Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 13, No.3, pp. 73~81 August 1999 [논문 : 13-3-11]

초음파를 이용한 에폭시 몰드변압기의 열화 진단

(Deterioration Diagnosis of Epoxy Mold-type Transformer Using Ultrasonic Waves)

이상우* · 김인식** · 이동인*** · 이광식*** · 이동희****

(Sang-Woo Lee · In-Sik Kim · Dong-In Lee · Kwang-Sik Lee · Dong-Hee Rhie)

요 약

본 연구는 초음파 측정법을 사용하여 부분방전에 의한 에폭시 몰드형 전력변압기의 열화상태를 진단하기 위해 에폭시수지의 트리 진전에 따른 초음파신호를 분석하였으며, 또한 열화시간에 따른 트리 길이, 방전전하량 및 초음파 펄스수의 특성을 조사하였다.

실험 결과, 에폭시수지에서 발생된 트리는 수지형이며, 인가전압 16[kV]에 대한 트리 길이 및 트리 폭의 평균성장률은 각각 0.014 및 0.026[mm/min]이였으며, 20[kV]의 경우 이들 값은 각각 0.032 및 0.063[mm/min]으로 더욱 증가된 것으로 나타났다. 열화중기 이후 트리가 성장함에 따라 초음파 펄스수 및 부분방전 전하량은 급격히 증가된 것으로 나타났다. 그리고 초음파 펄스수는 방전전하량에 비례하여 증가되었다.

또한 몰드형 전력변압기의 초음파 측정시 기본 데이터를 얻기 위해 초음파 발진 및 수신장치를 사용하여 에폭시수지에 대한 초음파신호의 감쇄, 시간지연 및 지향특성도 조사하였다.

Abstract

Measurements of ultrasonic signals caused by partial discharges were performed by using an ultrasonic measurement technique to diagnose the electrical treeing deterioration in an epoxy mold-type power transformer. We also examined the characteristics of tree growth, partial discharge magnitude and ultrasonic pulse number with the increase of the deterioration time.

From these results, it was found that the shape of the tree was a branch-type, and the rates of the tree growth were examined when ac voltages of 16[kV] and 20[kV] were applied. Ultrasonic pulse number and discharge magnitude were rapidly increased as the length of the tree grows after the middle stage of the deterioration time, and it appeared that ultrasonic pulse number was proportional to discharge magnitude.

Attenuation, time-delaying and directivity characteristics of ultrasonic signals propagated into epoxy resin by using ultrasonic oscillation and receiving systems are also reported as a basic data of ultrasonic measurements in mold-type power transformer.

Key Words : Deterioration diagnosis, Partial discharge, Treeing breakdown, Ultrasonic signal

* 정회원 : 영남대 공대 전기전자공학부 박사과정 수료
** 정회원 : 경일대학교 전기공학과 교수
*** 정회원 : 영남대 공대 전기전자공학부 교수
**** 정회원 : 수원대 공대 전기전자공학부 부교수
접수일자 : 1999년 4월 29일

1. 서 론

현재 몰드형 변압기에서는 절연물로서 에폭시수지가 가장 많이 사용되고 있다. 에폭시수지는 기계적 강도가 높고, 전기적 절연특성이 우수할 뿐만 아니라 성형이 비교적 용이하므로 오늘날 고전압용 절연재료로서 널리 사용되고 있다.[1~2]

에폭시수지를 전기절연물로서 사용할 경우 도체인 전극과 일체형으로 제작되므로 재료의 성형 또는 기기의 제작시, 이물(異物)이 혼입되거나 미소 보이드(void) 또는 균열 등이 발생될 수 있다. 그러므로 고전압이 인가된 고체 절연물내에 보이드 등이 존재하면 유전율의 차이에 의해 보이드 내부에서 전계는 집중되어 부분방전이 발생되고, 절연재료는 트리(tree)의 형태로 열화 되어 결국 절연파괴에 이르게 된다. 따라서 고분자 절연재료의 트리잉파괴(treeing breakdown)특성은 절연성능과 기기의 수명에 매우 중요한 영향을 미치고 있으므로 트리의 발생 및 성장에 관한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다.[3~4]

절연진단시 초음파 측정법이 주목받게된 이유는 측정장치가 비교적 간단하여 현장적용에 용이하고, 전기적인 측정법과 상호간섭을 일으키지 않는 장점이 있기 때문이다.[5] 전력용 유입 변압기에서 초음파센서를 사용하여 내부 부분방전을 검출하기 위한 연구는 최근 많이 발표되고 있다.[6~7] 그러나 몰드형 전력변압기에서는 절연유 대신 에폭시수지를 사용하므로 절연열화는 트리잉파괴에 의해 일어나고 있다. 그러므로 에폭시수지에 대한 트리 발생 및 성장에 따른 초음파신호의 검출에 관한 연구는 국내뿐만 아니라 외국에서도 거의 발표되고 있지 않으므로 연구의 필요성을 느낀다.

