

고체 합성수지절연체의 표면노화 진단기술로서의
부분방전 측정평가기술에 대하여
Partial Discharge Measurement Techniques for Diagnosis
of Surface Aging on Organic Insulation

박 완기*
독일 다름슈타트대학 고전압연구소

Dipl.-Ing. Wan-Ki Park
Technical University of Darmstadt, HV-Lab., Germany

Abstract- Partial discharge on organic insulation surfaces are an important source of aging. Furthermore the modern PD measurement techniques are rapidly developed as quality control and diagnostic tests to determine the fitness for use of HV equipment employing solid electrical insulation. This paper deals with theory of conventional PD measurement and new tendency of technical development on PD measurements and evaluations. Finally the measuring system used for diagnosing the surface aging on the organic insulation at High Voltage Laboratory of Technical University of Darmstadt in Germany is presented.

1. 서론

고전압용 전기기기는 전기절연의 관점에서 여러 품질관리시험을 거쳐 그 성능을 평가받는다. 이런 시험은 현재 상태의 절연력 뿐만 아니라 장시간에 상안정성과 잔여수명에 대해서도 미리 진단함을 목적으로 한다. 오늘날 部分放電시험은 절연진단측정기술의 하나로서 그 자체의 비파괴성과 높은 측정

감도란 장점으로 광범위하게 적용되고 있다/1/.

IEC/2/에 따라 "부분방전은 전극간에 전압을 가할때 그간의 절연매체 중에 부분적으로 발생하는 방전현상으로 全路貫通破壞(complete breakdown)가 아닌 불완전 부분파괴(incomplete breakdown)"로 정의된것 같이, 장치 또는 재료에 지역적인 불평등 전계가 형성되는 곳에서 부터 먼저 일어난다. 과거에 부분방전을 코로나방전이라 칭한 원인이 되었던 가공송전선에서의 코로나현상은 이를 일상에서 피부적으로 느끼게 하는 좋은 예다. 전력케이블의 합성고분자 절연물을 위시한 고체절연체의 경우, 사용중 받는 높은 전기스트레스에 의한 절연체 내외부에 부분방전 열화(노화)현상이 있음이 알려졌다.

부분방전이 물리적으로 보아 전기에너지의 기타 에너지로의 변환(열, 빛, 소리와 화학물질) 즉 에너지손실이란 점에 따라, PD에너지를 정의할 수 있다. 사실 각 PD펄스의 절대에너지양은 미세하나 PD의 발생이 매 주기 반복적이고 국부적으로 밀집되어 있어 재료열화를 심각하게 하는 주 원인이 된다 /3/.

부분방전측정법으로는 PD현상의 물리적 측정대상으로 분류하여 초음파 장치를 이용한 청각 PD측정법(acoustic), 미세한 발광현상을 카메라로 포착하

는 광학 PD측정법(optical)이 있으나, 방전시 전하의 소멸과 이에 따른 전류의 변화를 이용한 전기적 측정법이 주종이다. 감도 높은 부분방전측정법은 다음의 세가지 용도의 연구를 통해 급진전했다/4/.

- PD검출(Detection): PD의 발생 유무와 그 강도 측정
- PD분류(Classification): 방전의 원인분석(예를 들어 내부방전, 표면방전, 코로나 트리)을 위한 PD측정치의 패턴에 따른 비교분류,
- PD고장점파악(Location): defect의 위치 파악이 목적. 부피가 크고 구조가 복잡한 스위치기어 또는 길이가 긴 전력케이블등이 주 대상.

이하에는 본발표가 절연체 표면노화진단기술로서의 부분방전기술을 다루고자 함이 목적인바, 전기적 PD측정법 중에서 Detection과 Classification에 중점두어 취급한다.

2. 부분방전측정법 및 기술발전 추이

부분방전측정기술의 개괄적 이해를 위해 PD의 종류와 전통적인 PD측정이론을 먼저 설명한다. 다음에 측정data를 용도에 맞게 적용 평가하여 절연의 상태를 정확히 진단기 위한 최근의 연구추이를 분야별로 간략히 기술한다.

