

# 에폭시 절연체의 보이드 크기에 따른 부분방전 특성연구

최철광\*, 이진선\*, 김정태\*\*, 구자윤\*  
 \*한양대학교(EM&C), \*\*대진대학교

## A Experimental Investigation on the PD Characteristics depending on the various Artificial Voids in Epoxy Insulator

C.K. Choi\*, J.S. Lee\*, J.T. Kim\*\*, J.Y. Koo\*  
 \*HanYang Univ. EM&C, \*\*DaeJin Univ.

### Abstract

An experimental investigation has been performed in order to understand the  $\Phi$ -q-n characteristics related to the PD taking place from the various size of artificial defects inserted in epoxy insulation. In this purpose, PD has been detected simultaneously by two different methods such as commercialized PD detector(TE571) and our detection system using self designed CT type sensor.

Under the presence of void in epoxy insulation, PD has been initiated at the voltages between 16kV and 20kV which are much lower than the dielectric strength of epoxy insulation (130kV/mm~150kV/mm). And also it is revealed that  $\Phi$ -q-n characteristics have been observed to be dependent upon the size of the artificial defects.

Throughout this work, the on site applicability of the self designed sensor has also been proved by comparing the results with those from the commercialized PD detector. And more one, considerable basic data regarding the insulation diagnosis could be provided to understand the presence of the voids possibly inserted into the epoxy insulation system of the power apparatus.

### 1. 서 론

1970년대 이후 변압기나 차단기, 옥외용 예자 및 부싱류의 절연재료로서 에폭시 수지는 전기적 기계적 성능이 우수하고 가공이 쉬워 널리 사용되어 고체 절연재료로서의 중요성이 높아지고 있다. 그러나 에폭시 수지의 제작과정이나 기기의 조립과정에서 발생하는 여러 형태의 결함에 기인된 운전 사고의 발생이 빈번히 보고되고 있고 사고예방을 위한 적합한 진단기법과 기초 실험 데이터 확보가 아직도 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 에폭시 고체 절연체에 발생될 수 있는 보이드 결함을 진단하기 위한 기초 단계로서 각종 형태의 보이드에서 발생하는 부분방전 패턴을 파악하고, 아울러 각종 화이트 노이즈가 존재하는 현장에서 부분방전 패턴 분석을 위하여 개발중인 고주파 부분방전 시스템을 적용한 측정도 시도하였다.

이러한 연구를 위해서 전력기기의 에폭시 절연층 내부에 형성 가능한 보이드를 모델링하여 시편을 제작하였으며, 이러한 결함 내부에서 발생하는  $\Phi$ -q-n 부분방전 패턴을 측정하고자 수백 kHz 대역의 부분방전을 측정할 수 있는 Haefely Tettex 571 부분방전 시험기와 자체 개발중인 고주파 대역 부분방전 측정기가 가능한 시스템을 적용하여 그 결과값 서로 비교하여 개발중인 시스템의 적용 가능성 여부도 파악하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험장치 및 방법

#### 2.1.1. 시험시편

실제적으로 에폭시 절연체 내부에 형성될 수 있는  $\mu\text{m}$  크기의 다양한 형태의 보이드를 인위적으로 일정한 형태와 크기로 형성시키는 것은 현실적으로 많은 어려움이 수반되므로 본 연구에서는 기초 연구로서 그림 1과 같이 시편을 제작하였다.

직경 25mm 인 전극을 에폭시에 함침하여 상부 및 하부 전극을 제작하였고, 전극사이에 보이드를 인위적으로 만든 평판 시편을 삽입하였다. 그리고 계면에서 발생될 수 있는 방전을 방지하고자 계면에 에폭시 본드를 이용하여 프레스로 압착한 상태에서 부착시켰다. 보이드가 없는 시료에 대한 부분방전 시험결과와 30kV 전압까지 부분방전이 발생하지 않았다. 따라서, 시편에 인가되는 전압이 30kV 이하이므로 계면에 의한 영향은 없는 것으로 사료된다. 제작된 보이드의 치수는 높이 1mm와 2mm이고 직경 1mm, 2mm, 3mm인 원통형이다.

