에폭시수지와 경화제를 1:1로 혼합주입하고 13시간 동안 경화한 후 시간당 4[°C]의 비율로 실온까지 냉각하여 제작하였다. 그림1에 시편의 제조 공정을 나타내었다.

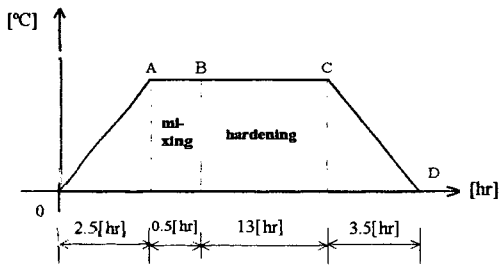


그림 1. 시료의 제조 공정
Fig. 1. Manufacturing Process of Sample

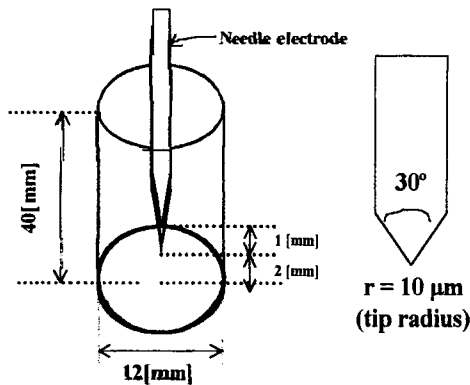


그림 2. 시료 및 전극의 형상
Fig. 2. Cross-section of Sample and Electrode

그림2는 실험에 사용한 침전극 및 시료의 형상을 나타낸 것이다. 침전극은 직경 1.0[mm], 길이 55[mm]이며 재질은 stainless steel 이며 침의 선단각은 약 30도이고 선단곡률반경은 약 10[μm]가 되도록 연마하였다. 침전극으로 사용된 바늘은 에폭시를 성형하기 위해 경화시키기 전에 미리 삽입하였으며 경화 후에 다시 침전극을 빼어 침전극 선단에 길이 1.0[mm]인 인공 void를 만들었다. 시료의 하단에는 직경 100[mm]인 황동제의 평판전극을 설치하였으며,

침전극 선단과 평판전극사이의 거리는 3[mm]로 하였다. 실험은 온도 22~30[°C], 습도 50~70[%]의 실온에서 하였으며, 고전압 인가시 시료표면으로 섬락현상이 발생되지 않게 하기 위해 실리콘 오일(silicon oil)에 함침 시켰으며, 이를 위해 평판전극에 직경 70[mm], 높이 80[mm]인 아크릴 원통을 설치하였다.

