

# 마이카 - 에폭시 복합재료의 계면에서의 절연파괴특성

## Insulating Breakdown Properties at Interface Layer in Mica - Epoxy Composite Material

김태성\* · 구할본\* · 이은학\*\* · 임장섭\*

( Tae-Seoung Kim · Hal-Bon Gu · Eun-Hak Lee · Jang-Seob Lim )

### 요 약

본 논문에서는 내부전극을 갖는 마이카-에폭시 복합재료의 계면정합상태에 따른 계면층에서의 절연파괴특성에 대해 조사 연구하였다. 실험결과, 계면은 이상수지층으로 작용되며 마이카는 계면결합제와의 화학적반응 및 흡착에 의해 친수성이 적어짐을 확인 하였고 또한 계면의 정합상태는 계면결합제의 수용액 농도에의해 좌우 되었다. 계면정합이 불량하면 인가전압의 상승에 따라 부분방전량의 증가 및 발생빈도의 직선적인 증가 특성이 보이며 계면정합이 양호한 경우는 방전량이 포화되는 시점에서 발생빈도는 지수함수적으로 증가되었다.

### ABSTRACT

In this paper, insulating breakdown properties at interface layer in mica-epoxy composite material were investigated and studied on interface specimens which has internal electrodes. As a result, it has been conformed that the interface exists as abnormal resin layer and the intimacy for water at the surface of mica has a tendency to decrease by chemical reaction and absorption with a coupling agent. And the contact condition at the interface is depended upon the density of silane aqueous solution. Pulse frequency of discharge at abnormal interface has been shown a linear increasing with enlargement of discharge quantity according to rising of the applied voltage, whereas, in case of normal interface, pulse frequency represented exponential increasing at the saturating point of discharge quantity.

\* : 전남대학교 전기공학과

\*\* : (주)삼안건설 기술공사

1. 서론

고전압 기기의 절연계통은 지난 수 세기 동안 많은 발전을 이루어 아스팔트와 셀락에서 불포화 폴리에스터로 대체되어 왔고 현재는 높은 절연 강도, 안정된 열특성 및 우수한 성형성으로 인해 에폭시 수지가 널리 사용되고 있다. 특히, 고전압 코일절연은 마이카-에폭시 복합 절연이 주류를 이루고 있으며 종래는 마이카 테이프에 에폭시 수지를 진공하에서 가압함침하는 방법이 중심이었으나 최근에는 집성 마이카를 에폭시 수지에 함침하여 반경화한 테이프를 프레스 성형하는 방법으로 이행되어 왔다. 그러나 마이카는 극성이 강하고 친수성을 갖고 있어 에폭시 수지와 계면에 부정합이 생기며 마이카 자체의 이방성 및 벽개성 때문에 마이카-에폭시 복합재의 수지 계면층에서의 전기전도 및 절연파괴 현상은 수지층과는 다른 특이한 파괴기구를 갖게 된다.

계면이란 2개의 상이 접촉되어 있는 경계면을 말하며 계면의 전기적 성질은 이중층 전위외의해 지배된다.<sup>1)</sup> 전기 이중층의 개념은 19세기말 Helmholtz 에 의해 도입된 이래 응용분야에서의 계면현상에 대한 연구는 1969년 J. C. Halpin<sup>2)</sup> 이 이상적인 계면반응으로 혼합방법론을 발표하므로써 본격적인 계면연구가 시작 되었다.

이후, G. Lister<sup>3)</sup> 와 K. Kadotani<sup>4)</sup> 등에 의해 마이카-에폭시 복합재의 계면에서의 유전특성이 보고되었으며, 1982년 T. Tanaka<sup>5)</sup> 는 부분방전의 새로운 처리방법으로서 사이클 평균 위상-방전량 특성을 제시하므로써 계면현상의 해석에 부분방전을 이용한 연구들이 활발하게 이루어지기 시작하였다.