따라서 본 연구에서는 초음파 측정법에 의한 에폭시 몰드형 변압기의 열화상태를 진단하기 위해 에폭시수지의 시료에 상용주파수 교류전압을 인가하였을 때, 트리의 진전 특성과 열화시간에 따른 방전전하량 및 초음파신호의 크기 등을 조사하였다. 초음파신호의 크기는 정량적인 측정이 요구되므로 본 연구에서는 초음파 펄스 계수 회로를 사용하여 검출하였다. 또한 에폭시 몰드형 변압기의 초음파 측정시 기본데이터를 얻기 위해 초음파 송신 및 수신장치를 이용하여 에폭시수지에 대한 초음파 전달특성, 즉 감쇄, 지향 및 시간지연 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시편제작

본 실험에서 사용된 에폭시수지는 고온경화용 주형수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형(Bisphenol-A type, Ciba-Geigy Co.) 에폭시수지이며, 경화제는 가사시간이 길고 반응시 발열량이 적은 산무수물 계통의 MeTHPA(Methly Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였다.

그림1은 시료의 제작공정을 나타낸 것이다. 에폭시수지를 2.5[hr]동안 130[℃]까지 가열하고, 0.5[hr]동안 에폭시 주재와 경화제를 1:1로 혼합하여 주입하고, 13[hr]동안 경화 후 시간당 약30[℃]의 비율로 실온까지 냉각하여 제작하였다.

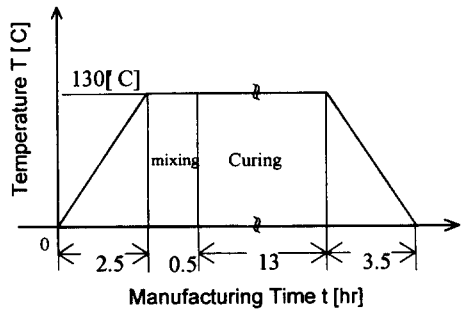


그림 1. 시료의 제작 공정
Fig. 1. Manufacturing Process of Sample

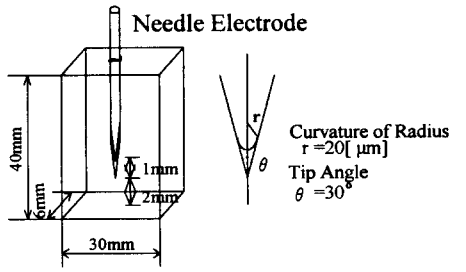


그림 2. 시료 및 침전극의 형상
Fig. 2. Configuration of Sample and Needle Electrode

그림2는 사용된 침전극 및 시료의 형상을 나타낸 것이다. 침전극은 직경 4.0[㎜]인 스테인레스강(stainless steel)을 사용하였으며, 침의 선단각은 약

30도, 선단곡율반경은 약20[㎛]가 되도록 연마하였다. 침전극은 에폭시수지가 경화되기 전에 미리 삽입하였으며, 경화 후에 침전극을 빼어 길이 1.0[mm]의 인공 보이드를 만들었다. 침전극 선단과 평판전극의 거리는 3.0[㎜]로 하였으며, 시료의 크기는 30*40*6[㎜]이고, 시료의 하단에는 직경 100.0[㎜], 두께 2.0[mm]인 황동제의 평판전극을 설치하였다.

상용주파수 교류전압 16[kV] 및 20[kV] 인가시 시료 표면에서 섬락현상을 방지하기 위해 시료는 실리콘 오일(silicon oil)에 함침하였다.

2.2 실험장치 및 방법

본 실험장치에 대한 블록선도는 그림3에 나타내었다. 시료내부의 음향신호를 효과적으로 검출하기 위한 초음파센서는 스프링을 사용하여 평판전극 하부에 설치하였다. 초음파센서는 공진 주파수 200[㎑]인 압전변환소자를 사용하였다. 압전소자와 평판전극사이에는 두께2[mm]인 플라스틱판을 삽입시켜 절연하였다.

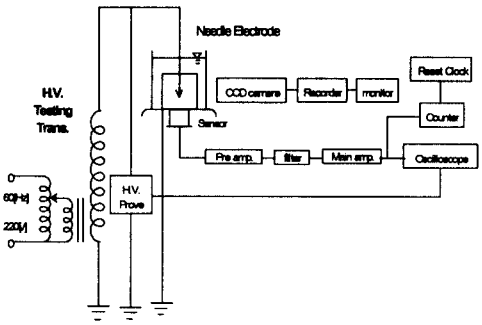


그림 3. 실험장치의 블록선도
Fig. 3. Block Diagram of Experimental Set-up

초음파신호의 수신회로는 전치증폭기, 고역통과필터 및 주 증폭기로서 구성하였다.