2. 2 실험장치 및 방법

본 실험장치에 대한 블록선도는 그림3에 나타내었다. 시료내부의 음향신호를 효과적으로 검출하기 위해 초음파센서는 스프링에 의해 평판전극 하부에 설치하였다. 초음파센서는 압전변환소자로서 일본 Murata사의 MA200A1이고, 공진주파수는 200[kHz]이다. 압전소자와 평판전극사이에는 두께 2[mm]인 플라스틱판을 삽입시켜 절연하였다. 음향의 원신호 자체는 미약하므로 80[dB]의 이득을 갖는 전치증폭기(pre-amplifier)로 증폭하고 기계적 진동 등에 의한 외부 노이즈를 제거하기 위해 차단주파수 150[kHz]인 고역통과필터(high-pass filter)를 사용하였다. 필터를 거친 신호는 신호의 레벨이 낮으므로 주증폭기(main-amplifier)를 설계하였다. 주증폭기는 3단 증폭하여 가변저항으로 이득을 적절히 조절할 수 있도록 하였으며, 전치증폭기에서 신호와 함께 증폭된 잡음과 외부진동 등에 의한 잡음을 제거하기 위해 차단주파수 150[kHz]인 고역통과능동필터를 사용하였다. 그리고 주증폭기를 거친 전기신호는 문턱레벨 1.0[V], 게이트신호 1.0[μs]인 카운터회로에 전송되도록 하였다. 또한 센서측 입력단에는 아크방전에 의한 이상유도전압이 수신회로에 가해지는 것을 방지하기 위해 서지흡수용 고속스위칭 다이오드를 삽입하였다. 이 보호장체에 의해 약 0.6[V]이상의 전압에서 고속으로 동작하도록 설계하였다. 증폭기를 포함한 수신회로는 외부노이즈에 대한 차폐를 위해 알루미늄 케이스에 넣어 실험하였다. 또한 발생노이즈를 최대한 제거하기 위해 증폭기 회로의 외부전원은 건전지를 사용하였다. 부분방전 전류펄스의 관측은 평판전극과 접지사이에 측정용저항 10[kΩ]를 통하여 측정하였다. 고주파 성분인 방전전류를 관찰하기 위해 우선 충전전류를 차단제거시키고 이득 40[dB]인 증폭기로 신호 증폭시켰다. 증폭된 신호는 공진주파수가 약 230[kHz]인 동조회로를 거쳐 초음파 수신회로와 동일한 카운터회로에 입력되도록 하였다. 부분방전 전류펄스 및 초음파신호를 관찰하기 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하였다. 시료내의 트리관찰은 CCD카메라를 설치하여 확대한 화상을 모니터에서 관찰하였다. 트리의 진행상태는 실험 후 녹화장치를 분석하므로써 알 수 있었으며 사진은 배율 30배인 광학현미경을 사용하여 촬영하였다. 고전압 발생장치는 입력전압 220[V], 60[Hz], 최대출력전압 30[kV]인 Corona detecting apparatus system set을 사용하였다. 인가전압은 12[kV] 및 16[kV]로 하였으며, 전압인가방식은 승압속도 1.0[kV/s]로 12[kV] 또는 16[kV]까지 전압을 인가한 후 패배시까지 일정하게 유지하였다. 인가전압을 정밀하게 측정하기 위하여 분압비가 2000:1인 고압 프로브(High Voltage Probe, type; EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1 트리전전 특성

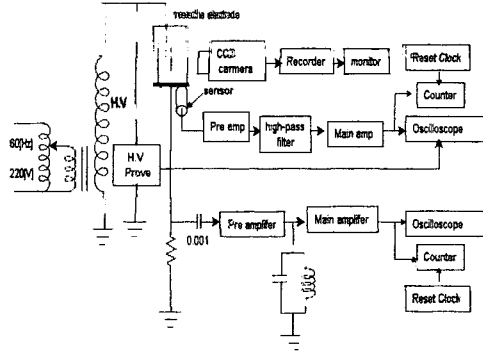


그림 3. 실험장치의 블록선도
Fig. 3. Block Diagram of Experimental Set-up

그림4, 그림5는 12[kV] 및 16[kV] 인가시 열화시간에 따른 트리길이 L[mm] 및 방전전하량 q[pC]을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전압이 높을수록 트리는 빠르게 성장되어 절연과피까지의 시간은 단축됨을 알 수 있다. 그림 4 및 그림 5에서 전압을 인가하여 처음 5분동안은 트리의 길이는 대단히 미약한 것으로 나타나고 있으나, 그 5분동안은 매우 빠른 속도로 트리가 진행되고 있다. 이후 절연과피가 발생될 때 까지 거의 일정한 비율로 트리가 진전되고 있다는 것으로 나타났다.

