

에폭시수지의 트리잉 열화에 따른 초음파신호 특성

Ultrasonic Singnal Characteristics due to Treeing Deterioration in Epoxy Resin

이상우*[○], 김인식[◇], 김충년[○], 이광식[○], 이동인[○]

Sang-Woo Lee*[○], In-Sik Kim[◇], Chung-Nyun Kim[○], Kwang-Sik Lee[○], Dong-In Lee[○]

○ School of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University,

◇ Dept. of Electrical Eng., Kyungil University

1. 서 론

에폭시는 기계적강도가 높고 전기적절연성능이 우수할 뿐만아니라 성형이 비교적 용이하므로 고전압용 절연재료로 널리 사용되고있다. 에폭시수지를 전기절연재료로 사용할 경우 전극과 일체형으로 제작되고 있으므로 재료의 성형이나 기기의 제작시에 이물(異物)이 혼입되거나 미소보이드(void) 또는 절연물의 탄성소성변형(elasto-plastic deformation)과 미세적인 크랙(microscopic crack) 등이 발생할 수 있으며, 따라서 고전압이 인가된 고체절연물에 보이드 등이 존재하면 유전율의 차이에 의해 보이드 내부에 전계는 집중되므로 부분방전이 발생되고 절연재료는 트리(tree)형태로 열화되어 절연파괴에 이른다. 그러므로 고분자 절연재료의 트리잉과 파괴(treeing breakdown)특성은 절연성능과 절연수명에 매우 중요한 영향을 미치는 전구파괴현상(prebreakdown phenomenon)이므로 트리의 발생 및 성장에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다.^{1)~2)} 그리고 트리잉과파괴특성은 심한 불평등 전극구조에서 국부적인 고전계에 의해 발생되며, 트리가 발생되면 시료의 일부분을 수 [μm] 정도의 극히 미세한 공동을 형성시키고 그 공동내부에 부분방전이 계속 발생하면 트리는 대향전극을 향해 성장하게 되고, 트리의 진전특성은 트리내부에서 발생하는 코로나스트리머에 의해 많은 영향을 받는 것으로 생각 할 수 있다.

· 고전압기기에서 부분방전이 발생하면 반드시 방전음이 수반되고, 이러한 방전음을 효과적으로 검출하기 위해 초음파센서가 사용되고 있으며, 초음파센서를 사용하여 전력용 유입변압기 또는 커패시터 내부에서 발생하는 부분방전을 비교적 정확히 검출 할 수 있다는 연구보고가 최근 많이 발표되고 있다.^{3)~4)}

그러나 몰드형 전력변압기와 같은 전력기기에서는 고체절연물이 사용되므로, 이러한 절연매질에서는 트리잉과파괴가 가장 심각한 문제가 되고 트리의 발생 및 성장에 따른 초음파신호검출에 관한 연구는 매우 미흡한 상태이므로 연구의 필요성이 대두되고 있다.⁵⁾

따라서 본 연구에서는 침대 평판전극을 사용하여 초음파센서를 평판전극 하부에 취부하고

고체절연물인 에폭시수지의 시료에 교류전압 16[kV] 및 20[kV], 60[Hz]를 인가하여 트리잉열화(Treeing Deterioration)과정을 통하여 열화시간에 따른 트리진전, 부분방전전하량, 초음파신호의 크기 및 펄스 등을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시편제작

본 실험에 사용된 시료는 고온경화용 주형수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형 에폭시수지(Araldite B41 HT 903)와 가사시간이 길고 반응시 발열량이 적은 산무수물계통의 경화제인 Methpa(Cyba Geigy Co, Swiss)를 사용하였다.

시편 제작시 에폭시수지는 접착력이 매우 강하므로 이형을 용이하게 하기 위하여 에폭시수지와 반응하지 않는 glass 제품을 사용하였다.