여기서 전치증폭기(pre-amplifier)는 40[dB]의 이득(gain)을 갖도록 설계하였다. 기계적 진동 등에 의한 외부 노이즈를 제거하기 위해 차단주파수 150[㎑]인 고역통과필터(high-pass filter)를 사용하였다. 그리고 주 증폭기(main-amplifier)는 60[[dB]의 이득을 갖도록 설계하였으나, 가변저항을 사용하여 이득을 적절히 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 주 증폭기를 거친 전기신호는 문턱레벨 1.0[V], 게이트신호 1.0[s]인 카운터회로에 전송되도록 하였다.

부분방전 전류펄스는 평판전극과 접지사이에 측정용 무 유도저항 10[kΩ]을 통하여 관측하였다. 부분방전에 의한 초음파신호를 관찰하기 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하였다. 트리의 진행상태는 배율 35인 디지털 카메라(CCD camera)에서 실시간 녹화된 화면을 통하여 분석할 수 있었다. 시료내부의 트리는 배율 80인 광학현미경을 사용하여 촬영하였다.

상용주파수 교류인가전압은 16[kV] 및 20[kV]로 하였으며, 전압인가방식은 승압속도 1.0[kV/s]로 16[kV] 또는 20[kV]까지 전압을 인가한 후 절연파괴까지 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 에폭시수지의 초음파신호 감쇄 특성

그림4는 에폭시수지의 두께(d) 변화에 따른 초음파신호 감쇄 특성을 나타낸 것이다. 여기서 센서출력전압은 최대진폭값을 나타낸 것이다.

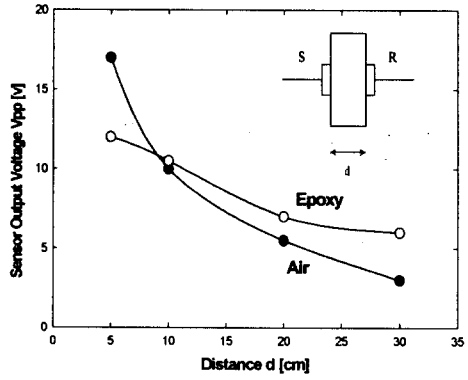


그림 4. 에폭시수지의 음압 감쇄 특성
Fig. 4. Ultrasonic Attenuation Characteristics in Epoxy Resin

여기서 초음파 발진기의 송신출력전압은 Vpp=15[V]로서 일정하게 유지하고, 송수신 초음파센서의 이격거리(d)를 변화시켰을 때 초음파 수신회로의 출력전압 Vpp[V]로 나타낸 것이다. 에폭시수지의 두께(d)는 5~30[㎝]이다.

본 실험에서 전파거리 30[㎝]인 음압레벨은 5[㎝] 떨어진 음압레벨에 비해 공기중은 15.3[dB], 에폭시수

지에서는 5.0[dB] 감소된 것으로 나타났다. 이것은 에폭시수지가 공기보다 음향임피이던스가 높으므로 에폭시수지의 음향임피던스는 송수신용 초음파센서에 부착된 정합용 플라스틱의 음향 임피이던스 값에 가깝게되어 경계면에서 반사작용이 적어지기 때문에 음향신호인 파동에너지는 에폭시수지에서 용이하게 전파되는 것으로 생각된다.

3.2 에폭시수지의 초음파 지향특성

그림5는 에폭시수지에 대한 초음파의 지향 특성을 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 에폭시수지의 두께는 10[㎝]이며, 시료 양단의 축 방향에 대한 각θ가 증가할수록 초음파신호는 감소되는 것으로 나타났다.

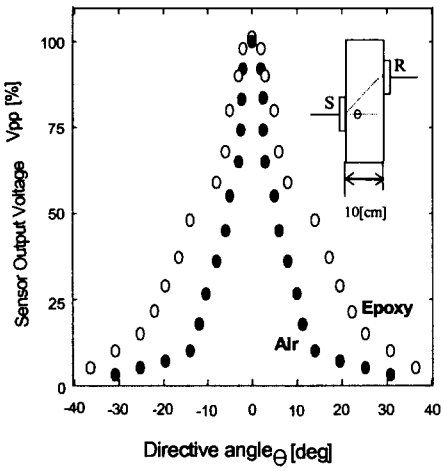


그림 5. 에폭시수지의 초음파 지향 특성
Fig. 5. Ultrasonic Directivity Characteristics in Epoxy Resin

본 실험에서 200[㎑] 초음파에 대한 에폭시수지의 반감각(2θ)은 약 26도인 것으로 나타났으며, 공기중에서 측정한 값 약 7도보다 매우 큰 값으로 나타났다. 이것은 에폭시수지가 공기에 비해 입자간의 결합력이 크므로 입자진동시 에폭시수지는 종파 외에 횡파로 전달되는 음향신호가 있으므로 초음파신호는 광범위하게 전파되는 것으로 생각된다.