2.1 부분방전의 종류

전기구조물에서의 부분방전은 발생현상에 따라 내부(internal)PD와 외부(external)PD로 나눌 수 있다/3/. 내부PD의 대표적 경우인 케이블과 같은 절연체 내의 공극에 의한 방전은, 그림1의 정전용량을 이용한 등가회로 해석할 수 있다. 이 등가회로는 1932년 Germant와 Philippoff가 제시한 이래 큰 무리없이 사용되고 있다/5/. 이 내부PD의 중요한 측정결과로는 PD펄스가 인가전압의 영점통과 주위에 위치한다는 점이다/6/.

그림2의 침-평판 전극의 구조는 외부PD의 대표적 예이며 침전극 바로 앞의 이온화된 전하를 등가회로에 저항(R_2)으로 표시된다. 그림2c)에서 보듯, 이 경우에는 방전현상이 전압의 양극 최고치 주변에 일어난다/6/.

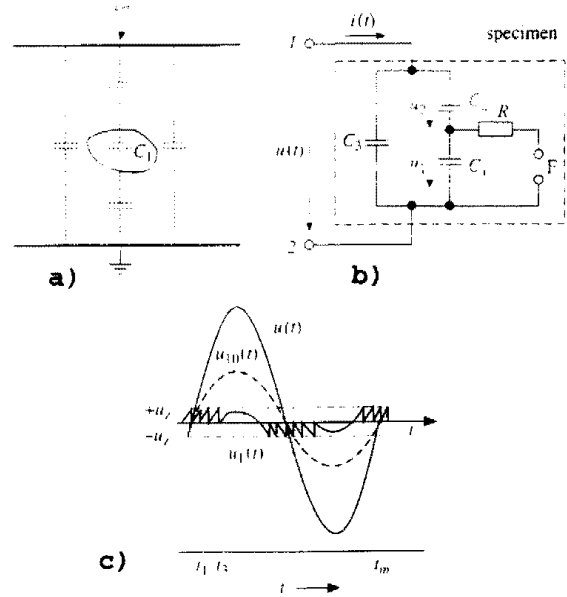


Fig.1: Derivation of classical equivalent circuit of a dielectric with internal void
a) schematic representation of the dielectric
b) equivalent circuit
c) graphical derivation of the voltage on C_1

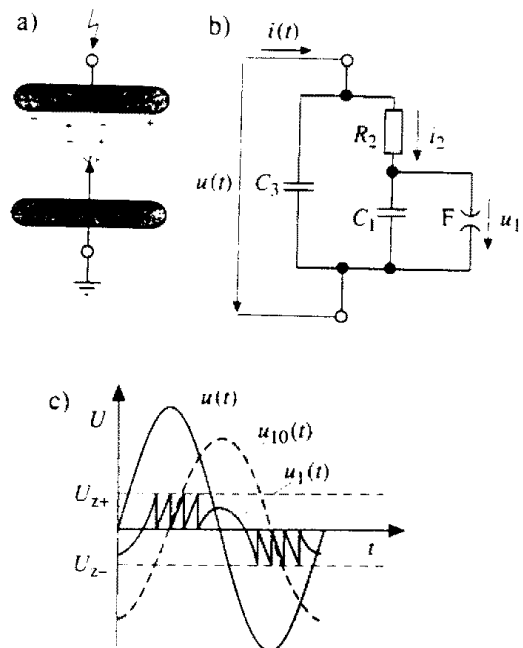


Fig.2: Electrode configuration with external PD and equivalent circuit
a) rod-plane electrodes
b) equivalent circuit
c) voltage waveforms in the equivalent circuit

2.2 부분방전 측정이론 기초

전기적 부분방전측정법은 방전시의 에너지손실이 전하의 소멸에 기인함에 착안하여 측정회로를 구성하고, 방전시에 외부회로를 흘러가는 보상전류펄스를 기초로 이의 적분값인 소위 가시전하 (q_0 : apparent charge)를 측정함이 골격이다. 고장점의 기하학적 크기가 미지인 측정현장에서 실제고장점에서의 방전전하량(q) 측정이 전혀 불가능하여, 이 q_0 의 정확한 측정이 오늘날 PD측정 hardware기술의 목표이다[1].