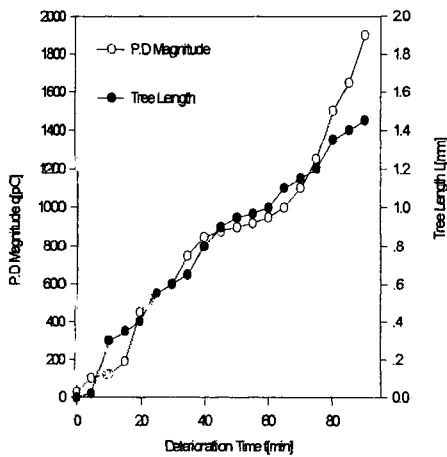


그림 4. 열화시간에 따른 q 및 L 특성(V=12[kV])
Fig. 4. q and L Characteristic with Deterioration Time (V=12[kV])

3. 2 트리의 길이에 따른 초음파특성

그림6, 그림7은 12[kV] 및 16[kV]인가시 트리길이에 따른 방전전하량 q[pC] 및 초음파펄스수 Nu[EA] 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 것과 같이 트리길이가 증가함에 따라 방전전하

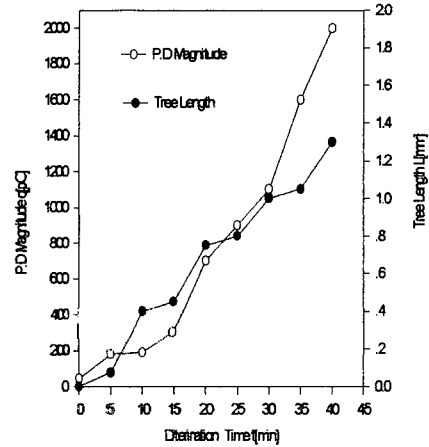


그림 5. 열화시간에 따른 q 및 L 특성(V=16[kV])
Fig. 5. q and L Characteristic with Deterioration Time (V=16[kV])

량 및 초음파펄스의 개수는 비례하여 증가되고 있다. 초음파신호의 특성은 방전전하량의 증가특성과 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. 이는 방전 에너지 W는 방전전하량 q와 인가전압 v의 곱에 비례하므로 일정전압하에서는 방전전하량 q에 비례하고 있다. 따라서 방전에너지가 증가하면, 이 에너지에 의해 기계적인 힘이 보이드 내부에 가해지므로 고체 절연물은 탄성 및 소성변형이 야기되거나 미소한 크랙이 생길수가 있으므로 이러한 특성이 외부 초음파의 출력으로 나타나는 것으로 생각된다. 그림8, 그림9는 전압인가후 트리말기에서 관측된 초음파신호 파형을 나타낸 것이다. 여기서 채널1은 인가전압 파형이고, 채널2는 초음파신호 파형이다. 초음파신호는 일반적으로 낮은전압에서 정극성 전압에서 용이하게 발생되기 시작하여 전압의 상승과 더불어 신호의 크기는 증가되는 경향을 보인다. 그림 8, 그림9에서도 정극성인 경우가 부극성인 경우보다 더욱 활발하게 초음파가 방출되는것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 공진주파수 200[kHz]인 초음파센서를 사용하여 에폭시수지의 트리진전에 따른 초음파신호와 방전전하량의 관계를 조사하였다. 두종류의 전압(16[kV] 및 12[kV])을 인가한 경우 트리 개시상 패에서부터 절연과피가 발생하기까지 거의 일정한 비율로 트리는 성장되고 있으며, 높은전압 16[kV]에서 트리는 빠르게 진전되는 것으로 나타났다. 또한 트리가 성장함에 따라 초음파 신호의크기와 방전전하의 크기는 매우 밀접한 관계가 있으며 트리길이에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 특성을 이용함으로써 트리의 발생위치 및 크기를 추정할 수 있으므로 고체절연물의 트리에 의한 절연열화를 진단하는 장치에 이용될 수 있을 것이다.

