Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 13, No.4, pp. 68~74 November 1999 〔논문 : 13-4-10〕

음향탐지를 이용한 트리잉의 열화진단을 위한 정량적 분석에 관한 연구

(A Study on Quantitative Analysis for Treeing Deterioration Diagnosis Using Acoustic Detection)

이덕진* · 신성권** · 김재환***
(Deok-Jin Lee · Sung-Kwon Sin · Jae-Hwan Kim)

요 약

본 연구는 고분자재료에서 음향센서를 이용한 부분방전의 음향적 탐지를 행했다. 저밀도 폴리에틸렌에 대한 트리잉파괴 실험에서 음향센서로 얻어진 음향방출 특성의 시간순서대로 측정하여 통계처리를 행했다. 또한 5 가지 특성량을 도입하고 ϕ-AEA-n(위상-음향진폭-펄스수) 패턴을 분석한 결과, 보이드 시료의 AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)과 AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)은 열화 중기, AE펄스수, AE평균최대위상각($\overline{\Theta_{max}}$)은 열화말기를 진단하기 위해서 유용한 음향방출량임을 알 수 있다. 이들 음향방출량은 보이드 시료의 열화진단을 구별하는데 유용한 음향방출량임을 실험결과로부터 얻었다.

Abstract

This paper does acoustic detection of partial discharge using acoustic sensor in polymer. Time sequential measurement of acoustic emission characteristic obtained acoustic sensor deal with statistics process. and 5 characteristic quantities were introduced into this paper. Resulting form analysis of ϕ-AEA-n pattern (phase-acoustic emission amplitude-pulse number) and AE quantities ,it can know useful statistics quantities that AE average inception amplitude ($\overline{AEA_{inc}}$) and AE average maximum amplitude ($\overline{AEA_{max}}$) make diagnosis of the middle stage of deterioration, AE pulse number and AE average maximum phase ($\overline{\Theta_{max}}$) make diagnosis of the last stage of deterioration. it obtained that these AE quantities are useful for diagnosis deterioration form experiment results.

1. 서 론

최근 전력 수요가 나날이 증가에 따라 송전전압의 초고전압화, 각종 전력 1기기의 소형화, 고신뢰성화가 진행됨에 따라 전기절연재료에 대한 절연특성이 엄격하게 요구된다. 절연재료에 보이드(void)나 크랙(crack) 등의 결함이 존재하면 부분방전이 발생하여 전기절연재료를 열화시켜 최종적으로 절연파괴에 이른다.

최근에는 컴퓨터를 이용한 측정 기술은 위상각 정보와 더불어 부분방전 펄스크기(진폭)를 측정을 가능

* 정회원 : 광운대 전기공학과 박사과정
** 정회원 : 동해대학 정보통신과 조교수
*** 정회원 : 광운대 전기공학과 교수
접수일자 : 1999년 7월 15일

하게 하였다.[1,2,3]

또 부분방전으로부터 발생한 신호를 음향센서를 이용한 방법은 이미 전력용 변압기와 같은 전기계통에 부분방전을 탐지하기 위하여 사용되어 왔다[4].

그리고 Kawada, Honda씨 등의 연구에서 액체유전체에서 발생한 부분방전(partial discharge)으로부터 기록된 전기적 강도와 음향적 강도사이에는 상당한 상관관계가 있음을 보고하고 있다[5,6,7]. 더욱이 모든 경우에 있어서 음향신호와 전기신호는 거의 비례관계가 관측되고 있다.[5,7]

따라서 본 연구에서는 음향탐지법은 전기, 자기적 간섭을 받지 않고, 트리의 발생점에서 열화상태를 파악하기에 적당하므로 컴퓨터를 이용한 PD측정을 음향센서를 이용한 음향탐지법을 도입하였다.

전기절연재료로서 널리 사용되고 있는 저밀도 폴리에틸렌으로 트리잉 파괴 시험에 대하여 음향 펄스데이터의 시간순서에 따른 위상각-진폭분포에 의한 AE량 (AE펄스수, AE평균개시위상각, AE평균개시진폭, AE평균최대위상각, AE평균최대진폭)을 제시하여 이 AE량을 이용하여 열화 판정에 유용한 AE량을 제시하고 절연진단에 활용하고자 한다.

