

고전압 절연재료의 결함진단을 위한 부분방전측정

The Measurement of Partial Discharge to Diagnose Defects in High-Voltage Insulating Materials

이정빈*, 정우성, 김태성
전남대학교 전기공학과

J.B. Lee*, W.S. Jeong, T.S. Kim
Dept. of Elect. Eng., Chonnam Nat'l Univ.

ABSTRACT

According to request of insulating materials for high-voltage, recently we make effort not only to develop diagnostic skills of aging state but also to discover defects in insulating material in the early.

Especially, partial discharge has been actively studied as a non-destructive diagnosis technique and very useful method. Because the method of partial discharge measurement has damages less than other conventional diagnosis technique.

In this paper, the characteristics of partial discharge was investigated and studied on many samples with voids. In order to adapt as a practical diagnosis technique, it is studied on the characteristics of partial discharge and insulation breakdown in the high voltage. We suggest that partial discharge measurement can be used in order to diagnose defects in high-voltage insulation materials.

1. 서론

전기기기 및 전력계통의 대용량, 고압화에 따라 전력설비의 절연열화 상태진단 뿐만 아니라 기기의 결함을 제작 초기에 발견하고자 진단기술에 관한 연구가 지속적으로 요구되고 있다. 부분방전시험 등을 이용한 비파괴 진단기술은 실험을 하는 도중에 시료가 받는 스트레스가 다른 시험방법보다 작기 때문에 기존의 파괴실험과 같이 기기에 손상을 주지 않고 실험할 수 있으므로 실험방법이 대단히 유용하다. 절연진단 측정기술의 하나로서 그 자체의 비파괴성과 높은 측정감도라는 장점으로 광범위하게 적용

되고 있다.

전기설비의 노후화에 대응하여 이상유무판단 뿐만 아니라 열화정도를 알기 위하여 열화진단기술의 확립이 요망되고 있다. 그러나 열화현상은 단순한 전기적 열화 이외에도 열적, 기계적 열화 등이 복합적으로 적용된다.

IEC에 따르면 부분방전(Partial Discharge, PD)은 전극간에 전압을 가할 때 그 사이의 절연매체 중에 부분적으로 발생하는 방전현상으로 전로관통파괴(Complete Breakdown)가 아닌 불완전 부분파괴(Incomplete Breakdown)로 정의된 바와 같이 고전압용 설비 및 재료에 국부적인 불평등 전계가 형성되는 곳에서 먼저 발생하게 되며, 케이블 및 접속부의 보이드, 외상, 차폐층의 이상 등을 검출하는데 효과적이다.

특히 도체와 절연체, 절연체와 절연체사이의 계면이 존재하여 단일상과는 다른 전기전도, 절연파괴 및 열화기구를 갖게 된다.

부분방전은 물리적으로 보아 전기에너지의 기타 에너지로의 변환(열, 빛, 소리와 화학물질), 즉 에너지손실이라는 관점에서 부분방전에너지를 정의할 수 있다. 각 부분방전펄스(PD pulse)의 절대에너지량은 미소하나 부분방전의 발생이 주기마다 반복적이고 국부적으로 밀집되어 있어 절연재료의 열화를 심각하게 하는 주원인이 된다.

본 연구에서는 고전압 절연재료 및 기기의 결함진단을 위하여 인공적인 보이드와 계면을 갖는 여러 종류의 시료들을 제작하여 부분방전량을 측정하고, 또한 실용적인 진단기술로 응용하기 위해 부분방전특성과 절연파괴강도에 대한 분석을 통하여 고전압 절연재료의 결함을 진단할 수 있는 측정방법과 부분방전의 발생형태에 관하여 연구하고자 한다.

2. 시편 제작 및 실험방법

2-1 시편의 제작

본 실험에 사용한 시편은 연구의 목적 및 용도에 따라 내부에 보이드를 갖는 보이드 測定用 시편과 界面에 원-원전극을 삽입한 계면 측정용 시편으로 구분하였다. 시편은 PMMA로 직각 60 X 60 X 2 [mm³], 50 X 40 X 3 [mm³]의 크기로 제작하여 보이드용 스페이서와 계면용 전극을 삽입한 후 접착하였다.