시료제작은 2시간 30분 동안 130[$^{\circ}\text{C}$]로 가열하고, 30분동안 에폭시수제와 경화제를 1 : 1로 혼합 주입하고 13시간동안 경화한후 시간당 4[$^{\circ}\text{C}$]의 비율로 실온까지 냉각하여 제작하였다. 그림1은 본 실험에 사용한 침전극 및 시료의 형상을 나타낸 것이다. 그리고 침전극은 직경4.0[mm], 길이200.0[mm]이며, 재질은 stainless steel 이고, 침의 선단각은 약30도 선단곡률반경은 약 10[μm]가 되도록 연마하였다. 침전극으로 사용된 바늘은 에폭시를 성형하기 위해 경화전에 삽입하였으며 경화후에 다시 침전극을 빼어 침전극 선단에 길이1.0[mm]인 인공 void를 만들었다. 시료의 하단에는 직경100[mm]인 황동제의 평판전극을 설치하였다.

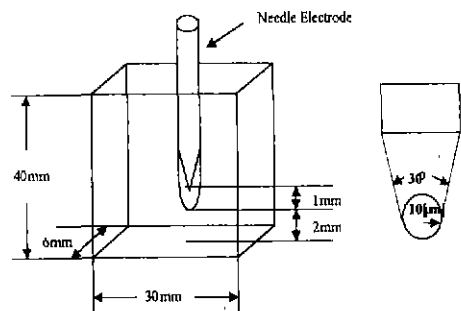


그림 1. 시료 및 전극의 형상

Fig. 1. Cross-section of Sample and Electrode

침전극선단과 평판전극거리는 3[mm]로 하였으며, 실험은 상온22~30[℃], 습도50~70[%]의 실온에서 하였으며 고전압 인가시 시료표면으로 침락현상이 발생되지 않게 하기 위해 실리콘오일(silicon oil)에 함침 시켰으며, 이를 위해 평판전극에 직경70[mm], 높이80[mm]인 틀을 설치하였다.

2.2 실험장치 및 방법

본 실험장치에 대한 블록선도는 그림2에 나타내었다. 시료내부의 음향신호를 효과적으로 검출하기 위해 초음파센서는 스프링을 이용하여 평판전극 하부에 설치하였으며, 초음파센서는 압전변환소자로서 일본Murata사의 MA200A1이고, 공진주파수는 200[kHz]이다. 압전소자와 평판전극사이에는 두께2[mm]인 플라스틱판을 삽입시켜 절연하였다.

음향의 원신호는 매우 미약하므로 80[dB]의 이득을 갖는 전치증폭기(pre-amplifier)로 증폭하고 기계적진동 등에 의한 외부 노이즈를 제거하기 위해 차단주파수 150[kHz]인 고역통과능동필터(high-pass filter)를 사용하였다. 고역통과능동필터를 거친 신호는 신호의 레벨이 낮으므로 주증폭기(main-amplifier)를 사용하였다.

주증폭기는 3단 증폭하여 가변저항으로 이득을 적절히 조절 할 수 있도록 하였으며, 전치증폭기에서 신호와 함께 증폭된 잡음과 외부진동 등에 의한 잡음을 제거하기 위해 차단주파수 150[kHz]인 고역통과능동필터를 사용하였다. 그리고 주증폭기를 거친 전기신호는 문턱레벨1.0[V], 게이트신호1.0[s]인 카운터회로에 전송되도록 하였다. 그리고 부분방전시 초음파신호를 관찰하기 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하였으며, 시료내의 트리관찰은 CCD카메라를 설치하여 진행과정을 모니터에서 관찰하고 녹화하였다. 고전압발생장치는 입력전압 220[V], 60[Hz], 최대출력전압 30[kV]인 Corona detecting apparatus system set.을 사용하였다,