2. 실험방법 및 실험장치

2.1 시료 및 전극구성

본 실험에 사용된 시료는 밀도 0.92[g/㎤]인 한양화학제 저밀도 폴리에틸렌의 펠릿(pellet)을 사용하였다. 시료의 블록 형태로 그림 2-1에서 나타낸 바와 같다. 시료의 규격 30×40×3[㎜]으로 제조하였다.

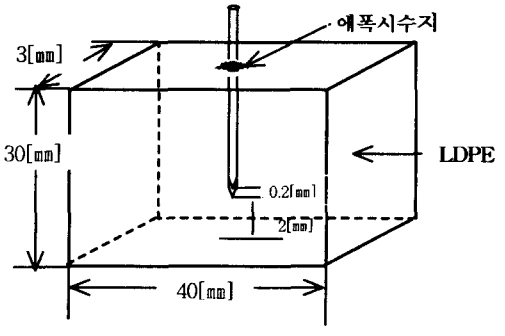

그림 1. 전극배열
Fig. 1. Electrode arrangement

침전극은 직경 0.56[㎜φ]인 일본제 바늘(스테인레스 스틸재질)을 에칭법에 의해 침선단 곡률 반경 5~6[㎛]으로 조정하여, 침전극의 삽입상태에서 블록형태로 몰딩하여 사용하였다.

시료 표면과 침전극사이를 에폭시 수지계의 접착제로 밀봉하였으며 전극의 형태는 침대 평판전극이고 극간 거리는 2[mm]이고 보이드의 길이는 0.2[㎜]로 하였고 접지측 전극은 실버 페이스트(silver paste)로 도포하였다.

2.2 실험장치

음향방출 측정 및 파괴실험과 실험장치에 대한 블록선도는 그림 2-2에 표시하였다.

인가전압은 교류60[Hz]이고,50[kVrms]까지 연속으로 변화시킬 수 있다. 고전압 회로는 음향방출 검출회로의 잡음을 일으킬 수 있는 코로나 방전을 억제하기 위해 실리콘오일(silicon oil)에 함침하였다.

음향탐촉자(acoustic transducer)는 공진주파수 300[㎑]를 갖는 PZT탐촉자가 사용되었고, 평판전극 바로 아래 거리 (1[㎜])에 설치하였다.

음향의 원신호는 이득이 60[dB]인 차동증폭기로 150~450[㎑]의 대역필터(band pass filter)를 사용하였다.

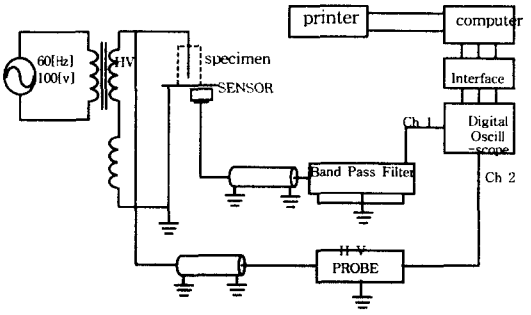

그림 2. 실험장치의 블럭선도
Fig. 2. Block diagram of experiment set up

실험용 유조(oil tank)외부를 0.3[㎜]동판으로 감싸고 이것을 접지시켜 최대한의 노이즈를 제거하였고, AE신호의 문턱준위(threshold level)는 증폭된 신호를 5[㎷]로 하여 확실한 음향신호를 얻을 수 있었다. 탐촉자(transducer)에서 포착된 신호는 증폭된 후, 디지털 오실로스코프(Tektronix Co. TDS210 샘플링

rate 1[㎓])의 채널 1에 입력된다. 그리고 AE펄스의 위상각 특성을 보기 위해 인가전압을 고전압 프루브(HP 34300A)로 전압강하(1000:1)시켜 채널 2에 입력된다. 오실로스코프에서 디지탈화된 신호는 인터페이스(RS-232C)케이블을 통해 컴퓨터의 저장장치(하드디스크)에 저장하였다.

