

# Mica/Epoxy 복합 절연계통의 부분방전 특성과 열화 관계에 관한 연구(I)

강동식\* · 이우영\* · 박정후\*\* · 곽영순\*\* · 김길용\*\*\*

한국전기연구소 · 부산대학교 전기공학과\*\* · 한전기술연구원\*\*\*

## A Study on the Relationship between Aging and Partial Discharge Characteristics of the Mica/Epoxy Composite Insulation Systems (I)

D.S.Kang\* · W.Y.Lee\* · C.H.Park\*\* · Y.S.Kwak\*\* · K.Y.Kim\*\*\*

Korea Electrotechnology Research Institute\*

Pusan National Univ.\*\* · KEPCO\*\*\*

### Abstract

There are lots of problems which are delaminations and partial discharge of insulation materials in high-voltage rotating machines caused by mechanical, electrical and thermal aging. Several experiments have been aiming at finding the useful diagnostic parameters from the partial discharge characteristics by applying a new measurement techniques.

This paper deals with the partial discharge characteristics (pulse height, pulse angle, pulse frequency spectrum and time interval), which may be a useful diagnostic concept in predicting insulation condition of mica/epoxy composite insulation materials, by using several measurement equipments (frequency spectrum analyzer, multichannel analyzer and time interval analyzer).

### 1. 서론

Mica를 이용한 복합 절연재료는 전기적, 기계적 및 열적 특성이 우수하여 고압 전기기기의 주절연재료로서 현재에도 널리 이용되고 있다. Mica의 우수한 성능을 충분히 이용하기 위한 기술의 진보에 따라 mica flake에 합성수지 첨가한 mica paper가 개발되었으며, 최근에는 epoxy 수지를 이용한 mica/epoxy 복합 절연재료의 사용이 고압 회전기기의 주종을 이루고 있다. 1) 4)

고압 회전기기의 mica/epoxy 복합 절연물은 산화현상에 의하여 polymer의 chain이 끊어져 기계적 강력이 줄어들고 고온상태에서 절연재료의 물리적, 화학적 특성이 변화하는 등의 열적열화 요인, 고전압 상태하에서 운전됨으로 인하여 절연체 내의 공동(void)에서 부분방전을 일으켜 void 크기가 증가되고 향후 박리(delamination) 현상으로 진전되는 전기적 열화요인, 기동정지시의 전지력, 운전중의 진동 및 부하전류의 변화에 따른 열 cycle에 의한 기계적 응력에 의하여 특히 절연물 단말부에 급힘용력이 집중반복되고 절연층에 균열 및 박리를 발생되게하는 기계적 열화요인 및 화학약품, 기름, 분진오손, 습기등에 의한 환경적 열화요인등의 복합적 열화요인에 의하여 절연내력이 점차 떨어지게 된다. 2) 3) 4)

따라서, 본 연구에서는 고압 회전기기의 안전운전과 수명판단에 직결되는 mica/epoxy 복합 절연계통의 열화현상을 파악하기 위하여 여러가지 새로운 부분방전 측정기법(pulse height, pulse angle, pulse frequency spectrum, pulse time interval 등)을 통하여 가속 열화시간에 따른 시료의 부분방전 특성변화를 연구 분석하여 가장 적절한 열화 관련 인자를 찾아내어 절연계통의 수명예측 기술을 확립하고자 한다.

### 2. 시험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 시료의 주절연은 현재 고압 회전기에서 가장 많이 이용되고 있는 epoxy 수지에 mica flake로 만든 mica paper를 합친시킨 것으로, 일본 Mitsubishi Electric Co.에서 제작하였으며 권선의 표면처리 상태 및 단면형상은 그림 1과 같으며, 시료의 절연두께는 4.6 mm이고 정격전압은 18 kV 이다.