3.3 에폭시수지의 초음파신호 시간지연 특성

대부분의 물질에 대해 초음파의 전파속도는 잘 알려져 있으며, 상온 및 상기압에서 공기의 전파속도는 약 343.5[m/s]이다. 액체인 절연유의 전파속도는 약 1,480[m/s]으로 증가되고, 고체인 폴리에틸렌은 약 2,000[m/s], 에폭시수지는 약 2,700[m/s]으로 더욱 증가되는 것으로 보고되고 있다.[8]

그림6은 초음파신호의 시간지연 특성을 오실로스코프에 의해 측정한 것이다. 여기에서 상부 파형은 초음파 발신장치에 인가된 주기 16[㎳], 폭50[㎲]인 구형파 펄스를 나타낸 것이고, 하부 파형은 공진 주파수 200[㎑]인 초음파센서를 사용하여 에폭시수지의 두께 5[㎝]인 시료에서 측정한 초음파신호 파형이다.

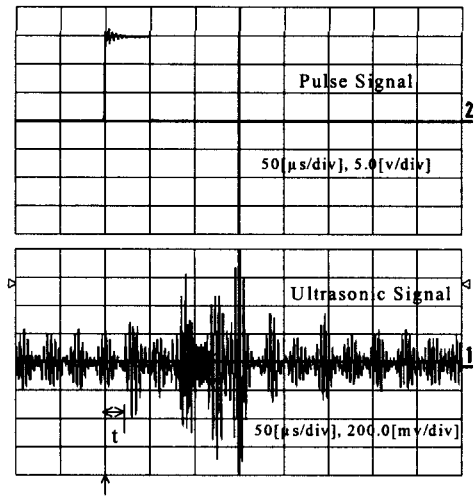


그림 6. 에폭시수지에 대한 펄스 및 초음파신호 파형
Fig. 6. Waveforms of Ultrasonic and Pulse Signal in Epoxy Resin

초음파신호는 고주파 밴드의 형태로서 오실로스코프 화면상에 나타나고 있으며, 구형파 펄스 보다 일정시간 t에 의해 지연되어 있다. 여기에서 지연시간 t는 약 20[㎲]로 측정되었으며, 발생 점까지의 계산거리는 5.4[㎝]이다. 따라서 매질의 전파속도를 알고, 초음파신호의 시간지연을 측정하므로써 음원까지의 거리는 용이하게 계산될 수 있다.

3.4 열화시간에 따른 트리의 성장 특성

그림7은 교류전압 20[kV]을 인가하였을 때, 열화시간에 따른 트리의 진전 특성을 나타낸 것이다. 여기서 트리의 길이(L)는 전극 축 방향으로 진전하는 트리의 최대길이를 나타내고 있다. 그림7과 같이 트리

의 길이는 열화시간에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 시료A 및 B에 대한 트리의 진전 특성은 열화초기(전압인가 후 5~10분까지)에 비교적 빠르게 진전하였으며, 그후에는 열화시간에 비례하여 점진적으로 성장하였다. 열화말기에서 트리는 매우 급격히 진전되어 곧 절연파괴가 발생되었다. 따라서 에폭시 수지에 대한 트리의 성장 특성은 인공 보이드의 길이와 시료의 재질이 같은 경우에는 거의 동일한 성장 특성으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 본 실험에서는 평균치를 기준 데이터로 사용하였다.

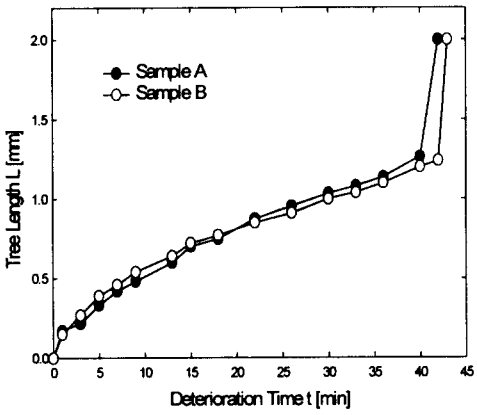


그림 7. 각종 시료에 대한 트리의 성장 특성
Fig. 7. Relation between Tree Length and Deterioration Time

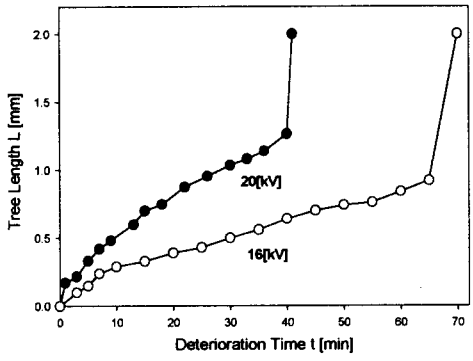


그림 8. 열화시간에 따른 트리 길이의 진전특성
Fig. 8. Relation between Tree Length and Deterioration Time

그림8은 교류전압 16[kV] 및 20[kV]을 인가하였을 때, 열화시간에 따른 트리 길이의 진전 특성을 나타낸 것이다. 그림과 같이 전압이 높을수록 트리의 성장률은 증가하였으며, 트리에 의해 절연파괴가 발생하는 시간도 단축되고 있음을 알 수 있다.