보이드 측정용 시편은 보이드가 없는 경우와 보이드의 크기를 달리하는 시편으로 제작하였다. 보이드가 없는 시편은 현미경으로 관찰하여 선별하고 실험에 이용하였다. 그리고 보이드의 크기를 달리한 시편은 보이드의 크기를 ϕ 1, 2, 3, 4, 5 [mm]로 구분한 스페이서로 제작하여 單一相 보이드 및 複合의 다수 보이드를 갖는 시편으로 제작하였다. 다수의 보이드를 갖는 複合시편은 ϕ 2, 4 [mm]의 조합으로 시편 중앙에 위치하도록 구성하였다.

계면에서의 부분방전 측정용 시편은 시편 사이에 직경 10 [mm], 두께 20 [μ m]의 크기를 갖는 정밀 가공된 원-원전극을 삽입하여 전극간격이 6 [mm]가 되도록 배치하였다. 전극부의 제작은 직경 5 [Cm], 두께 1.5 [Cm], 곡률반경 2 [Cm]의 평판전극을 직경 12 [Cm], 높이 16 [Cm]의 투명 아크릴 원통에 전극간격 6 [mm]로 배치한 후, 시편의 흔들림을 방지하고 시편이 전극의 중앙에 놓이도록 하기 위해 試片保護裝置(Sample guarder)를 장착하고 연면방전을 방지하기 위해 변압기유로 채웠다.

2-2 실험방법

험은 평판-평판전극을 배치한 후, 변압기유 중에서 부분방전특성을 측정하였다. 계면 측정용 시편은 삽입된 원-원전극에 전압을 인가하여 측정하였다. 부분방전 펄스는 오실로스코프를 통하여 상시 관측하면서 필요한 경우에는 비디오 레코더로 녹화하였다.

2-2-1 부분방전 특성시험

부분방전 특성시험은 실온의 변압기유 중에서 Fig. 1 과 같이 部分放電測定器(Partial Discharge Measurement Device, QM-3, Pultec Electronics Co., Japan), 校正用 펄스 發生器, 오실로스코프, X-Y 레코더 등으로 부분방전 시스템을 구성하고 실험상태를 관찰하면서 시행하였다.

부분방전측정회로에는 시료의 종류, 접지 상태 등에 따라 여러가지의 방법이 있지만, 주로 사용되는 방법중 結合콘덴서 검출회로를 이용한 측정법을 사용하였다. 절연물 중에 발생하는 미약한 부분방전을 검출하기 위한 결합콘덴서 C_k 는 1,000 [pF]으로 선정하고, 측정전 교정용 펄스발생기를 이용하여 부분방전측정계 전체 및 부분방전측정기의 방전전하, 발생빈도, 검출파형 등에 대한 교정을 행하였다. 교정용 펄스발생기의 표준전하는 25,000 [pC]으로 하였다.

부분방전 특성시험의 순서는 Fig. 2의 계측도와 같이 실온의 변압기유 중에서 교류전압을 승압속도 0.5 [kV/sec]로 상승시켜 가며 부분방전측정기의 방전지시계와 소멸전압을 부분방전측정기를 이용하여 측정하고, 방전전하-인가전압특성(q-V 특성)을 X-Y 레코더로 기록하였다.

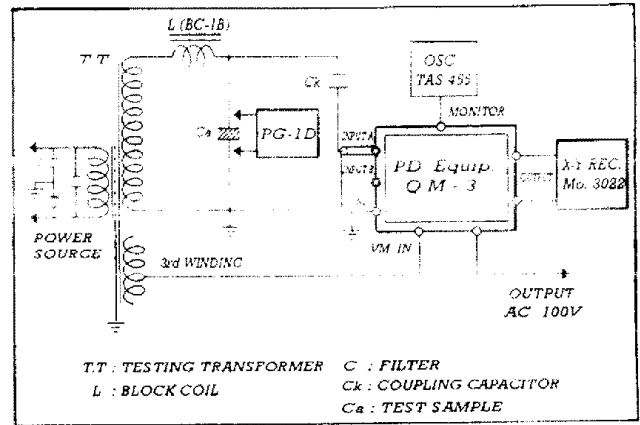


Fig. 1 Block diagram of partial discharge equipment

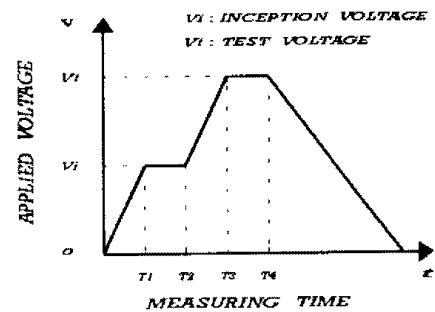


Fig. 2 Measurement processing diagram of partial discharge

부분방전 펄스는 오실로스코프를 통하여 상시 관측하면서 방전용량이나 발생빈도 등 부분방전의 특성량을 부분방전측정기를 이용하여 측정하였다.