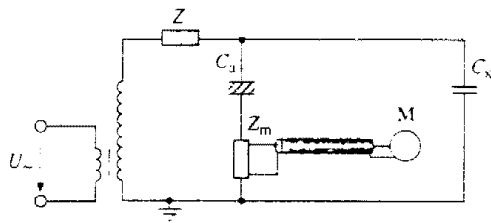


Fig.3: Basic PD measuring circuit

그림3은 IEC에 규정된 세가지 기본 측정회로의 하나로서, 회로내의 주요소자는 Coupling Capacity (C_k)와 측정임피던스(Z_m)이다. C_k 는 변압기에 의해 승압된 인가 고전압을 안정시켜 부분방전시의 필요 전하를 보상 공급하며, 시험대상체 정전용량 C_a 와 식(1)에 표현한 관계로 측정가능한 최대이상가시전하량(q_0)과 외부회로에서 실제 검출되는 가시전하량(q)의 비율(k : scale factor)에 영향을 줌으로,

$$k = q/q_0 = C_k/(C_a + C_k) \quad (1)$$

높은 측정감도가 요구되는 경우는 시험변압기의 용량과 경제성을 고려한 가능한 큰 값의 C_k 를 사용한다. 저항, 임피던스와 과전압보호기로 구성되는 측정임피던스는 구조자체는 단순하나, 측정선로의 선로정전용량과 함께 band pass 필터로 작용하여, 고전압회로로부터 PD신호를 분리하여 측정기의 적분증폭지시회로로 보내는 주요한 역할을 한다. Z_m 은 증폭지시회로와 함께 PD측정시스템의 주파수특성을 결정하며 그에 따라 상이한 출력전하파형을 얻게된다.

방전발생현상에 따라 다르기는 하나 전류펄스는 매우 빠른(수 nsek.) 波頭와 짧은 形成시간을 가진다. 따라서 펄스자체의 감지가 어려울 뿐만아니라 파형이 측정회로의 구성에 따라 쉽게 왜곡될 수 있다. 이런 큰 단점의 전류펄스측정법에 비해 전하량 측정법은, 전류펄스가 경로에서 다소 변형되어도 그 시간적분값(즉 전하량)은 일정하다는데 기초하고 있다. 그러나 실제 회로에서 어떻게 적분을 구현하는가에 따라 여러 방법이 있고 같은 방법이라도 측정기제조자에 따라 상이한 기술을 사용하고 있음이 현실이다.

회로의 주파수band특성으로 크게 나누어 narrow band($\Delta f=10kHz$), quasi-wide band와 wide band($\Delta f > 1MHz$)가 있고, 방전현상특성, 측정용도와 실험실의 차폐능력에 따라 적정회로를 선택한다[1]. PD검출만이 주 과제인 경우 narrow band회로와 침투치지 시계로 PD의 유무와 순시절대치를 간단히 알 수 있지만, 이후 언급할 PD펄스분석에 의한 PD분류(Classification)의 경우 완벽히 전자차폐된 PD실험실에서 가능한 넓은 광역band 시스템으로 측정하여야 한다. quasi-wide band 시스템은 두 시스템의 절충형이라 하겠다.

2.1장과 2.2장에서 설명한 것 같이 PD 개별의 펄스는 방전현상에 따라 그 펄스의 형태와 크기가 다르고 인가전압과의 위상배치가 다르다. 그러므로 PD의 정량적 평가에는 보편적인 PD개시(inception) 전압이나 가시전하량최고치 이외에 펄스위상, 펄스 발생빈도, PD에너지, PD전력등을 PD특성 parameter로 정의하여 이용한다. 측정치의 표현에 있어서도 기준단위시간의 전하량최고치, 시간에 따른 최고치 변화, 인가전압 단위주기 동안의 시간적 전하량변화, PD전력의 시간적 변화, 또는 전하량-위상-발생빈도의 3차원 표현법등 여러가지가 있다.