본 연구에서는 고압 회전기기의 복합 절연재료에서 열화를 촉진시키는 각종 열화요인 중 주열화요인으로 판단되는 전기적, 기계적 및 열적 열화요인을 복합적으로 작용하게 하여 절연재료의 열화를 가속시켜 부분방전의 변화상태를 파악하고 적절한 열화 인자를 찾기위하여 그림 2와 같은 가속 열화 장치를 제작하였다. 가속열화 방법은 시료 절연물 양단을 지지체자로 고정하고, 시료 중앙 절연물 외측에 철재로 제작한 slot model을 고정시키고, 시료 절연물의 온도가  $100 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 slot 외부의 양쪽에 각각 220V/400W의 평판 heater를 부착하였다. 또한 전체 시료(6개)의 1/2(3개 시료)은 동일 진동축상에 있도록 하였으며, 이진동축은 감속기가 부착된 motor에 연결되어 진동수 6Hz 진폭  $\pm 2\text{mm}$ 로 기계적 진동이 가해지게 되어 있다. 전기적 열화 가속상태는 그림 1에서 보는 바와같이 권선단 말부에 corona suppression paint를 약 360  $\mu\text{m}$ 씩 도포하여 열연방전이 발생되지 않도록 준비된 상태에서 시료용 절연물의 정격전압 ( $E : 18\text{KV}$ )의 2배에 해당하는 35KV의 전압을 교류 60 Hz로 연속 인가 하였다.

가속열화중 절연열화 상태를 주기적으로 측정하기 위하여 매 300시간의 가속열화 시험마다 측정을 하여 시험 데이터를 수집하였으며, 이를 위하여 구성된 측정시스템의 전체구성도는 그림 3과 같다. 측정항목은 부분방전의 주파수에 따른 특성 분석, 부분방전의 크기 및 발생량 분석, 부분방전의 발생위상의 변화분석 및 부분방전 pulse의 발생

interval과 발생량 분석에 중점을 두었으며 또한 일반적 off-line 측정방법인 상용 부분 방전시험 및 유전정점 시험을 병행하여 비교 분석하기로 하였다.

이에 이용된 주 측정기기는 다음과 같다.

- 1) Spectrum Analyzer (HP, model 8560A)
- 2) Pulse Height Analyzer (Canberra, model 35)
- 3) Multichannel Analyzer (Canberra, model 35)
- 4) Time Interval Analyzer (Canberra, model 2120, 2145)
- 5) Normal PD Detector (Tettex, model 9124)
- 6) Schering Bridge (Tettex, model 2876)

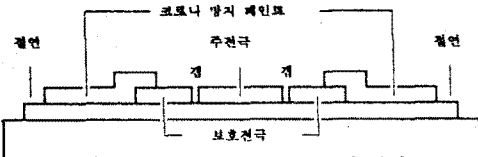
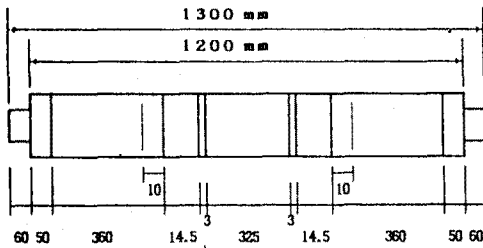


그림 1. 시험시료의 표면 처리 상태

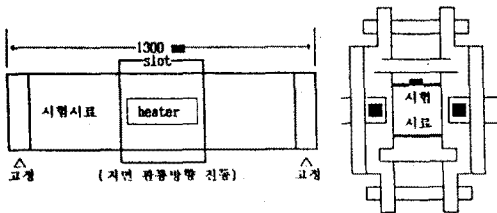


그림 2. 가속열화 장치의 권선과 슬롯의 개략도

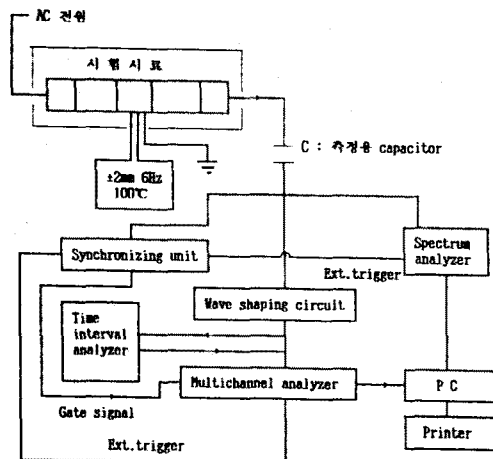


그림 3. 부분방전 측정 계통 흐름도

표 1. 가속열화 시험 상태

열화 조건	열화 상태			
열적열화(100°C)				
기계적 열화 (6Hz, ±12mm)				
전기적 열화 (35KV)				
측정시기	●	●	●	●
전기적+열적시료	#3, #4, #5			
전기적 + 열적 + 기계적시료	#1, #2, #6			
열화 시간	300	600	900	1200

### 3. 시험결과 및 분석

본 연구에서 현재까지 진행된 900 시간의 가속열화 시험 조건 및 시험진행 상태는 표 1에 나타난 것과 같이 전체 6개(진동용:3개, 비진동용:3개) 시료가 모두 비파괴 상태로 계속 시험진행 중에 있다. 지금까지 나타난 중요 시험결과를 가장 일반적인 한 형태인 시료 2번의 시험 분석 결과를 통해 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.1 주파수 분석결과