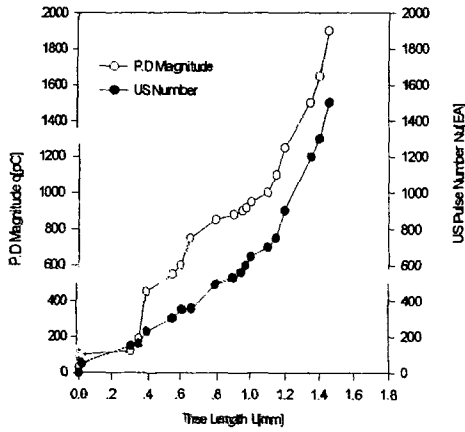


그림 6. 트리길이에 따른 q 및 Nu 특성(V=12[kV])
Fig. 6. q and Nu Characteristic with Tree Length(V=12[kV])

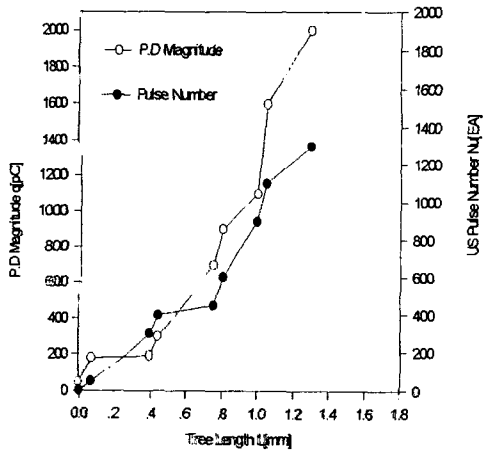


그림 7. 트리길이에 따른 q 및 Nu 특성(V=16[kV])
Fig. 7. q and Nu Characteristic with Tree Length(V=16[kV])

5. Y. Kagawa, S. Yamazaki, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials" IEEE Trans. Elect. Ins. ul., Vol. EI-17, No. 4, pp. 314-8, 1982

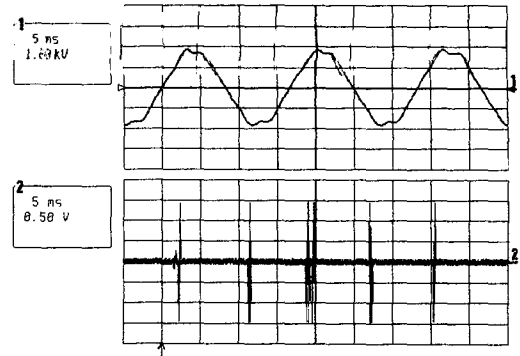


그림 8. 대표적인 초음파신호 파형(V=12[kV], 70[min])
Fig. 8. Typical Ultrasonic Signal Waveform(V=12[kV], 70[min])

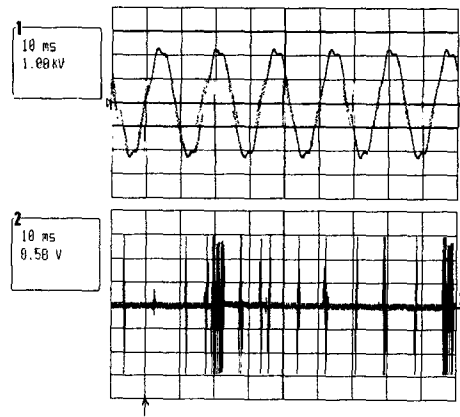


그림 9. 대표적인 초음파신호 파형(V=16[kV], 38[min])
Fig. 9. Typical Ultrasonic Signal Waveform(V=16[kV], 38[min])

참고문헌

1. Y. Shibuya, S. Zoledziowski, "Void Formation and Electrical Breakdown in Epoxy Resin" IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 1, January 1977.
2. Tomas W. Dakin, "Application of Epoxy Resin in Electrical Apparatus", IEEE Trans. Ins. Vol. 9, No. 4, pp. 1214-1218, 1974
3. H. Howells, E. T. Norton, "Detection of Partial Discharge in Transformers using Acoustic Emission Techniques", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-79, No. 5, pp. 1538-48, 1978
4. R.T. Harrold, T. W. Dakin, "Ultrasonic Sensing of Partial Discharges within Microfrad Value AC Capacitors", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 2, pp. 444-8, 1979