16[kV]인 경우 트리의 평균 성장률은 0.014 [mm/min]이며, 20[kV]인 경우에는 0.032[mm/min]으로 증가된 것으로 나타났다. 또한 20[kV]을 인가한 경우의 절연파괴까지의 시간은 16[kV]에 비해 약 42% 단축된 것으로 나타났다.

그림9는 열화시간에 따른 트리 폭의 진전 특성을 나타낸 것이다. 전 영역에 걸친 평균 성장률은 인가전압 16[kV] 및 20[kV]인 경우 각각 약 0.026[mm/min] 및 0.063[mm/min]이므로 전압이 높을수록 트리 폭의 성장은 활발한 것을 알 수 있다. 이것은 인가전압이 상승할수록 트리 채널 내부에서 방전에너지의 강도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

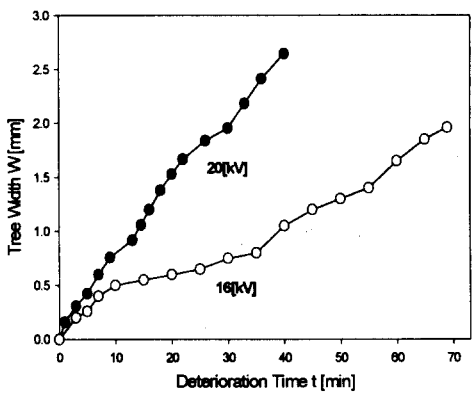
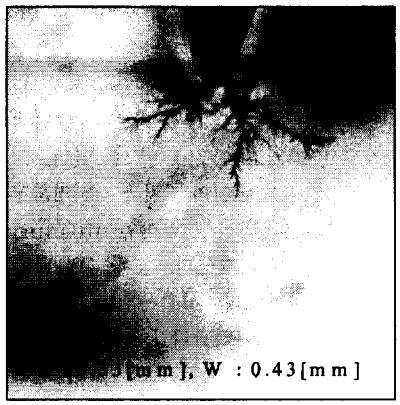


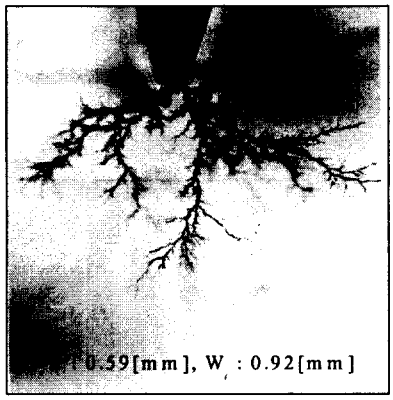
그림 9. 열화시간에 따른 트리 폭의 진전 특성
Fig. 9. Relation between Tree Width and Deterioration Time

그림10은 20[kV]의 교류전압을 인가하였을 때, 열화시간에 따른 대표적인 트리의 진전 형상을 나타낸 것이다. 발생된 트리의 형태는 수지형(branch type)이며, 많은 분기가 방사상으로 성장된 모습을 나타내고 있다.

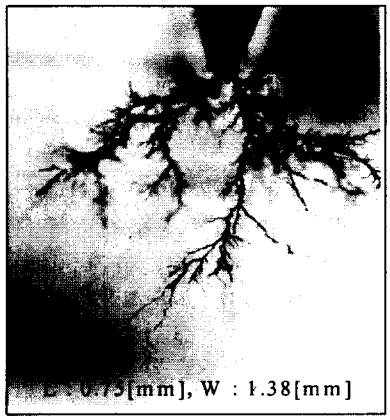
열화시간 5분, 13분, 18분 및 30분일 때 트리 길이에 대한 트리 폭의 비율은 각각 130%, 155%, 184% 및 190%인 것으로 나타났다.



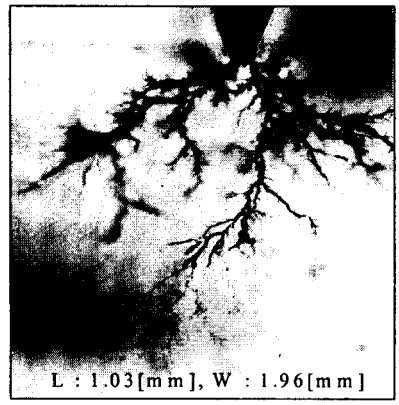
(a) 5분



(b) 13분



(c) 18분



(d) 30분

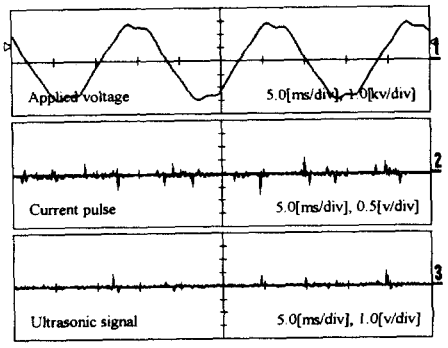
그림 10. 트리 진전 사진
Fig. 10. Microscopic Photos of Tree Growth