2-2-2 절연과피 특성시험

절연과피 시험용 전원은 교류 시험용 전원장치(AC testing power source, ACG-50K3, Pultec Electronics Co., Japan)를 이용하였다. 실험은 부분방전 특성시험과 동일한 방법으로 하였으나, 절연과피가 발생할 때까지 승압하였다. 승압은 측정기에 부착된 전압계를 보면서 수동 조작하였다. 절연과피의 측정을 위하여 부분방전측정기의 최고전압(50 [kV])까지 상승하여 방전전하-인가전압특성(q-V 특성)을 X-Y 레코더로 기록하였다.

2-2-3 계면특성시험

Fig. 3과 같이 계면에 원-원전극을 삽입한 시편을 실온의 변압기유 중에서 실험하였다. 인가전압은 승압속도 0.5 [kV/sec]로 상승시켜 가며 부분방전측정기의 부분방전지시계와 오실로스코프를 관측하며 부분방전 개시전압과 소멸전압을 측정하였고, 방전전하-인가전압특성을 X-Y 레코더로 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 보이드의 유무에 따른 부분방전특성

제작된 시편의 부분방전을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 회로를 구성하고 측정하였다. 검출감도는 시편에 따

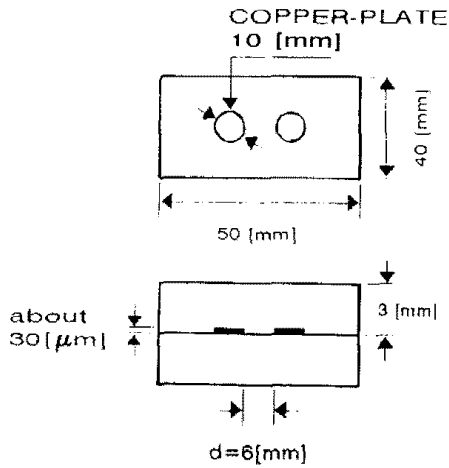


Fig. 3 Electrode unit for PD measurement of interface layer

과 약간 차이가 있고, 부분방전 측정결과는 외래잡음의 영향을 받고 있으며, 그 크기는 약 2-12 [pC]이다. q-V 특성은 보이드의 크기, 보이드의 형태 및 절연체의 구성 등에 따라 특징적인 곡선을 나타낼 수 있다.

Fig. 4는 시편내부에 보이드를 갖는 단일상 시편과 보이드가 없는 시편의 부분방전 측정결과이다.

보이드의 유무에 따른 시편의 부분방전특성을 고찰하기 위하여 단일상 시료에서 보이드를 확인한 후 부분방전을 측정하였다. Fig. 4는 보이드가 존재하는 시편과 보이드가 존재하지 않는 동일한 크기의 시편에 대해 전압을 상승시키면서 측정하였다.

보이드가 존재하지 않는 시편의 경우에는 부분방전량의 큰 변화를 관측할 수 없었다. 즉 보이드가 존재하지 않는 절연체는 진성파괴에 가까운 전압에서 파괴되는 특성이 관측되었다. 그러나 내부에 인공적인 결함을 갖고 있는 시편의 경우에는 파괴전압의 1/2 이하에서도 부분방전이 관측되었는데, 그 이유는 내부 보이드의 파괴전압이 고체보다도 상대적으로 낮기 때문에 먼저 파괴가 일어나며 유전율의 차이로 인하여 고체에서보다도 더 큰 전계가 형성되며, 또 보이드 내의 기체는 절연회복특성으로 인하여 부분방전현상이 지속되기 때문이라고 판단된다.