가. 실험방법

사용 시료에 대한 전압인가 방식은 승압속도 1[kV/s]로 전압 8[kV]까지 증가시켜, 보이드 시편에 각각 교류(60[Hz]) 전압 8[kV]을 절연파괴시 까지 인가하였다. 측정시 매 5분마다 인가전압 파형(60[Hz])의 10주기 단위로 데이터를 받아서 디지털 신호의 취득을 위한 프로그램인 Wstar을 이용하여 파형 형태와 데이타형태로 저장한다. 저장된 데이터는 통계처리를 위해서 마이크로소프트사의 엑셀화일로 변환하였으며 여러 가지 음향방출량을 산출하였다. 또한 트리개시 및 진전시 트리형태의 관찰은 광학현미경에 부착한 CCTV을 통하여 관찰하고 사진 촬영을 하였다.

나. 음향방출량의 정의

사진 1. 트리의 형상
Photo. 1. Shape of tree

㉠ AE펄스수는 매 5[분]마다 10주기에 대하여 발생한 펄스수의 총계이며 AE펄스는 1 주기에 대하여 원점을 교차하는 횟수를 나타낸 것이다.

㉡ AE개시위상각(Θ_{inc})은 이전의 AE펄스의 극성반전후 반주기내에 최초의 AE펄스가 발생하는 위상이고 AE평균개시위상각($\overline{\Theta_{inc}}$)은 어떤 측정의 사이클수의 AE개시위상각(Θ_{inc})을 10주기에 대하여 산술 평균한 값으로 정의한다. 또 AE펄스 위상각은 1 주기를 등간격으로 166분할한 위상각 영역에서 AE펄스 위상각을 표시한다.

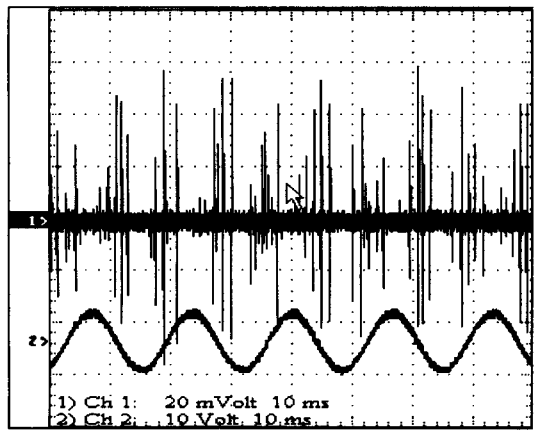

그림 3. 음향방출 측정파형
Fig. 3. Acoustic Emission measurement waveforms

㉢ AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)은 매 5분마다 10주기에 대하여 시간 순서대로 획득하여 각 주기마다 AE평균개시위상각($\overline{\Theta_{inc}}$)에서 진폭을 측정하여 그 진폭을 산술 평균한 값이다.

㉣ AE평균최대위상각($\overline{\Theta_{max}}$)은 AE펄스의 각 주기에서 발생한 최대진폭의 위상각을 10주기에 대하여 평균한 위상각으로 정의한다.

㉤ AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)은 각 주기에서 AE평균위상각에서 발생한 최대진폭을 10주기에 대하여 평균한 진폭으로 정의한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 보이드 시료의 트리의 신장과 AE펄스수의 시간변화

그림 4은 인가전압(8[kV])에 의한 보이드 시료의 트리의 신장을 나타낸 것이다.

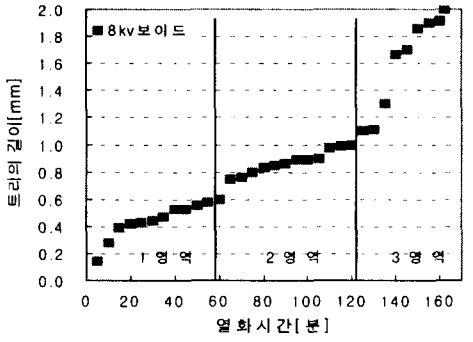

그림 4. 보이드 시료의 트리 길이
Fig. 4. The tree length of void sample

그림 4 에서 보이드 시료의 트리길이의 성장은 열화초기(1영역),중기(2영역)에서는 완만하게 성장하나 열화말기(3영역)까지는 급격하게 트리의 길이가 성장하면서 파괴에 이른다.