초창기의 시험에 있어서는 측정 주파수를 2 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz 및 25 MHz로 시험을 행하였으나 15 MHz 이상의 주파수 성분에서는 부분방전의 크기 및 위상 분포의 변화추이가 잘 관측되지 않아 span 0의 상태에서 center frequency를 2 MHz, 5 MHz 및 10 MHz로 두고 시험을 진행하였다. 그림 4는 Spectrum analyzer model HP 8560A를 이용하여 측정된 각종 주파에 대한 부분방전 pulse의 크기 및 위상분포 중 2 MHz 및 5 MHz 성분을 나타낸 것이다.

이를 살펴보면, 첫째, 열화 900 시간 대의 부분방전 최대크기가 초기상태보다 20 dB 정도 증가된 것을 알 수 있다. 여기서, 주파수 특성단위 dB은

$$dBm = 10 \log (P_2/P_1) = 20 \log (V_2/V_1)$$

즉, 신호전압(V)의 크기가 2배 증가하면 6 dB의 크기차가 발생되고, 신호전압이 10배 증가하면 20 dB의 신호증가가 일어남을 알 수 있다.

둘째, threshold level을 -50 dBm에 두고 살펴본 부분방전의 발생위상은 초기상태에 비하여 열화상태에서 40° 정도 더 넓은 것을 알 수 있다. 이것은 열화 상태의 진전에 따라 부분방전의 크기가 증가하고 부분방전 발생위상이 넓어진다는 일부 시험결과와 일치하고 있다.⑥)

#### 3.2 방전크기 분석결과

그림 5는 Canberra model 35를 이용한 부분방전 크기 및 개수의 변화추이를 나타내었다. 이를 살펴보면, MPPD (Maximum Magnitude of Partial Discharge : 부분방전 최대 크기 ; 부분방전 최대 peak치의 10번째 data)<sup>5)</sup>는 가속 열화 진행에 따라 증가하고 있으며, 특히 부극성에서의 MPPD가 정극성보다 크게 나타나고 있다. 단, 열화 300 시간 대의 MPPD 값이 초기상태보다 적게 나타난 것은 시료의 안정화 단계라고 생각된다.

### 3.3 방전위상 분석결과

부분방전 위상의 분석 인자로는 DIA(Dynamic Inception Angle : 부분방전 발생위상 ; 100 번째 부분방전이 나타나기 시작한 위상) 및 DEA(Dynamic Extinction Angle : 부분방전 소멸위상 ; 부분방전이 소멸하기전 100 번째 부분방전이 나타난 위상)<sup>5)</sup>의 열화시간에 따른 변화추이를 판단하는데 있다. 그림 6은 상용주파 위상에 따른 부분방전의 변화추이를 Canberra model 35를 이용하여 측정된 것이다.

이를 살펴보면, 열화 300 시간대인 안정화 단계에서는 초기상태에서보다 부분방전 발생 위상폭(DIA - DEA)이 좁아졌으나, 열화 300 시간대에서 600 시간대로 열화 상태가 변화함에 따라 부분방전 발생 위상폭이  $-35^{\circ} - 70^{\circ}(170^{\circ} - 245^{\circ})$ 에서  $-5^{\circ} - 110^{\circ}(170^{\circ} - 275^{\circ})$ 로 다시  $-15^{\circ} - 110^{\circ}(155^{\circ} - 280^{\circ})$ 로 변화된 것을 알 수 있다. 이는 열화가 진행됨에 따라 DIA 및 DEA가 변화하는 즉 부분방전 발생 위상폭이 넓어지는 것을 알 수 있다.