이상에서 고찰한 바와 같이 고전압 절연재료 및 기기의 내부에 존재하는 결함은 절연파괴전압 이하에서도 부분방전이 개시되므로 기기의 파괴증후를 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

3-2 보이드의 형태에 따른 부분방전특성

보이드를 갖고 있는 시편에서 형태에 따른 부분방전특성은 인가전압의 상승 및 강압시에 관측되는 방전개시전압과 소멸전압 및 부분방전량을 고찰하기 위하여 측정하였다. 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

단일 보이드에서의 방전전하 및 인가전압특성은 부분방전 개시점에서 방전전하량이 급격히 커지게 되고, 이후의 전압상승에 따라 포화되는 경향이 있다. 포화후에는 인가전압의 상승에 따라 부분방전의 발생빈도가 증가하였고, 방전위상의 변화를 관측할 수 있었다.

보이드의 직경이 커지면 최대방전전하량은 크고, 방전개시전압은 낮아짐이 관측되었다. 이것은 보이드에서의

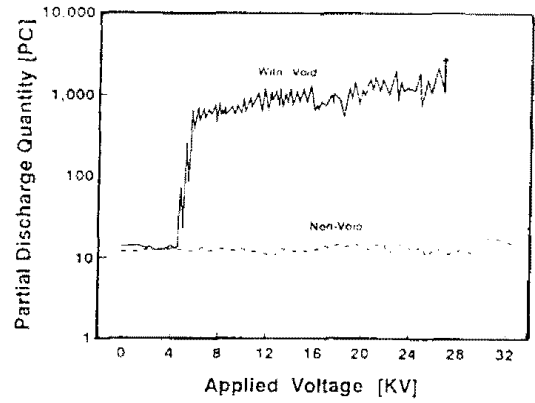


Fig. 4 Partial discharge quantity of both the sample with voids and non-void

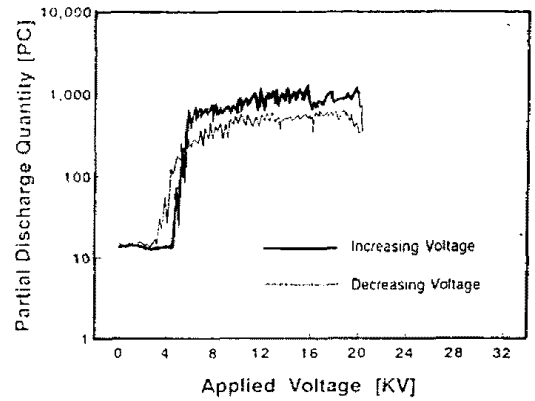


Fig. 5 Partial discharge quantity of the sample with a void

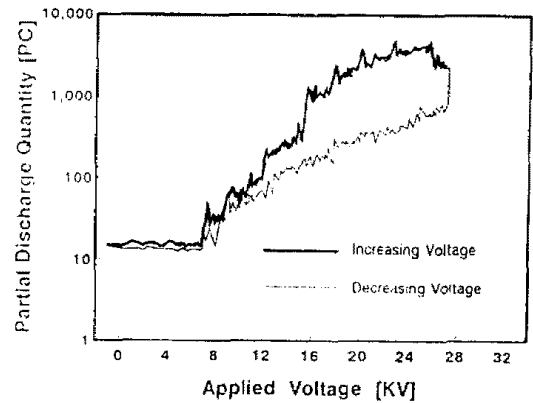


Fig. 6 Partial discharge quantity of the sample with multi-void

방전이 방전개시와 동시에 전계가 집중하여 전면적으로 발생되기 때문이라고 판단된다.

다수의 보이드가 존재하는 경우의 부분방전은 q-V 특성곡선이 부분방전 개시전압부터 서서히 상승하고 강압시에도 서서히 감소하는 특성을 나타내고 있다. 측정결과는 Fig. 6에 나타내었다.

단일 보이드의 경우 방전개시가 빠르게 포화를 이루는 것과는 다르다. 그 이유는 다수의 보이드 중에서 일부가 최초로 방전이 개시되고 인가전압의 상승에 따라 방전을 일으키는 보이드가 점차 증가하여 결국 모든 보이드에서 방전이 일어나 최대방전전하량이 포화하는 것으로 판단된

다.

따라서 이러한 결과로부터 절연재료나 기기의 내부에 존재하는 결함의 상태를 예측할 수 있다.