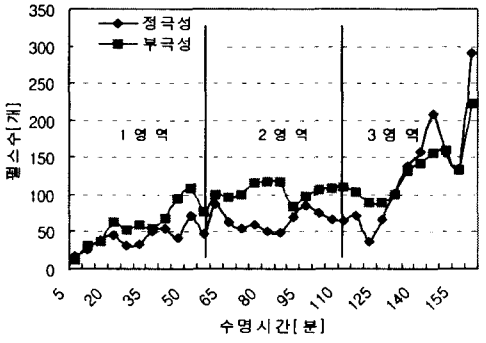

그림 5. 보이드 시료의 AE펄스수의 시간 변화
Fig. 5. Time variation of AE pulse number of void sample

이것은 보이드 시료는 시간이 경과함에 따라 많은 미소채널이 발생하여 가지형 트리로의 진전을 둔화되어 성장하기 때문에 전계 방향의 진전을 어렵게 되어 옆 방향으로 진전이 크게 됨이라고 생각된다. 그러나 열화말기(3영역)에서 절연파괴시 트리의 성장이 빠르게 진행함을 보이고 있다.

그림 5는 열화시간에 대한 트리진전에 따른 0.2[㎜]침상보이드의 AE펄스수[개]를 나타낸 것이다.

보이드의 길이는 침상보이드 0.2[㎜]이다. 교류 8[kV]전압을 인가 후 파괴에 이르기까지 약 165[분]이 걸렸다. 보이드 시료는 열화초기, 중기는 정극성(+)이

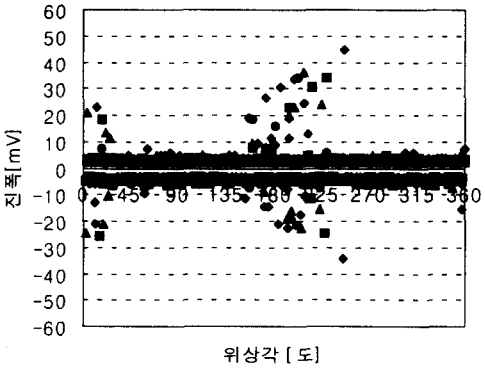

그림 6a. 10분후 ϕ -AEA-n 특성
Fig. 6a. ϕ-AEA-n characteristic after 10 minute

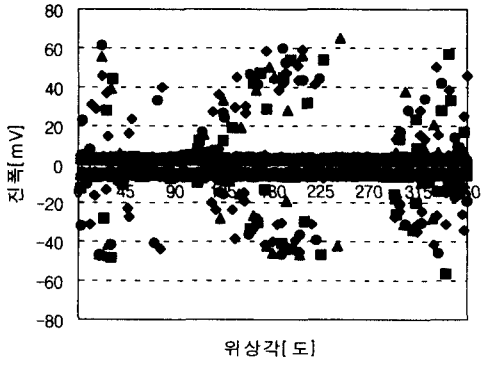

그림 6b. 60분후 ϕ -AEA-n 특성
Fig. 6b. ϕ-AEA-n characteristic after 60 minute

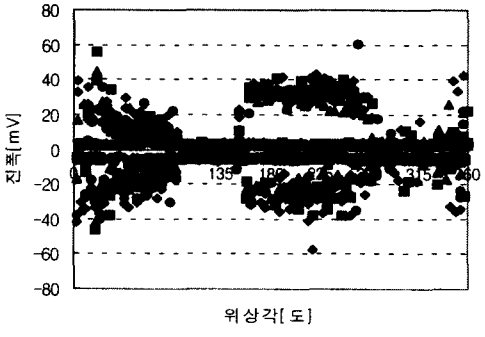

그림 6c. 160분후 ϕ -AEA-n 특성
Fig. 6c. ϕ-AEA-n characteristic after 160 minute

나 부극성(-)에서 AE방전펄스수은 완만하게 증가하고 부극성(-)은 정극성보다 다소 많은 펄스수가 발생한다. 그리고 열화말기(3영역)는 130[분]부터 정극성과 부극성의 경우 급격히 증가하고 최종 파괴에 이른다. 그림 4의 보이드 시료의 트리길이에 참조하여 보면 열화말기(3영역)에서 트리의 길이가 급격하게 증가한다. 이는 AE펄스수와 밀접한 관계가 있다.