2.3 최근의 부분방전측정기술 연구추이

1993년 일본 요코하마에서 열린 ISH'93(국제고전압심포지움)에 36편의 논문이 PD에 관한것임을 볼 때, 절연진단기술로서의 부분방전측정기술이 최근 많이 연구됨을 직접적으로 알 수 있다. 이렇게 많은 문헌중에는 PD기술의 본질을 파악치 못하고 부분기술에만 치우친 논문도 많아 연구가 나아가야 할 방향을 오해시킨다는 비판도 있을 정도이다.

다음에는 이런 관점에서 ISH의 논문들을 읽고 연구발전의 추이를 소개와 더불어 평가한, 독일 다름슈타트공대 Koenig교수의 최근 논문/7/을 요약 정리하여 주요테마별로의 연구추이를 소개한다.

2.3.1 부분방전발생현상의 모델에 관한 연구

부분방전발생현상의 물리적 이해를 기초로 이를 체계적으로 모델화하고 변화된 스트레스조건하에서의 반응 결과를 컴퓨터계산과 실험을 비교하여 모델의 타당성을 밝히는 연구가 있다. 여러 절연구조물(고체, 액체와 기체)에서의 PD전류펄스 형태를 조사 분류하거나, 여러 인가전압스트레스(직류, 교류, 충격전압)에 따른 모델 시뮬레이션이 이 범주에 속한다.

2.3.2 전통적 PD측정기술 개발

PD신호를 펄스 단위로 분석 조사하는 새로운 PD 측정 하드웨어 연구에는, 주파수대역(band)의 광역화에 대한 연구(예를 들어, UWB:Ultra Wide Band)와 디지털측정장치의 기초인 고속 A/D converter를 지닌 transient recorder 또는 측정마이크로프로세서의 응용에 관한 연구가 있다. PC를 이용한 자동 측정시스템에서의 Data Acquisition, Compressing, 그래픽표현기술등의 개발과, 새로운 PD센서 개발, PD On-line 측정법등도 여기에 속한다.

2.3.3 외부간섭 억제와 디지털필터의 적용

측정감도가 높은 부분방전측정시 중요한 하드웨어기술은 외부전자파에 의한 간섭현상을 억제하는 전자차폐기술이다. 차폐실험실(shield room)의 전자차폐와 접지기술, 측정 전선의 전자차폐 또는 광신호케이블의 이용등이 여기에 속한다. 또 현실적으로 차폐실험실을 사용할 수 없는 현장실험의 경우, 알려진 외부로부터의 간섭성분을 걸러내거나 평가에서 제외하는 간섭억제기술이 많이 연구되고 있다. 대표적인 예가 디지털필터의 응용기술인데 Adaptive Rejection Filter, Adap. Lin. Prediction 또는 Kalman Filter기술등이 제안되고 있다.

2.3.4 신경회로를 이용한 PD인식 기술

측정한 PD신호로부터 PD발생의 제반원인을 찾아내는 PD분류를 컴퓨터로 수행하는 경우, 어떻게 컴퓨터가 PD펄스를 인식하게 하는가가 따라 여러 방법이 있다. 미리 알려진 여러 유형의 PD pattern를 컴퓨터에 data bank로 입력하고 이것과 측정신

호를 비교한다. 또 최근에는 신경회로(neural net work)라는 인공지능컴퓨터를 이용한 전혀 새로운 방법이 제안되고 있는데, 데이터를 별도로 입력하지 않고 모의고장에 의한 발생 PD유형을 실험을 통해 스스로 배우게(learning)한 후, 실제 측정에서 이 지식을 이용하여 빠르게 PD원인을 밝힐 수 있다고 보고되고 있다.

3. 부분방전 측정 및 평가 시스템

용도에 따른 여러 PD측정시스템 중, 여기에는 고체 합성수지 절연물 장기 표면노화시험시 표면절연 상태를 진단하기 위해 자체 개발한 측정시스템과 평가시스템을 그림4와 그림5로 소개한다.