3-3 계면에서의 부분방전특성

Fig. 7은 절연재료의 열화가 절연층의 계면을 통하여 진전된다는 이론을 바탕으로하여 계면에서의 부분방전 특성을 관측한 결과이다. 진술한 부분방전특성과 같이 부분방전 개시후 부분방전량이 포화되는 특성이 조사되었다.

전압강하시 계면에서의 부분방전특성은 상승시에 비해 완만하므로 방전개시와 동시에 계면의 전영역에서 부분방전이 발생하고, 이 부분방전은 인가전압의 강하에 따라 일부분에서 유지되고, 결국에는 소멸하는 것으로 판단된다. 또한 방전소멸전압은 방전개시전압보다 5-10% 정도 낮게 관측되었는데, 그 이유는 계면층에서 발생된 부분방전이 다른 계면보이드의 후속방전을 유도하기 때문이다.

3-4 부분방전의 발생위상에 관한 고찰

보이드 및 계면에서의 부분방전 실험으로부터 부분방전 전하량은 방전개시 후에 포화됨을 알 수 있었다. 즉 방전량이 포화되는 결과는 부분방전전하량과 다른 형태의 방전이 진행되는 것으로 판단되어 방전의 발생위상을 분석하여 부분방전의 진행을 고찰하였다.

Fig. 8은 대표적인 부분방전의 관측결과의 모델이다. 특히 부분방전량의 포화상태의 방전특성을 고찰하기 위하여 오실로스코프로 관측하며 비디오 카메라로 녹화하였다. Fig. 8에 표시된 기호(A - E)는 부분방전의 패턴을 발생위상에 따라 영역별로 고찰하기 위한 구분이다.

Photo 1은 Fig. 8의 A영역으로 부분방전 발생전의 상태를 촬영한 것이다. 부분방전이 발생하지 않아 전위상에서 방전의 형태가 관측되지 않았다. Photo 2는 부분방전의 개시 및 소멸시의 관측결과를 촬영한 것으로 B영역에서의 부분방전 발생위상을 촬영한 것이다. 한주기동안의 부분방전 발생펄스가 $\pi/2$ 와 $3\pi/2$ 에서 방전이 시작됨을 관측하였으며, 이 지점에서의 방전발생은 인가전압의 피크 위상과도 일치하였다. 방전개시후 초기포화영역인 C영역에서 관측된 부분방전펄스는 Photo 3에서 볼 수 있다. 인가전압의 강압시에도 소멸전압 직전에 비슷한 펄스 형태를 찾을 수 있었으며, 이 영역에서 부분방전의 펄스수는 방전이 개시될 때의 펄스수보다 증가하였고, 발생위상이 $\pi/2$ 와 $3\pi/2$ 지점에서 좌우로 전이되었다. Photo 4는 부분방전이 상당히 진전된 영역 D에 대한 방전형태이다. 부분방전펄스는 $\pi/2$ 와 $3\pi/2$ 지점의 좌측, 즉 초기위상과 방향으로 전이되어감을 관측할 수 있다. E영역은 절연과피에 이르는 영역으로 관측결과는 Photo 5이다. 특히 방전이 0- $2\pi/3$ 와 $\pi-5\pi/3$ 지점에 집중되고 있으며, 그 외의 위상에서도 방전펄스가 관측되었다.

부분방전펄스의 영역별 형태를 관측한 결과에서 부분방전의 진행은 초기 방전개시후 위상전이를 통하여 진전되었다. 특히 부분방전의 위상전이는 반주기의 초기위상각으로 진행됨을 알 수 있었다. 또한 최종적인 부분방전은 전위상각에서 일어나는 것으로 판단된다.