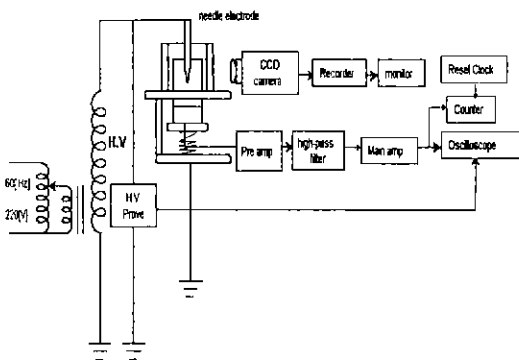


그림 2. 실험장치의 블록선도

Fig. 2. Block Diagram of Experimental Set-up

교류인가전압은 16[kV] 및 20[kV]로 하였으며, 전압인가방식은 승압속도 1.0[kV/s]로 16[kV] 또는 20[kV]까지 전압을 인가한후 파피시까지 일정하게 유지하였다. 인가전압을 정밀하게 측정하기 위하여 분압비가 2000:1인 고압프로브(High Voltage Probe, type: EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열화시간에 따른 부분방전전하량과 트리의 진전 특성

그림3, 그림4는 교류전압 16[kV] 및 20[kV] 인가시 열화시간에 따른 방전전하량 q [pC]와 트리길이 L [mm]을 측정하였다. 그림3과 그림4에서 트리길이는 열화초기 5분경에 급격히 증가되었다가 완만한 진전으로 증가를 보이다가 파피달기 그림3은 44분 그림4는 26분에 급속히 증가하여 파피에 이른다. 그리고 방전전하량과 트리길이는 그림3의 열화시간 10~15분경, 그림4의 열화시간 10~17분경에 거의 일치하나 다른 열화시간에는 일치하지 않으므로 절연파괴예지 적용에는 가능성이 적다고 사료되며 트리진전에 따라 방전전하량은 열화초기 영역에서는 급격한 증가를 하고 열화중기 영역에서는 증감을 되풀이하여 발생되며 열화말기 영역에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 이처럼 열화초기의 급격한 증가는 가지형 트리진전으로 증가하지만 열화중기에 가지형 트리진전 폭이 점진적으로 증가하므로 증감을 되풀이하고 열화말기에는 트리관내에 주채널의 확립과 열화면적의 확대로 급격한 방전전하량이 증가하여 파피에 이른다. 그림3과 그림4에서 인가전압이 높을수록 트리축의 진전은 둔화되었지만 방전전하량은 열화시간 및 트리길이에 비해 증가함으로써 트리채널 내부에서 많은 부분방전이 발생하고 있음을 알 수 있다.

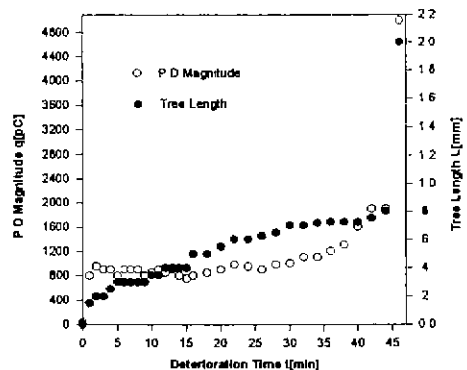


그림 3. 열화시간에 따른 q 및 L 특성 (16[kV])

Fig. 3 q and L Characteristic with Deterioration

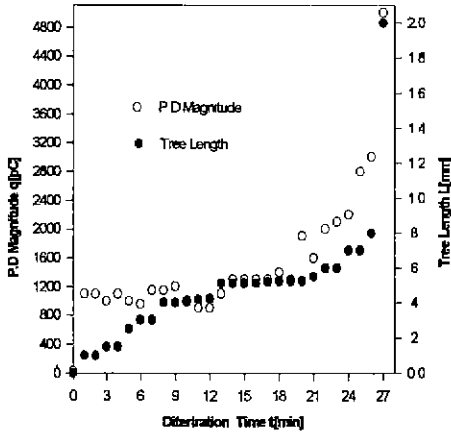


그림 4. 열화시간에 따른 q 및 L 특성 (20[kV])
Fig. 4. q and L Characteristic with Deterioration

3.2 열화시간에 따른 트리 진전 및 초음파 펄스수 특성

그림5, 그림6은 교류전압 16[kV] 및 20[kV] 인가시 열화시간에 따른 전극 축방향 트리길이 L[mm] 및 초음파신호펄스수 Nu[EA]를 측정 한 것이다. 초음파신호펄스수는 트리진전에서 파피에 가까워짐에 따라 커지고 있는데 트리채널이 평판전극에 가까워 질수록 트리채널 내부의 방전활동이 격렬해지고 있음을 알 수 있다. 그리고 인가전압이 높을수록 축방향의 트리진전이 억제되고 있으므로 초음파신호펄스수도 변화를 보이고 있다.