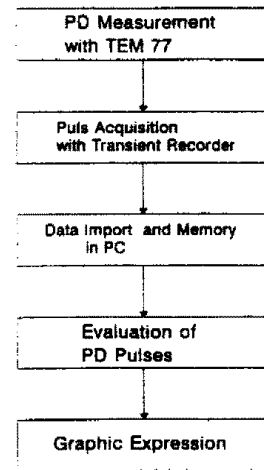


Fig.4: Schematic diagram of PD measuring and evaluating system

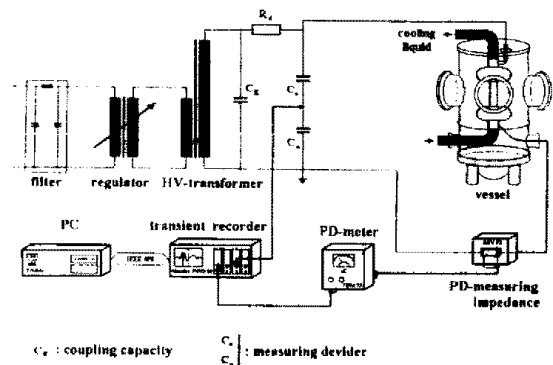


Fig.5: Automatical PD measuring system in the shield room

3.1 PD 측정 장치

측정 임피던스와 PD-meter는 주파수대역이 40-220 kHz 즉 quasi-wide band인 MWB社 TEM77를 사용했다. 이 시스템은 PD펄스의 극성을 바르게 구별할 수 있고 또 식(2)에 따라,

$$\tau = 1/2f_2 \approx 1/2\Delta f \quad (2)$$

τ : mean duration of the impulse response

f_2 : upper limit frequenz

Δf : bandwidth

최고 약 2.5 μ sec. 간격마다의 PD펄스를 감지할 수 있는 장점이 있다. 펄스분석을 위해 Nicolet社의 Pro 90 transient recorder (200MHz/sample, 10bit, 254kByte)로 데이터를 디지털화 했다. 한번의 측정으로 인가전압의 한주기내에 발생한 펄스를 포착한다. 펄스의 통계적 해석을 위해 이런 개별 측정을 약 100번 자동으로 실행하여 충분한 크기의 데이터를 hard disk에 저장한다. 이과정은 486PC와 상업용 Measuring Software "Viewdac 2.0"(Keithley社)를 이용했고, 데이터의 전달은 매우 빠른 속도를 요구하는바 IEEE488.2 Bus를 택했다. Viewdac은 자체 그래픽과 인쇄기능을 지니고 있어 파형을 수월히 document화하여 시간에 따른 파형변화를 비교할 수 있다.

3.2 부분방전 평가시스템

앞장의 과정으로 저장된 데이터로 PD펄스의 통계적 분석을 하고자 측정시스템에 적합한 PD인식 알고리즘을 알아내어 파스칼언어로 프로그램했다(프로그램 AUSWERT). 유효PD의 파형이 기타 외부간섭에 의한 잡음파형과 상이하므로, 먼저 유효PD파형을 기본 잣대로 사용코자 저장했다. 이 유효PD파형을 개별 파일별로 저장한 측정파형과 비교하여 PD펄스를 인식하고, 그때의 PD크기와 전압과의 위상을 알아낸다. 이렇게 전체 데이터를 처리하여 각 위상치와 PD크기에 해당하는 PD빈도를 파악한후 하나의 평가 파일을 만들어 저장한다. 이 파일의 구조는 이후의 그래픽프로그램에서 사용될 것을 고려했다. 상용의 그래픽프로그램 Corel Graphic은 섬세한 모양으로 PD크기-위상-빈도의 3차원그래픽을 표현하기에 충분하였다.

4. 측정 결과와 평가

위장에서 언급한 시스템을 두가지 형태의 알려진 절연구조에 적용하여 그 효율성을 보이고, 실제 연구중인 절연체 표면노화 시료에 적용한 측정결과를 소개한다.

4.1 내부부분방전 측정

그림1에 해당하는 내부PD를 조사하기 위해 절연체내에 인위적으로 공극을 주입한 대상체에 15kV 교류전압을 인가하고 그때 발생하는 순시PD펄스를 그림6에 나타내었다. 각극마다 3개의 펄스가 전압영점 주변에 발생함을 알 수 있다. 이런 측정을 80번 실행한 후 3.2장의 PD평가시스템으로 분석하고 그래픽화한 결과가 그림7이다. 매 주기마다 부분방전이 일정한 위상에서 같은 크기와 빈도로 반복해서 발생함을 볼 수 있다.