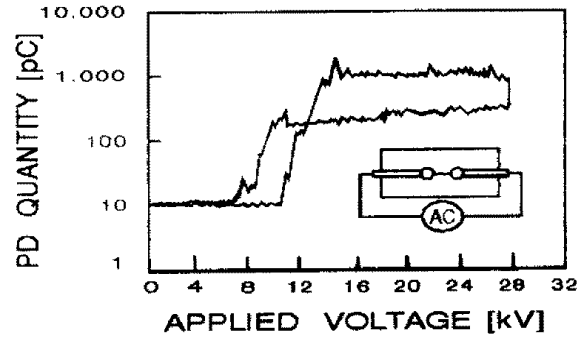


Fig. 7 Partial discharge quantity of the interface layer

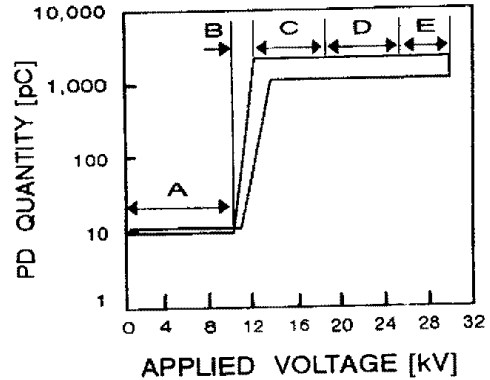


Fig. 8 Partial discharge model according to regions

열화가 진행됨에 따라 위상각이 작은 영역에 방전이 집중되다가 절연과피 직전에는 전위상에서 방전이 발생하는 현상에 대해서는 다음과 같이 생각할 수 있다.

열화초기에는 위상각의 중심부에서 방전이 집중하다가 위상각이 작은 영역으로 진행되는 것은 새로운 위상에서 방전이 발생하는 것으로 판단되며, 절연이 과피되기 직전의 열화말기에는 방전이 전위상에서 발생하는 것은 횡방향누설에 따른 중첩 이외에도 균소펄스의 영향에 기인되는 것으로 보인다.

4. 결 론

고전압 절연재료의 결함진단을 위한 보이드를 갖는 시편을 제작하고, 이 시편으로부터 부분방전특성 및 방전의 발생위상을 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 부분방전의 측정을 통하여 고전압 절연재료에 결함이 존재하는 경우에는 절연과피전압 이전의 실험으로 결함을 예측할 수 있다.
2. 단일 보이드를 갖는 시편은 방전개시전압과 소멸전압의 차이를 관측할 수 있으며, 다수의 보이드를 갖는 경우에는 방전개시후부터 포화까지 점차적으로 방전전하량이 증가하였다.
3. 계면에서의 부분방전은 방전소멸전압이 방전개시전압보다도 5-10% 정도가 작게 나타났다.
4. 부분방전펄스는 초기방전개시후 위상전이를 통하여 전위상으로 진전된다. 특히 방전개시후 각 주기의 피크

에서 발생한 펄스는 절연과피단계에서 전위상영역에서 관측되었다.

이상의 결과로부터 고전압 절연재료 및 기기의 내부에 존재하는 결함은 절연과피전압 이하에서도 부분방전이 개시되므로 기기의 파괴증후를 예측할 수 있으며, 결함의 상태를 예측할 수 있다.