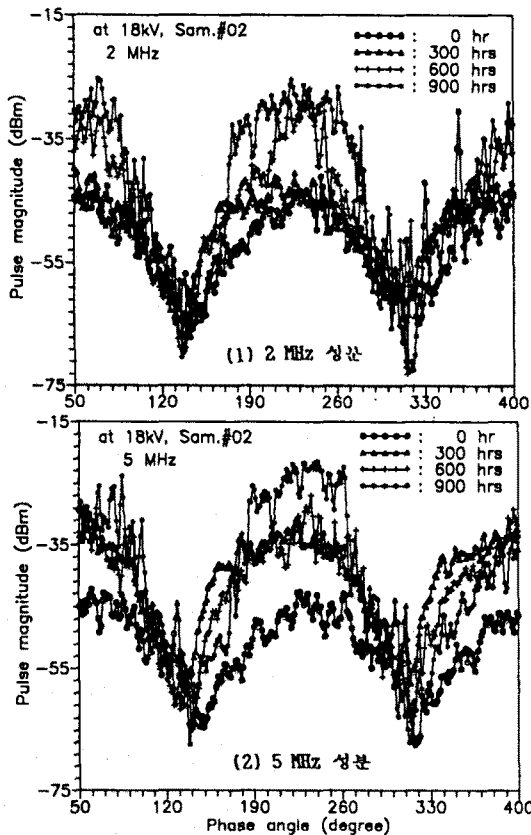


그림 4. 부분방전 펄스의 주파수 시험 결과

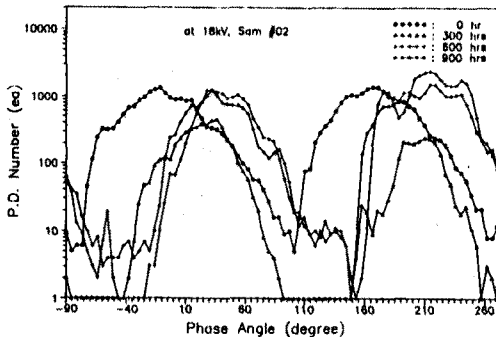


그림 6. 부분방전 위상 시험 결과

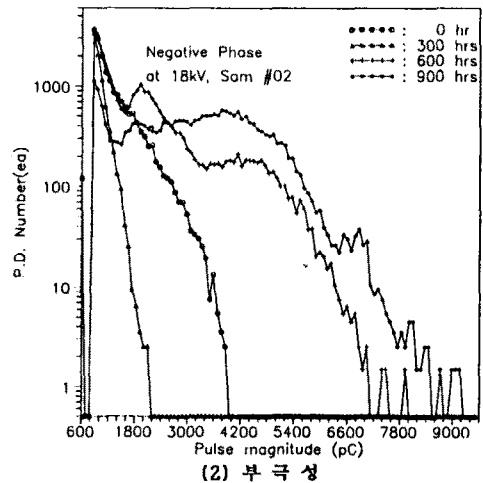
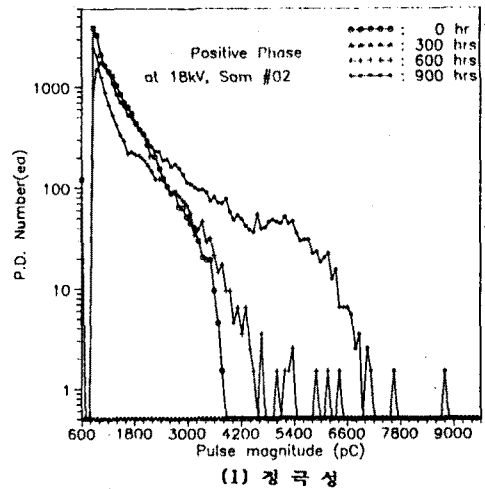


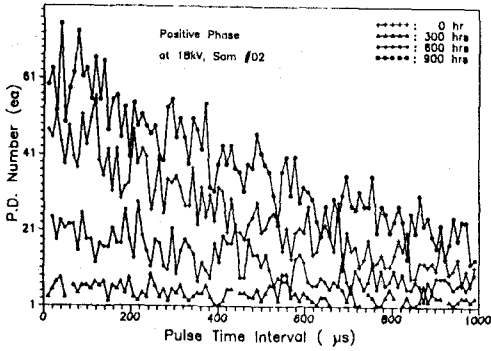
그림 5. 부분방전 크기 시험 결과

### 3.4 방전간격 분석결과

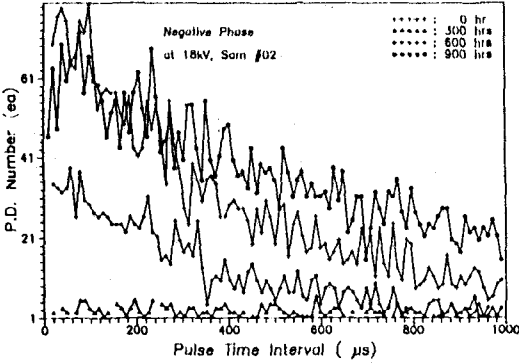
그림 7은 부분방전 발생간격을 나타 낸 것으로 정극성보다 부극성에서 부분방전 발생량이 많은 것을 알 수 있으며, 열화 상태가 진행됨에 따라 부분방전 발생량이 많아지며 특히 발생간격이 좁은 영역 일수록 발생량의 증대 정도가 많아져 전체적 기우기가 변화함을 알 수 있다. 이는 시료의 열화 진전에 따라 적은 크기의 부분방전이 많이 발생됨을 알 수 있으며, 큰 크기의 부분방전도 증가되어 복합적으로 나타남을 나타 낸다.