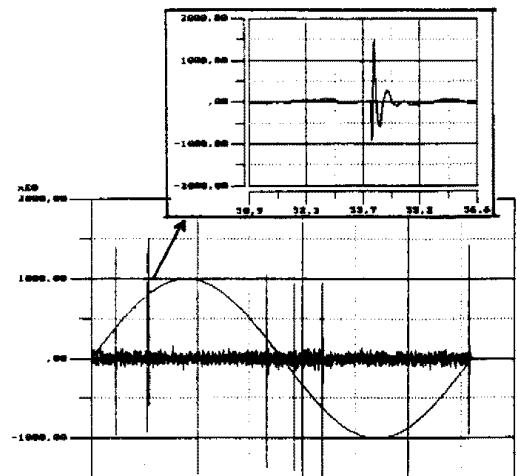


Fig.6: Measured waveforms of PD and applied Voltage for the internal PD

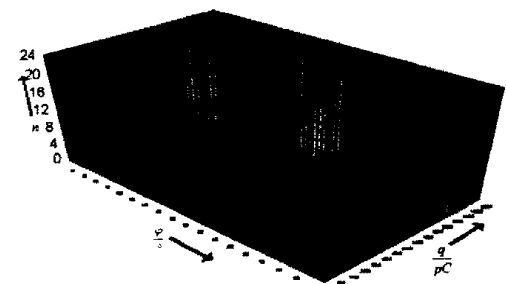


Fig.7: Internal PD presented in 3d plot (the number of pulses(n) - apparent charge(q) - the phase angle(ϕ))

4.2 외부부분방전 측정

전극간격 10cm인 그림2의 침-평판 전극에 8kV 교류전압을 가하고 침전극 주위에서 발생하는 외부PD를 측정했다. 순시PD파형을 그림8에, 100번 측정의 평가분석그래픽을 그림9에 나타내었다. 강한 불평동전계에 의한 극성효과(pole effect)로 negative 전압시에(위상 270°)만 PD가 발생함을 확인할 수 있다.

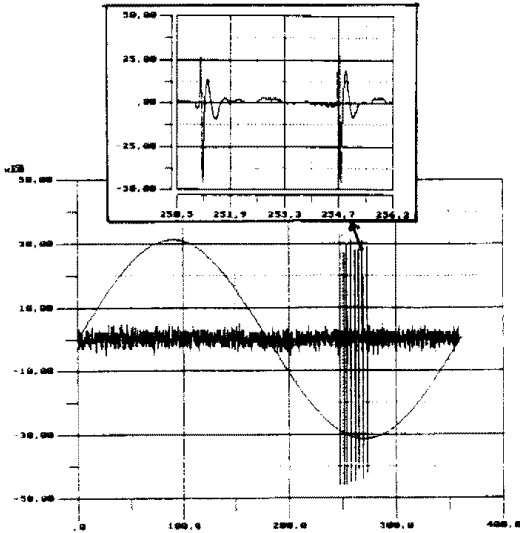


Fig.8: Measured waveforms of PD and applied voltage for the external PD

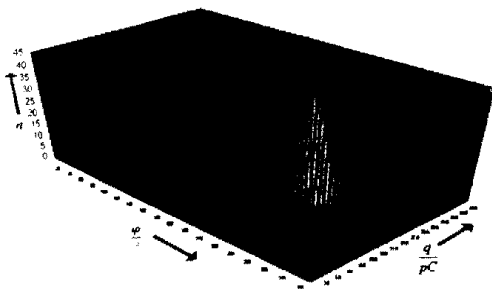


Fig.9: External PD presented in 3d plot
(the number of pulses(n) - apparent charge(q) - the phase angle(φ))

4.3 고체 합성수지의 표면노화 진단

고체 절연재료가 전압과 환경의 복합스트레스를 받을 때에 표면에서 일어나는 특성변화를 연구하는 진단기술의 하나로 부분방전측정이 많이 사용된다. 주어진 전압에서의 발생PD최고치 측정과, 일정 PD가 발생하는 인가전압(PD개시전압)측정은 사용상의