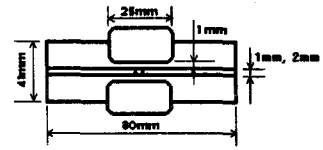


그림 1. 에폭시 보이드 시편

#### 2.1.2 실험장치

부분방전 측정을 위하여 상용화 되어있는 HAEFELY TETTEX 571 부분방전 검출 장치와 또한 자체적으로 개발중인 센서, 필터, 앰프와 오실로스코프로 구성된 측정 시스템을 동시에 이용하였다. 자체 제작중인 센서를 통해 얻어진 PD 신호는 자체적으로 제작한  $\Phi$ -q-n 분석 프로그램을 이용하여 비교 분석하였다. 실험장치 구성도는 그림 2와 같다.

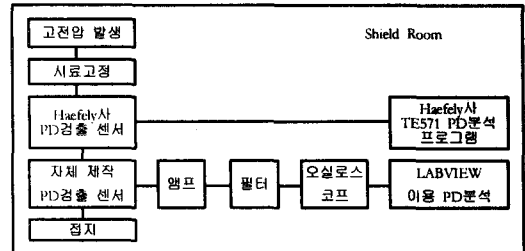


그림 2. 실험장치 구성도

#### 2.1.3. PD 검출 및 분석

##### (1) MHz 대역 PD 검출

현장 적용 가능 시스템 개발을 위하여 자체 제작한 CT type 센서의 주파수 응답특성을 측정하기 위해 합수 발생기의 정현파(전압 1V, 주파수 범위 1Hz ~ 21MHz)를 이용하여 제작된 센서를 통해 검출된 전압을 측정하였다. 그림 3의 결과에

의하여 센서의 최대공진점은 5MHz이고, 대역폭은 4~6MHz인 주파수 응답특성을 얻었다.

발생된 PD를 센서를 통해 검출하고, 검출된 PD는 오실로스코프 상에 전압으로 나타나므로, 오실로스코프 상의 전압과 발생된 PD 크기의 상관관계를 파악하기 위한 캘리브레이션이 필수적이다. 이를 위하여 Power Diagnostic사의 고주파용 캘리브레이터를 이용하여 PD량을 알고있는 보정필스를 발생시켜 제작된 센서로 측정하여 측정전압의 파크값과의 상관관계는 그림 4와 같고, 거의 선형적으로 증가됨을 알 수 있으며, 제작된 센서의 적용 가능성이 확인되었다.

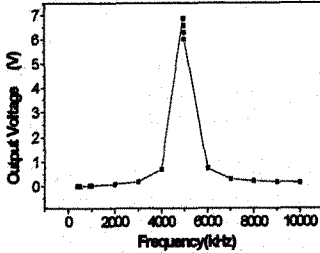


그림 3. 주파수 응답 곡선

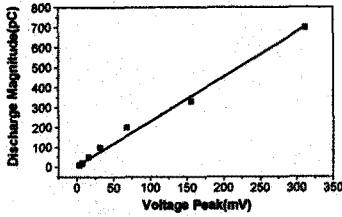
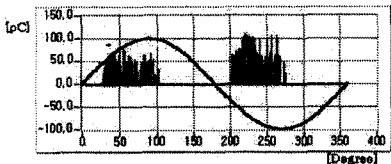
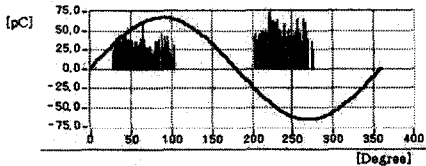


그림 4. 보정 곡선

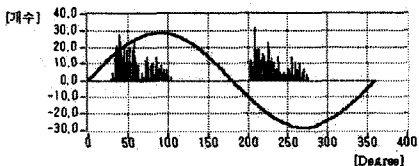
센서에서 측정된 부분방전 신호는 오실로스코프를 이용하여 측정하였고,  $\phi$ -q-n 분석 프로그램을 이용하여 방전량의 분포, 방전수, 방전개시전압을 분석하였다. 그림 5(a)는 1초 동안 측정된 위상에 따른 최대방전량, 그림 5(b)는 평균 방전량 그리고 그림 5(c)는 방전수이다.