### 3.5 상용 부분방전 크기 및 유전정전 분석

그림 8과 9는 Tettex PD Detector 및 Tettex Schering Bridge로 측정된 시험결과를 나타낸 것이다. 이는 현재 고전압 시험에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 시험기법으로 앞서 시험한 시험결과 등과 비교하기 위하여 실시하였다. 이를 살펴보면 초기 상태에서 열화 300 시간대까지는 열화의 진전이 약하게 나타나다가(안정화 단계) 열화 600 시간대부터 시료의 열화가 상당히 진행되고 있는 것 알 수 있다.



(1) 정극성



(2) 부극성

그림 7. 부분방전 발생간격 시험 결과

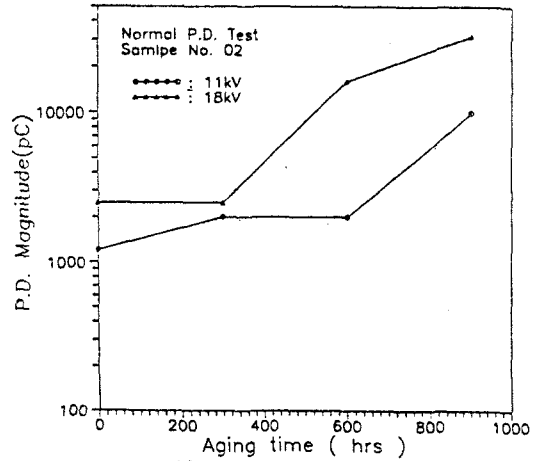


그림 8. 상용 부분방전 크기

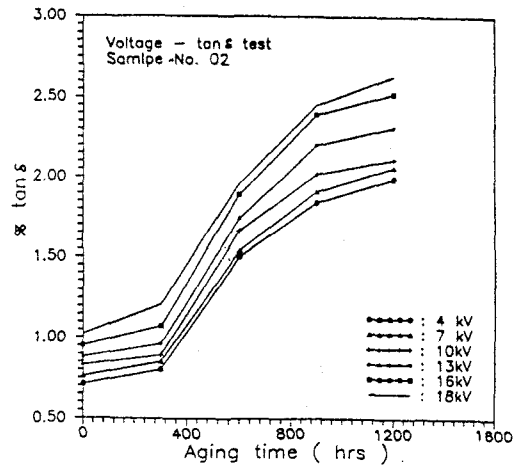


그림 9. 유전정접 시험 결과

#### 4. 결론

본 연구에서는 절연열화의 진행 상태에 따라 변화되는 부분방전의 여러가지 특성 인자를 파악하기 위한 시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2MHz 및 5MHz의 주파수 분석은 향후 시험이 완료되면 부분방전의 크기 및 위상용 동시에 측정할 수 있는 유망한 방법이 될 것이다.
- 2) 방전크기, 방전위상 및 방전간격에 대한 시험의 진행상태로 보아 이들의 변화추이도 열화 판단의 좋은 인자가 될 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- 1) 特別高壓回轉機の劣化診断技術調査専門委員会, "特別高壓回轉機の絶縁劣化診断技術", 日本電氣學會技術報告 (II部) 第267號, 1988.
- 2) 固體絶縁物絶縁劣化判定試驗法調査専門委員会, "絶縁劣化診断試驗方法", 日本電氣學會技術報告 (II部) 第182號, 1985.
- 3) 發電機捲線絶縁劣化判定基準委員會, "發電機捲線絶縁劣化判定基準", 日本電力中央研究所技術研究報告 No.67001, 1968.
- 4) I.M.Culbert, H.Dhirani and G.C.Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines (Volume 16)", EPRI publication EL-5036, 1989.
- 5) Y.J.Kim, "Partial Discharge Spectroscopy for Insulation Diagnosis", RPI Press, New York, 1987.
- 6) M.Henriksen and et al., "A New Method for Testing Organic Materials' Resistance to Partial Discharge.", Conference Record of 1984 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1984.