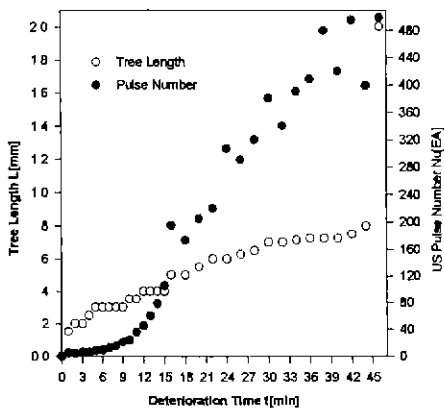


그림 5. 열화시간에 따른 L 및 Nu 특성(16[kV])
Fig. 5. L and Nu Characteristic with Deterioration

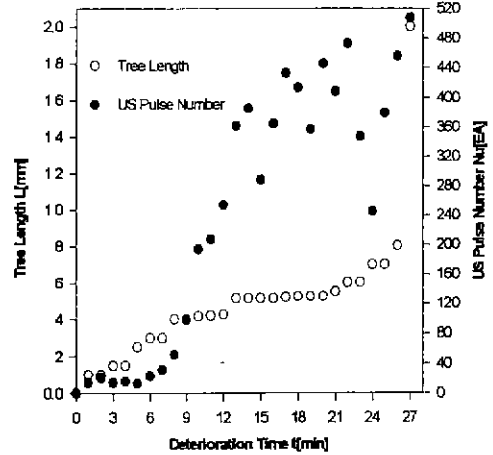


그림 6. 열화시간에 따른 L 및 Nu 특성(20[kV])
Fig. 6. L and Nu Characteristic with Deterioration

3.3 열화시간에 따른 초음파신호 및 방전전하량 피크-피크치 특성

그림7, 그림8은 교류인가전압 16[kV] 및 20[kV] 인가시 트리길이에 따른 초음파신호 피크-피크치 P[mv] 및 방전전하량 피크-피크치 Vd[v]를 측정 한 것이다. 축방향의 트리길이가 성장함에 따라 초음파신호 및 방전전하량 피크-피크치가 증가하였다.

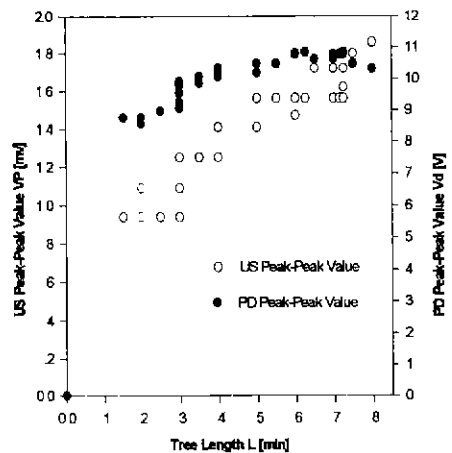


그림 7. 열화시간에 따른 VP 및 Vd 특성(16[kV])
Fig. 7. VP and Vd Characteristic with Deterioration(16[kV])

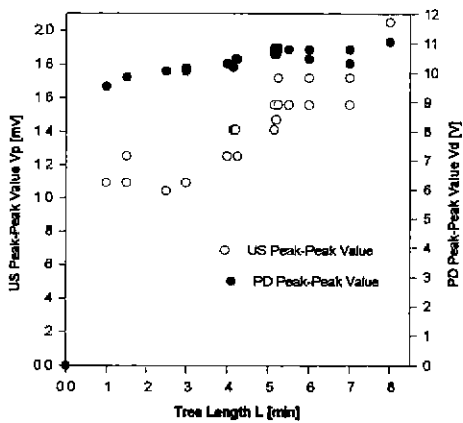


그림8. 열화시간에 따른 VP 및 Vd 특성(20[kV])
Fig. 8. VP and Vd Characteristic with Deterioration(20[kV])

3.4 초음파신호 파형

그림9는 초음파신호 피크-피크치를 측정한 것이다. (a) 1.0[v], (b) 2.3[v], (c) 3.4[v] 일 때 각각 측정된 것이다.