또 그림 3-3a, b, c는 각각 인가전압 8[kV]을 인가했을 때 10분, 60분, 160분후 ϕ-AEA-n 특성은 열화시간이 경과함에 따라 펄스수 n가 증가함을 나타내고 있다. 그림 3-3c는 전압인가 후

60분일 때이며 절연파괴 5분전으로 열화말기(3영역)를 펄스수의 증가를 아주 잘 표현하고 있다.

3.2 보이드 시료의 AE평균개시위상각 ($\overline{\Theta_{inc}}$) 의 시간변화

그림 7은 열화개시부터 파괴 시까지 침상보이드 0.2[㎜]의 시료의 AE평균개시위상각 ($\overline{\Theta_{inc}}$)을 나타낸 것이다. 열화초기(1영역)에서 정극성(+)인 경우 45° 에서 10° 까지 완만하게 감소하고 열화중기(2영역)에서는 15° 내외로 일정하게 유지한다.

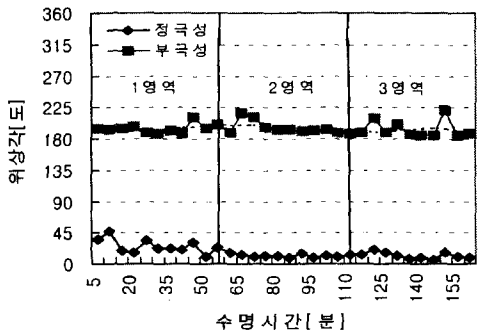

그림 7. 보이드 시료의 AE평균개시위상각의 시간변화
Fig. 7. Time variation of AE average inception angle of void sample

열화말기(3영역)에서 열화중기보다는 약간 더 저위상으로 10° 내외로 일정하게 유지하다가 파괴에 이른다. 부극성(-)의 경우도 200° 내외로 열화초기, 중기, 말기까지 저위상각에서 일정하게 유지하다가 파괴에 이른다. 이것은 열화말기와 열화초기를 구별할 수 있는 유효한 음향방출량임을 보이고 있다.

3.3 보이드 시료의 AE평균최대위상각 ($\overline{\Theta_{max}}$)시간변화

그림 8는 트리진전에 따른 0.2[㎜] 침상보이드를 갖는 AE평균최대위상각 ($\overline{\Theta_{max}}$)의 열화시간에 대한 분포특성을 나타내고 있다.

열화초기(1영역)는 정극성(+)인 경우 48° 에서 96° 까지 저위상각에서 요동하면서 발생하고 열화중기(2영역)에서 90° 에서 요동하면서 증가하여 135° 부근에서 AE평균최대진폭이 나타난다. 열화중기(2영역)의 90[분]부터 90° 에서 150° 까지 (고위상각범위)에서 AE평균최대진폭이 나타난다. 열화말기(3영역)에서 140[분]에서 최대평균진폭의 위상각이 열화초기보다 낮은 위상각으로 진행하다가 파괴에 이른다.

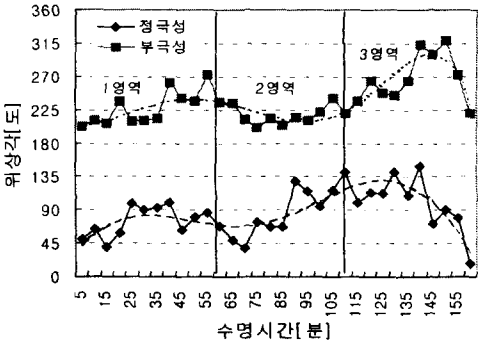

그림 8. 보이드 시료의 AE평균최대위상각의 시간 변화
Fig. 8. Time variation of AE average maximum angle of void sample

부극성(-)의 경우는 정극성의 경우와 비슷한 양상을 보이고 있다.

이상의 결과에서는 열화말기(3영역)에서 AE평균최대진폭이 정극성(150° 부근), 부극성(315° 부근)에서 최대진폭을 나타냄을 보여준다. 이로써 AE평균최대위상각 ($\overline{\Theta_{max}}$)을 열화말기단계를 진단하기 위하여 유용한 음향방출량임을 알 수 있다.