3.5 트리 성장에 따른 초음파신호 특성

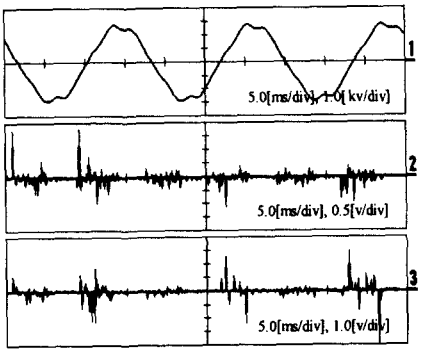
그림11은 에폭시수지의 시료에 교류전압 20[kV]을 인가하였을 때, 열화시간에 따른 부분방전 전류펄스 및 초음파신호 파형을 나타낸 것이다. 여기서 채널1은 인가전압, 채널2는 부분방전 전류펄스, 채널3은 초음파신호 파형이다.

그림11(a)와 같이 열화초기(5분)의 부분방전 전류펄스는 인가전압의 상승 및 하강 부분에서 규칙적으로 발생하고 있으며, 그 크기도 거의 동일하게 나타나고 있다. 그러나 그림11(b)와 같이 열화말기(30분)에서는 인가전압의 상승 및 하강 부분에서 부분방전 전류펄스의 발생영역이 증가되고 있으며, 트리 채널 내부의 방전에너지의 증가로 인해 전류펄스의 크기도 열화초기에 비해 매우 큰 것으로 나타났다.

초음파신호의 경우 그림11(a)와 같이 열화초기(5분)에서는 부분방전 전류펄스의 발생 위치 부근에서 미약한 초음파신호가 검출되고 있으나, 트리가 진전하여 부분방전 전류펄스의 크기가 증가함에 따라 초음파신호의 크기도 증가되는 것으로 나타났다. 그림11(b)와 같이 열화말기(30분)에서는 초음파신호의 발생영역은 열화초기에 비해 확대되었으며, 초음파신호의 크기도 부분방전 전류펄스에 비례하여 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 인가전압의 하강부분 보다 상승부분에서 더 큰 초음파신호가 검출되는 것으로 나타났다.



(a) 5분



(b) 30분

그림 11. 열화시간에 따른 전류펄스 및 초음파신호 파형

Fig. 11. Waveforms of Current Pulse and Ultrasonic Signal with Deterioration Time

에폭시수지의 트리 발생은 인공 보이드 내부에서 기중방전에 의한 높은 방전에너지가 에폭시 절연물에 작용하여 트리가 진전하는 것으로 생각되고 있으나, 트리의 발생 메카니즘은 아직 명확히 구명되어 있지 않다. 그러나 트리의 진전은 트리 채널 내부에서 발생되는 코로나 스트리머에 의해 많은 영향을 받는 것으로 생각된다.

3.6 열화시간에 따른 부분방전의 전하량 특성

그림12는 교류전압 16[kV] 인가시 열화시간에 따른 방전전하량(q) 및 트리 길이(L)를 나타낸 것이다. 열화시간이 경과함에 따라 부분방전에 의한 방전전하량은 열화시간 t에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 그림12의 16[kV]인 경우 열화시간이 경과함에 따라 열화초기 약 20분까지의 방전전하량은 1.0[pC/min]의 비율로 상승하였으나, 그 후 절연파괴까지는 3.0[pC/min]의 비율로 크게 증가된 것으로 나타났다. 이와 같이 열화중기 영역에서 트리의 최대길이는 점진적으로 증가한 반면 부분방전의 크기는 비교적 급격하게 증가된 것으로 나타나고 있다. 이는 그림10의 트리 형태에서 나타난바와 같이 열화시간이 경과함에 따라 전극방향의 트리 길이보다 트리 폭의 성장은 더욱 증가되므로 결국 에폭시수지내부의 트리에 의한 열화면적이 확대되기 때문에 방전전하량은 증가되는 것으로 생각된다. 따라서 트리 채널 내부에서 많은 부분방전이 발생하고 있음을 알 수 있다.

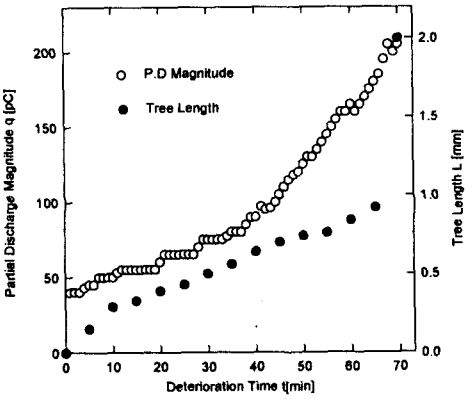


그림 12. 열화시간에 따른 방전전하량 특성(16[KV])

Fig. 12. Relation between Discharge Magnitude and Deterioration Time(16[KV])

3.7 열화시간에 따른 초음파 펄스 수의 특성

그림13은 교류전압 16[kV] 인가시, 열화시간에 따른 초음파신호의 펄스 수(Nu) 및 트리의 최대길이(L)를 나타낸 것이다. 초음파 펄스 수는 열화시간이 경과함에 따라 열화초기는 완만하게 증가하였으나, 열화중기 이후에 급격히 증가된 것으로 나타났다. 그림13과 같이 열화초기의 약 5분에서 초음파 펄스수는 약 50[EA]이였으나, 열화시간이 20분, 40분 및 70분으로 경과함에 따라 초음파 펄스수는 각각 120, 650 및 810[EA]으로 증가된 것으로 나타났다.