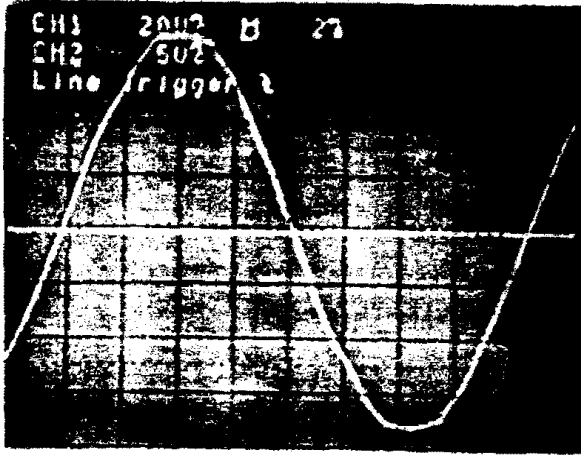


Photo 1. Partial discharge pulse in A region

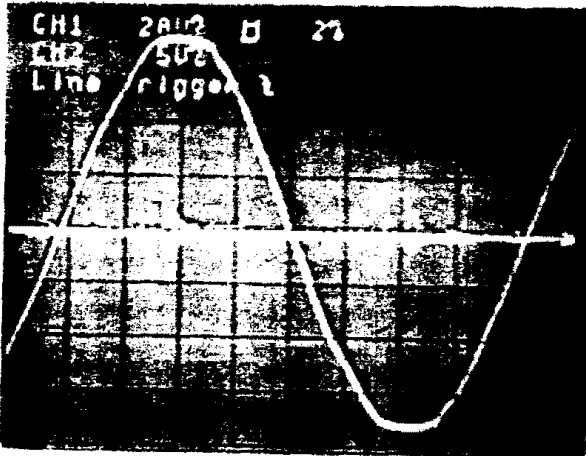


Photo 2. Partial discharge pulse in B region

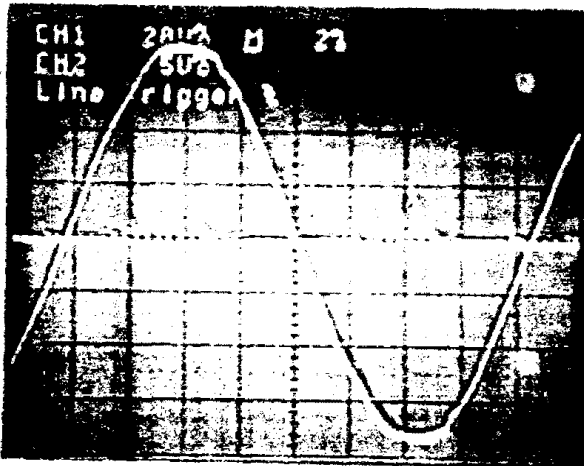


Photo 3. Partial discharge pulse in C region

참 고 문 헌

1. 김대성, "마이카-에폭시 복합재료의 계면에서의 절연 파괴특성", 한국전기전자재료학회지, Vol.5 No.2, pp.224-236, 1992.
2. 이덕출, "고분자 절연재료의 방전열화", 대한전기학회지, Vol.25 No.6, pp.572-576, 1976.
3. IEC Publication 270, "Partial Discharge Measurement", 2nd ed., 1981
4. F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection High-Voltage Equipment", Butterworths, 1989.
5. R. J. Van Brunt, "Stochastic Properties of Partial-discharge Phenomena", IEEE Trans. E.L., Vol.26 No.5, October 1991.
6. 伊藤眞澄 外, "ボイド放電劣化における破壊予知", T.IEE of Japan, Vol.110-A No.11, 1990.
7. 加子泰彦 外, "絶縁材料の耐部分放電性試験法", T.IEE of Japan, Vol.111-A No.8, 1991.

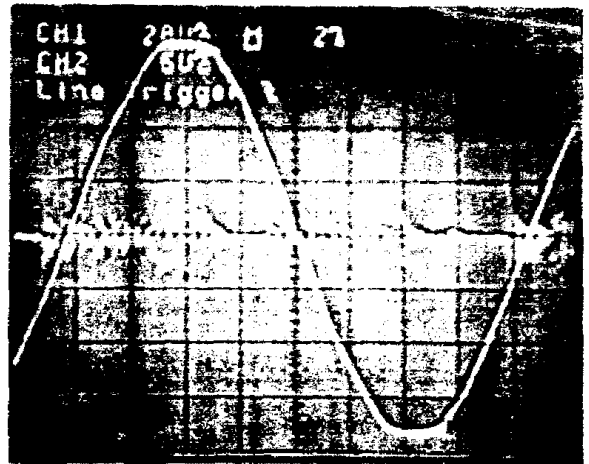


Photo 4. Partial discharge pulse in D region

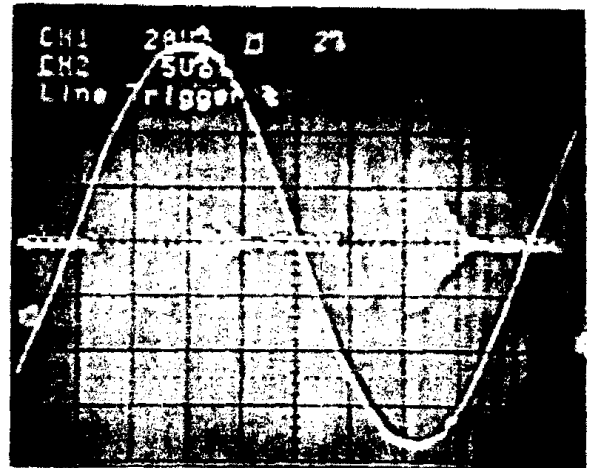


Photo 5. Partial discharge pulse in E region