3.4 보이드시료의 AE평균개시진폭 ($\overline{AEA_{inc}}$)의 시간변화

그림 9는 시간변화에 따른 보이드 시료의 AE평균개시진폭 ($\overline{AEA_{inc}}$)을 나타낸 것이다.

AE평균개시진폭 ($\overline{AEA_{inc}}$) 은 부극성(-)인 경우 열화초기(1영역)는 12[㎷]에서 42[㎷](55[분]까지) 급

속히 증가하며, 열화중기(2영역)에서 75[분](46[mV])으로 최대값을 이르고 또 급격히 감소하여, 20[mV]까지 감소한다. 그래서 열화말기(2영역)에서 20[mV](115[분])에서는 완만히 증가하면 파괴직전 28[mV]를 나타내며 열화초기보다 약간 높이 증가하면서 파괴에 이른다. 정극성의 경우 열화중기의 방전개시진폭이 부극성에 비하여 작지만 비슷한 양상을 보이고 있다.

열화초기부터 열화중기까지 비교적 작은 트리 가지가 존재하므로 AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)이 저위상각에서 낮게 나타나고 열화말기에서 파괴직전까지는 고위상각에서 적게 나타남을 알 수 있다.

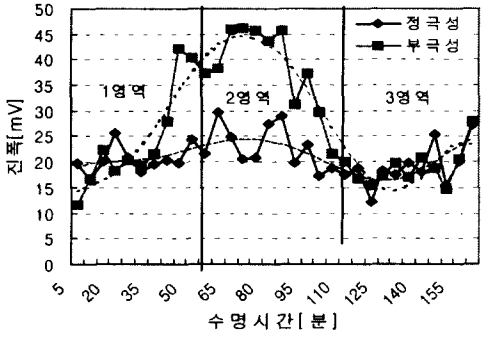

그림 9. 보이드시료의 AE평균개시진폭의 시간변화
Fig. 9. Time variation of AE average incepion amplitude of void sample

또 부극성의 경우는 보이드 시료의 열화중기를 진단하기에 유용한 음향방출량임을 나타내고 있다.

3.5 보이드 시료의 AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)의 시간변화

그림10에서 보이드 시료의 AE평균 최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)은 다음과 같은 경향을 나타낸다.

AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)을 정극성(+)인 경우는, 열화초기(1영역)에서는 15[mV]~44[mV]부근에 요동하며, 열화중기(2영역)에서는 각각 43[mV](60분), 49[mV](95분)에서 최대진폭을 나타내고 서서히 22[mV]까지 감소하며 열화말기(3영역)에서 22[mV]에서 서서히 증가하여 40[mV]까지 증가하고서 그 후 파괴에 이른다. 이상과 같이 열화말기(3영역)가 열화초기(1영역)에서 AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)과 AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)이 약간 크게 나타나며 특히 열화중기

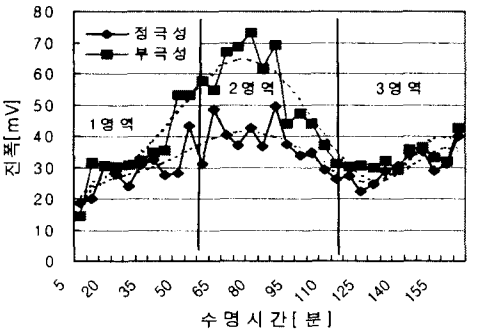

그림 10. 보이드 시료의 AE평균최대진폭의 시간변화
Fig. 10. Time variation of AE average maximum amplitude of void sample

(2영역)에서 AE평균개시진폭과 AE평균최대진폭이 최대값이 나타나고 부극성(-)이 정극성(+)보다 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)과 AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)은 특히 보이드 시료에서 열화중기를 진단할 수 있는 유용한 음향방출량임을 보여주고 있다.

이것은 열화초기상태에서 트리 발생 밀도가 낮고 트리가 진전함에 따라 트리 발생 밀도가 높기 때문에 트리의 관내의 잔류전하의 퇴적이 확대되어 방전면적이 넓어지기 때문에 열화가 진전함에 따라 방전펄스가 크게 된다가 추정된다.