이러한 초음파 펄스수의 증가 특성은 그림12에서

나타난 부분방전 전하량(q)의 특성과 유사한 것으로 나타나고 있다. 그러므로 초음파신호의 펄스수는 부분방전 전하량과 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

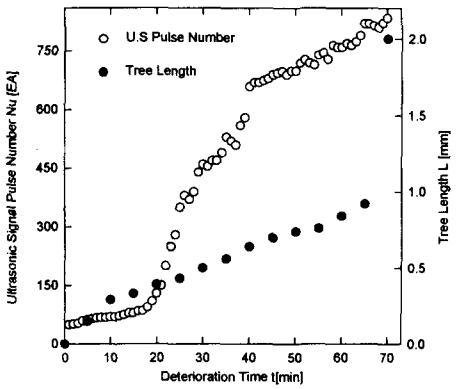


그림 13. 열화시간에 따른 초음파펄스수 특성(16[kV])
Fig. 13. Relation between Ultrasonic Pulse Number and Deterioration Time(16[kV])

3.8 초음파 펄스수, 방전전하량 및 트리 길이의 관계

그림14는 교류전압 16[kV] 및 20[kV]에 대한 초음파 펄스수(Nu)와 방전전하량(q)의 관계를 나타낸 것이다. 그림과 같이 초음파 펄스수는 방전전하량에 비례하여 증가된 것으로 나타났다. 방전전하량이 증가함에 따라 초음파 펄스수의 증가율은 감소된 것으로 나타났다. 방전전하량이 50~80, 80~130 및 130~200[pC]의 범위에서 방전전하량에 대한 초음파 펄스수의 증가율은 각각 5.6, 4.6 및 2.1[EA/pC]으로 나타났다.

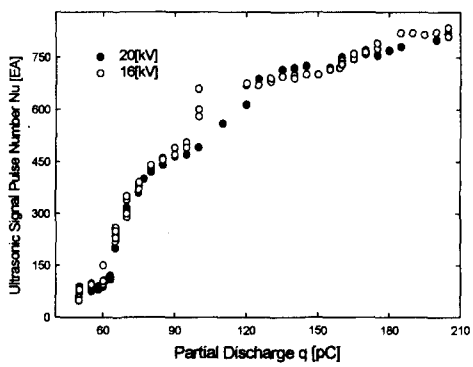


그림 14. 초음파 펄스 수 및 방전전하량의 관계
Fig. 14. Relation between Ultrasonic Pulse Number and Partial Discharge Magnitude

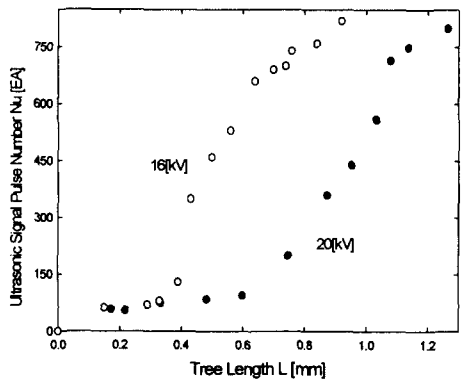


그림 15. 초음파 펄스 수 및 트리 길이의 관계
Fig. 15. Relation between Ultrasonic Pulse Number and Tree Length

그림15은 교류전압 16[kV] 및 20[kV]에 대한 초음파 펄스수(Nu)와 트리 길이(L)의 관계를 나타낸 것이다. 트리의 발생초기에는 트리가 진전함에 따라 초음파 펄스수는 비교적 완만하게 증가하였으나, 트리가 어느 정도 진전하여 열화중기 영역이 되면 초음파 펄스수는 트리의 길이에 비례하여 급격히 증가된 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음파 측정법을 사용하여 부분방전에 의한 에폭시 몰드형 전력변압기의 절연열화를 진단하기 위해 침대 평판전극 배치에서 상용주파수의 교류전압 16[kV] 및 20[kV]을 인가하였을 때, 에폭시수지에 대한 트리 진전에 따른 초음파신호를 분석하였으며, 열화시간에 따른 트리의 길이, 방전전하량 및 초음파 펄스수의 특성을 조사하였다. 또한 몰드형 전력변압기의 초음파 측정시 기본데이터를 얻기 위해 초음파 발진 및 수신장치를 이용하여 에폭시수지에 대한 초음파의 감쇄, 지향 및 시간지연 특성 등을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 에폭시수지에서 초음파신호의 감쇄는 공기중에 비해 작은 것으로 나타났으며, 전파거리 30[cm]인 음압레벨은 5[cm] 떨어진 음압레벨에 비해 공기중은 15.3[dB], 에폭시수지에서는 5.0[dB] 감소된 것으로 나타났다.