간편함은 있으나, 그 결과 응용의 제한성으로 펄스 분석을 점차 선호한다/8/. 길이 10cm 원통형 에폭시 시료에 10mg/cm²의 물방울을 "inverse climatic chamber" 원리로 발생케하고 20kV로 약 3000시간 노화시킨 상태에서/9/ 차폐실험실에서 그림5의 장치로 PD측정한 결과를 그림10에 보였다. 2-30pC의 PD펄스가 전압과의 위상 90°와 270°에서 조금 지체한 곳에 대부분 분포해 있음을 알 수 있다. 이는 표면에서의 PD가 외부부분방전의 특성을 지님을 뜻하며, 시간적인 노화에 따라 PD의 강도가 커진다는 별도의 실험결과와 함께 표면노화이론에서 중요히 취급되는 PD의 역할을 입증하는 것이다.

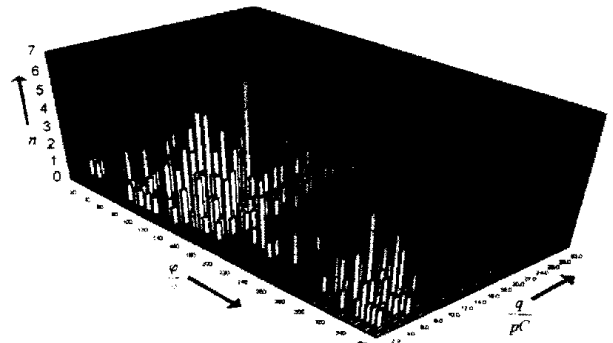


Fig.10: Evaluation of measured PD on aged epoxy resin specimen
(the number of pulses(n) - apparent charge(q) - the phase angle(φ))

4.4. 결론

본 발표는 최근 집중적으로 연구되고 있는 부분방전측정기술에 대한 연구주이를 소개하면서 먼저 PD발생현상과 기본개념을 아울러 설명했다. PD펄스 통계분석을 위해 자체 개발한 PD측정평가시스템을 소개하고 이를 실제로 적용해서 실험평가하여 본 결과를 보였다. 특히 표면노화시험의 진단기법으로 적용하여 얻은 새로운 PD3차원표현법을 소개하였고 진단기법으로써의 유효성을 확인했다.

PD측정기술은 비파괴시험으로 절연의 상태를 예민하게 감지할 수 있는데, 최근의 측정계기와 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어의 급격한 기술발전과 그로 인한 경제성으로 새로운 PD펄스분석법을 지닌 종

은 시스템이 많이 개발되고 있다. 이에 발표자는 국내에서도 그간의 전자기술의 발전을 토대로 한 부분방전측정기술의 자체 연구가 적극적으로 이루어지기를 바라는 바이다.

참고문헌:

- /1/ M. Beyer, et al., "Hochspannungstechnik", Springer Verlag, 1986
- /2/ IEC 270, "Partial Discharge Measurement", 1981
- /3/ D. Koenig, "Partial Discharges in Electrical Power apparatus", vde-Verlag, Berlin, 1993
- /4/ F.H.Kreuger et al., "Classification of Partial Discharges", IEEE-EI-Vol.28, No.6, 1993
- /5/ M.G.Danikas, "The Definitions Used for Partial Discharge Phenomena", IEEE-EI-Vol.28, No.6, 1993
- /6/ D.Kind, "Einfuehrung in die Hochspnnungs-Versuchstechnik", Vieweg Verlag, 1978
- /7/ D.Koenig, "Tendenzen der TE-Messtechnik nach den Beiträgen zum ISH 93, Yokohama", Siemens-Tettex-Kolloquium, Dresden, 1993
- /8/ O.Claus at all., "Partial Discharges on Wet and Lightly Contaminated Insulating Surfaces and Relevant Diagnostics", 7th Intern. Symp. on Gaseous Dielectrics, Knoxville, U.S.A., 1994
- /9/ 박 완기, "복합스트레스를 받는 고전압용 합성 수지 절연물의 배합성분에 따른 표면상태 특성변화에 대하여", 전기학회 전기재료연구회 춘계학술연수발표회 발표논문, 5월, 1994