4. 결 론

본 실험에서 음향탐지에 의한 보이드 시료의 음향방출량은 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 보이드 시료의 AE펄스수의 시간특성은 열화말기(3영역)에서 최대값을 나타내고 있다.

나.보이드시료의 AE평균개시위상각($\overline{\Theta_{inc}}$)은 열화초기에서 열화말기까지 서서히 저위상각으로 이동한다.

다. 보이드시료의 AE평균최대위상각($\overline{\Theta_{max}}$)은 열화초기(1영역)에서 서서히 증가하여 열화말기(3영역)에서 고위상각에서 최대값을 나타낸다.

라. 보이드시료의 AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)과 AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)은 모두 열화중기에서 최대진폭을 나타내며 열화말기에는 낮은 진폭을 나

타내면서 파괴에 이른다.

이상의 결과로 보이드 시료의 AE평균개시진폭($\overline{AEA_{inc}}$)과 AE평균최대진폭($\overline{AEA_{max}}$)은 열화 중기를 진단하기에 유용한 음향방출량임을 알 수 있다.

또 AE펄스수, AE평균최대위상각($\overline{\theta_{max}}$)은 열화 말기를 진단하기 위해서 유용한 음향방출량임을 알 수 있다. 또 AE평균개시진폭과 최대진폭은 보이드 시료의 열화진단을 구별하는데 유용한 음향방출량임을 실험결과로부터 얻었다.

참 고 문 헌

[1] 例えば, 部分放電劣化」, 電氣學會 技術 (II部), No .164(昭59).

[2] 例えば, 絶緣材料による部分放電(コロナ)による 劣化〔IV〕」, 同上(II部),No.43(昭51).

[3] M. Hikita et el, "Phase-resolved and time-sequential Partial Discharge Pulse measurements in a metal-void-insulator system ,J.Phys. D:App. Phys 27(1994)1220-1228.

[4] 絶緣材料 微小放電劣化 調査 專門委員會 ; "日本 電氣學會 技術報告(II),部分放電 劣化",1984.

[5] Kawada, H. Honda,M., Inoe, t., and Amemlya,T."Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-filled Power Transformer". IEEE Trans. Power Appar. System,Vol.PA 103, NO.2 February 1984,pp.422 -428.

[6] Harrold, R.T," The Relationship Between Ultrasonic and Electrical Measurement of Under-Oil Corona Sources". IEEE Trans.Elec. Insul.,Vol.日-11, No.1 , March 197 6, pp.9-11.

[7] Bengtsson, T., Leljon, M., Ming, L.., Jonsson, B."directively of Acoustic Signal from Partial Discharge in Oil" IEE PRoc-Sci.Meas.Technol.,Vol 142, No.1 January 1995. pp.85-88

[8] Tairo et al ; " Phase Angle Analysis of Discharge Magnitude Distribution in a Fine Void " , JIEE. VOL. 109,No.12,1989.

[9] T. Ito, O. Sato, T. Sakai and Ehara ; " Analysis of Internal Discharge Degradation of Polyethylene by Simultaneous Chemical and Electrical Measurement " , JIEE , Vol.109, No,10 ,1989.

[10] Y. Kitamura and S. Hirabayshi , "Change of Internal Partial Discharge and Epoxy Resin during Voltage Endurance Test " , JIEEE, Vol.103 .No.9 ,1983.

◇ 저자소개 ◇

김 재 환(金在煥)

1934년 9월 10일생 1958년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1959년~1973년 한국전력(주) 근무. 1964년 불란서 전력공사(EDF) 도불 기술훈련. 1973년~75년 홍익공업전문대학 전기과 전임강사 1990년~92년 2월 광운대 공대 학장 1994년~96년 2월 광운대 대학원장. 199년 현재 광운대 공대 전기공학과 교수.

신 성 권(申成權)

1964년 2월 28일생. 1986년 광운대 전기공학과 졸업(학사). 1989년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 광운대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1999년 현재 동해대학 정보통신과 교수.

이 덕 진(李德珍)

1969년 9월 25일생. 1993년 2광운대 전기공학과 졸업(학사). 1995년 8광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 2광운대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1999년 현재 광운대학교 전기공학과 강사.