열화시간에 따른 초음파신호 진폭 피크-피크치는 트리진전과 함께 증가 함을 알 수 있다.

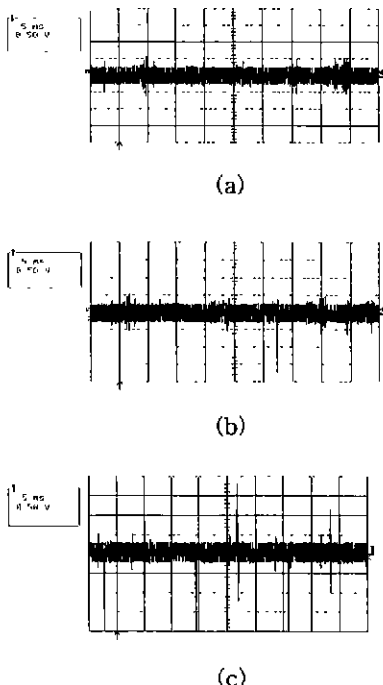
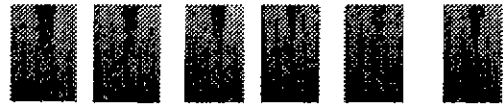


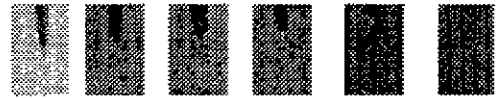
그림 9. 대표적인 초음파신호
Fig. 9. Typical Ultrasonic Signal Waveforms

3.5 열화시간에 따른 전기트리

사진1과 사진2는 교류인가전압 16[kV] 및 20[kV] 인가시 트리진전과정을 사진으로 나타내었다.



6분 16분 20분 26분 30분 35분
사진 1. 전압 16[kV] 인가시 트리의 진전과정



3분 16분 19분 21분 24분 26분
사진 2. 전압 20[kV] 인가시 트리의 진전과정

4. 결 론

본 연구에서는 공진주파수 200[kHz]인 초음파센서를 사용하여 에폭시수지에 교류전압 16[kV] 및 20[kV]을 인가한 경우 트리열화과정을 통하여 부분방전전하량, 초음파신호의 크기 및 펄스수 등의 관계를 조사하였다.

트리의 진전에 따라 부분방전전하량은 열화초기의 급격한 증가는 나무가지형 트리진전으로 증가하지만 열화중기에 나무가지형 트리의 폭이 점진적으로 증가하므로 방전전하량이 증감하고 열화말기 관내의 주 채널의 확립과 열화면적의 확대로 증가하고 있다. 그리고 초음파신호펄스수는 파괴에 가까워짐에 따라 증가하며 트리채널이 평판전극에 가까워질수록 트리채널 내부의 방전활동이 격렬해지고 있으며 인가전압이 높을수록 축방향의 트리진전이 억제되고 초음파신호 펄스수도 변화되고 초음파신호 피크-피크치도 트리진전과 함께 증가함을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용함으로써 트리의 발생위치 및 크기를 추정 할 수 있으므로 고체절연물의 트리에 의한 절연열화진단의 기초자료로 이용가능하다.

참고문헌

1. Y. Shibuya, S. Zoledziowski, "Void Formation and Electrical Breakdown in Epoxy Resin" IEEE Trans. on PAS, Vol P AS-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
5. Y. Kagawa, S. Yamazaki, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials" IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-17, No. 4, pp. 314-8, 1982