(a) 최대방전량



(b) 평균방전량



(c) 방전수

그림 5. 현장 적용 가능 시스템의  $\phi$ -q-n 분포

## (2) 수백 kHz 대역 PD 검출

HAEFELY TETTEX 571부분방전 검출기는 수백 kHz 대역의 부분방전을 측정하며, 그림 6은 2분동안 측정된  $\phi$ -q-n 분포이다.

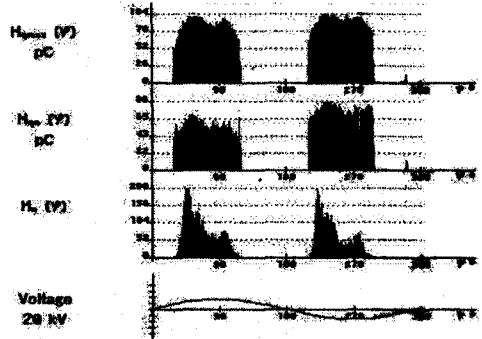


그림 6. TE571을 이용한  $\phi$ -q-n 분포

## 2.2 결과 및 고찰

측정 주파수 대역이 다른 두가지 방법으로 검출한 PD의  $\phi$ -q-n 방전 패턴을 비교 분석하였고, 보이드의 형태에 따라서 부분방전 개시전압, 방전량과 방전수의 양상을 분석하였다.

### 측정 주파수 대역별 $\phi$ -q-n 방전 패턴 비교

그림 5와 그림 6은 높이 1mm 직경 1mm의 보이드가 삽입된 시편에 20kV 전압을 인가한 상태에서 각각 두가지 시스템을 이용하여 동시에 측정된 시험결과이다. 그림 5와 6의 차이는 측정시간과 적용된 측정 시스템의 특성 차이에 기인된 것이며, 두 결과의  $\phi$ -q-n 특성에 차이점은 없는 것으로 판단된다. 따라서, 자체 제작중인 PD 검출 및 분석 시스템의 현장 적용 가능성을 제시하고 있다.

### 부분방전 개시전압

표 1 보이드의 크기에 따른 부분방전 개시전압

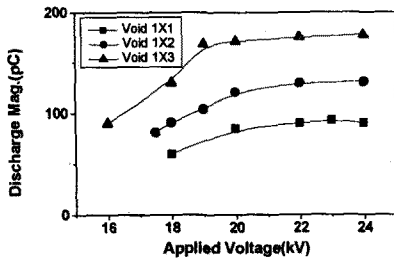
보이드 크기	부분방전 개시전압	보이드 크기	부분방전 개시전압
1×1	18	2×1	20
1×2	17.5	2×2	19
1×3	16	2×3	16

\* 높이×직경 [mm], 전압 [kV]

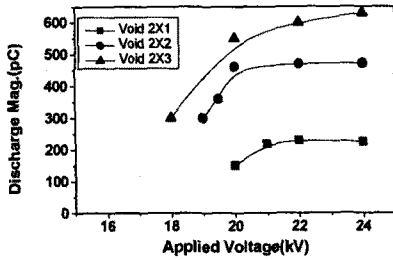
부분방전 개시전압은 각 보이드 치수별 16 ~ 20kV의 분포를 가지고 시험결과에 약간의 차이를 보이고 있지만, 그 차이를 구분하기는 힘들다. 이는 좀더 다양한 결합에 대한 모의 실험을 통하여 더욱 명확하게 판별해야 한다고 사료된다.

### 부분방전량(q)

그림 8(a)와 (b)는 보이드의 높이가 1mm와 2mm인 경우로서, 부분방전량은 높이가 클수록 직경이 넓을수록 더 큰 방전량이 발생되고 일단 방전이 개시되면 초기에는 전압을 증가시키면 따라 방전량이 증가하지만 점차 포화되는 경향이 나타난다. 또한 그 이상의 전압이 인가되면 방전량의 증가는 급격히 둔화되고 방전이 발생하는 위상 범위가 점진적으로 넓어진다.



(a) 높이 1mm인 경우



(b) 높이 2mm인 경우

그림 8. 전압에 따른 부분방전량

방전수(n)

그림 9는 각종 보이드와 인가 전압에 따른 방전수로서, 높이 1mm일 때가 높이 2mm일 때보다 많은 방전수를 보여주고 있으며, 공통적으로 직경이 커지고, 전압이 증가함에 따라 방전수도 증가했다.