(2) 에폭시수지에서 초음파는 공기중에 비해 광범

위로 전파되는 것으로 나타났으며, 200[kHz] 초음파에 대한 에폭시수지의 반감각은 약 26도인 것으로 나타났다.

(3) 두께 5[cm]인 에폭시수지에서 폭 50[μs]인 구형파 펄스신호에 대한 초음파의 전파시간은 약 20[μs]로 측정되었으며, 이로부터 음원까지의 거리를 계산할 수 있었다.

(4) 에폭시수지에서 발생된 트리의 형태는 수지형(branch type)이며, 인가전압 16[kV] 및 20[kV]에 대한 트리 길이(전극 축 방향)의 평균성장률은 각각 0.014 및 0.032[mm/min]이며, 트리 폭(전극 축의 직각방향)의 평균성장률은 각각 0.026 및 0.063[mm/min]인 것으로 나타났다. 20[kV] 인가시 절연파괴까지의 시간은 16[kV]에 비해 약 42[%] 단축된 것으로 나타났다.

(5) 상용주파수의 교류전압 인가시 열화초기는 전압 파형의 상승 및 하강 부분에서 부분방전 전류펄스 및 초음파신호는 거의 동일한 크기로서 규칙적인 형태로 발생되었으나, 열화시간이 경과함에 따라 전류펄스 및 초음파신호의 크기와 발생영역은 확대된 것으로 나타났다.

(6) 열화시간이 경과함에 따라 열화초기의 초음파 펄스수는 비교적 완만하게 증가하였으나, 열화중기 이후에는 급격히 증가된 것으로 나타났다. 16[kV] 인가시 열화초기(0~20분) 영역에서 초음파 펄스수의 증가율은 평균 5.0[EA/min]이였으나, 그 이후에는 14.2[EA/min]로 크게 증가된 것으로 나타났다.

(7) 초음파 펄스수는 방전전하량에 비례하여 증가하였으나, 방전전하량이 증가함에 따라 초음파 펄스수의 증가율은 감소된 것으로 나타났다. 열화초기 초음파 펄스수는 트리가 진전함에 따라 완만하게 증가하였으나, 열화중기 영역 이후는 트리 길이에 비례하여 급격히 증가된 것으로 나타났다.

참고문헌

[1] S. W. Lee, I. S. Kim, K. S. Lee and D. I. Lee, "Ultrasonic Signal Characteristics due to Treeing Deterioration in Epoxy Resin," The 9th Acean Conference on Electrical Discharge, pp. A2-3, 1998

[2] Tomas W. Dakin, "Application of Epoxy Resin in Electrical Apparatus", IEEE Trans. Ins. Vol. 9, No. 4, pp. 1214-1218, 1974.

[3] Y. Shibuya, S. Zoledziowski, "Void Formation and Electrical Breakdown in Epoxy Resin" IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 1, January 1977.

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

[5] R. T. Harrold, "Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics," IEEE Trans. EI, Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.

[6] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, K. Ando, "Basic Studies of Acoustic Emissions Caused by the Partial Discharge in an Oil-Tank", K-J Joint Symp. on ED and HVE, pp.16-19. Oct. 1998

[7] E. Howells and E. T. Norton. "Location of Partial Discharge Sites in On-Line Transformers," IEEE Trans. PAS, Vol. 100, No. 1, pp.158-162, 1981

[8] R. Dukes and E. A. Culpan, "Acoustic Emission : Its Techniques and Applications," IEE Proc., Vol. 131, No. 4, pp.241-251, 1984.

◇ 저자소개 ◇

이 상 우(李相雨)
1967년 4월 11일생. 1992년 경일대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학 산업대학원 졸업(석사). 1997~현재 영남대 공대 전기전자공학부 박사과정 수료. 영남이공대학, 구미[1]대학 강사.

김 인 식(金寅湜)
1953년 10월 3일생. 1974년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1991年 美國 University of Southern California대 초빙교수. 현재 경일대학교 전기공학과 교수.

이 동 인(李東仁)
1936년 10월 19일생. 1959년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1973~1977年 영국 Strathclyde대 대학원 졸업(박사). 1982~1983년 미국 South Carolina대 방문교수. 현재 당 학회 대구 · 경북지회 이사. 영남대 공대 전기전자공학부 교수.

이 광 식(李廣植)
1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology대 초빙교수. 현재 당 학회 부회장. 대한전기학회 방전 · 고전압 연구회 간사장. 영남대 공대 전기전자공학부 교수. 영남대 학생처장

이 동 희(李東熙)
1956년 1월 29일생. 1978년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 수원대 공대 전기전자공학부 부교수.

본 연구는 한국전력공사(기초전력공학공동연구소 주관) 및 1998학년도 영남대학교 학술연구 조성비의 일부 지원에 의해 수행되었음