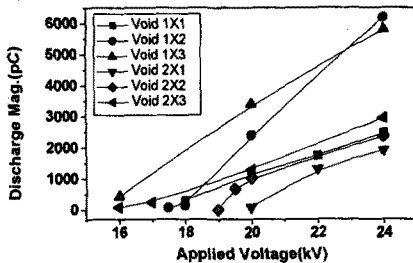


그림 9. 방전수 분포

방전 위상(φ)

다양한 크기의 보이드를 이용하여 부분방전 시험을 수행한 결과, 공통적으로 처음 PD 개시시의 방전위상은 그림 11과 같이 90°, 270° 위상에서 발생하였다. 그러나 인가전압 상승에 따라 그림 12와 같이 방전 위상이 0°, 180° 쪽으로 위상이 이동됨을 알 수 있다. PD가 나타나는 방전위상은 1/4, 3/4주기에서 나타나고, 방전 펄스의 크기는 거의 일정하다.

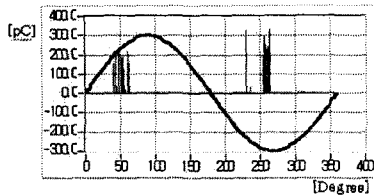


그림 11. PD 개시시 방전위상

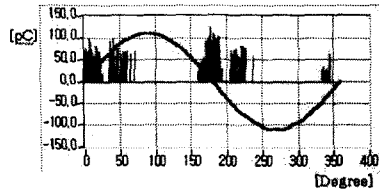


그림 12. 전압이 높은 경우 방전위상

3. 결 론

본 논문에서는 에폭시 고체 절연체에 존재할 수 있는 보이드 결합에 의한 부분방전 특성에 대한 고찰을 하기 위하여 다양한 크기의 보이드를 모의한 시료를 제작하여 φ-q-n 부분방전 분포를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 에폭시 고체 절연체 내부에 보이드가 존재하는 경우 부분방전 개시전압은 에폭시의 절연내력 (130kV/mm~150kV/mm, Araldite사 Spec.)보다 현저히 낮은 전압에서 개시된다.
2. φ-q-n 방전분포
  - 보이드의 높이가 클수록 직경이 넓을수록 부분방전량이 크게 나타나고, 인가전압을 증가시키면 초기에는 증가하지만 전압이 증가함에 따라서 증가는 급격히 둔화된다.
  - 방전 발생 위상은 전압 증가에 따라 점진적으로 증가하면서 0°, 180° 쪽으로 위상이 변화했다.
  - 방전수는 전압이 증가함에 따라 선형적인 증가를 보이고, 보이드의 높이가 작고, 직경이 클수록 많은 방전수를 보였다.

이러한 결과는 각종 모의결합에 대한 기본적인 판단기준을 마련해줄 것으로 기대되며, 전력기기를 진단할 때 결합의 형태를 분별함에 있어 유용하리라 생각된다.

향후 전력기에서 발생하는 실제 형태의 보이드를 모델링하고 효과적인 부분방전 패턴을 추출할 수 있는 연구와 각종 노이즈가 존재하는 현장에서 부분방전을 측정할 수 있는 연구가 수행되어야 하는 것이 필수적이라고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.S.Shin, M.K.Han, J.H.Lee, B.K.Lee and Y.H.Ohk "The Effects of the Distribution Pattern of Multiple Voids within LDPE on Partial Discharge Characteristics" IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp142-145, June 16-19, 1996
- [2] S. Tsuru, et al., "Partial Discharge Degradation of Solid Insulators with an Air-Filled Void at Liquid Nitrogen Temperature" IEE High voltage Engineering Symp. 22-27 August 1999, Conference Publication No. 467
- [3] G. Mitra, B. Salvage, "Electric stress in a circular cylindrical gaseous cavity in a solid dielectric, the axis of the cylinder being parallel to the field", Proc. IEE., Vol. 113, pp. 931-935, 1966
- [4] Kai Wu, Yasuo Suzuoki, "Effects of Discharge Area on PD Patterns in Voids", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999.
- [5] F. H. Kreuger, "Industrial High Voltage", Delft University Press, 1991, 1992, 1995.