그러나 계면에 대한 연구는 계면특성을 향상시키기 위한 계면 결합제와의 처리방법등과 병행하여 연구가 되어 왔으나 계면의 결합반응은 아직 많은 가설들로 남아 있는 실정이다. 특히, 마이카-에폭시 복합재는 기기절연의 응용분야로서 적용되는 기기에 따라 제조공정에 의한 특성변화가 다양하다. 지금까지의 계면연구는 주로 마이카를 분말 또는 다층구조로 하여 분포된 계면특성에 대해 추론하는 형식으로 연구가 이루어져 현상적으로나 이론적으로 규명해야 할 부분

이 많이 있다. 본 연구에서는 이점에 착안하여 마이카와 에폭시 수지를 이층구조로한 계면시료를 제작하여 유전특성, 누설전류시험, 절연파괴시험 및 부분방전 실험을 행하고 결과를 고찰하므로써 계면에서의 절연파괴특성을 규명하였다.

2. 실험 및 방법

2-1 시료제조

본 실험에서 사용된 시료모델은 실험목적 및 용도에 따라 복합재를 단일상 시료, 마이카-에폭시 복합시료, 복합시료의 계면층에 원-원 전극을 부착한 계면시료로 구분하였다. 마이카 시료는 천연 마이카인 경질마이카 (Muscovite mica, 이하 M-마이카)와 연질마이카 (Phlogopite mica, 이하 P-마이카)를 사용하였다. 마이카 시료는 2.5 [cm] X 1.0 [cm] X (100-200) [ $\mu$ m] 의 크기로 벗겨내어 절단하고 한쪽 면에는 직경 5-6 [mm] 크기의 원-원 전극을 은-페인트로 도포하였다. 전극을 도포한 시료들은 온전극이 견고하게 부착되도록 약 24 [Hr] 동안 자연건조시켰다. 마이카에 흡착되어 있는 수분 및 결정수를 제거하기 위하여 550  $\pm$  10 [ $^{\circ}$ C] 의 전기로 (국제리화학계 T-F 형) 에서 약 30 [min] 간 열처리 하였고, 열처리 중에 시료 표면에서 산화가 발생하지 않도록 질소가스 중에서 시행하였다. 전극을 부착한 마이카 시료는 에폭시수지와 결합반응을 향상시키기 위해 에폭시 실란 결합제 (Silane Coupling Agent, 일본, 信越, SILICON계, KBM 403) 의 수용액에 침적법으로 처리한 후 120 [ $^{\circ}$ C] 에서 10[mm]간 전기건조로에서 풍건하였다. 에폭시수지는 비스페놀 A 와 에피클로로히드린을알카리용액 중에서 축합시킨 DGEBA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) 계열의 에폭시 YD-128 을 사용하였고, 경화제로는 산무수물인 MNA (Methylnadic Acid)를 혼합하고 경화촉진제로 3급 아민 BDMA (Benzyl Dimethyl Amine)를 첨가하였다. 수지의 배합비는 중량비 100:85:3 [Wt. %]로 하였다. 혼합된 액상수지는 10 [min] 이상 충분히 저온 다음 보이 드 방지를 위해 약 30 [min] 간 실온에서 1 차 진공처리 한 후 실란으로 표면처리한

마이카의 전극부착면에 액상의 혼합 수지를 도포하고 도포중 발생한 미세기포를 제거하기 위해 60(°C)로 예열한 진공 경화로내에서 약 30(min)간 2차 진공 처리를 하였다. 진공은 1, 2차 모두 약 0.92 (Torr)로 하였으며 경화처리는 120(°C)에서 1(Hr) 전경화 하고 150(°C)에서 1(Hr)후경화를 시행하였다. 그림 1은 계면시료의 개략도이다.

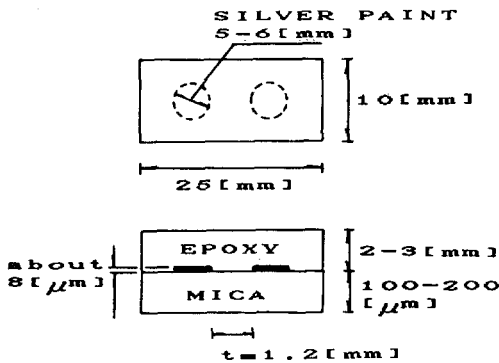


그림 1. 계면시료의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of interface specimen

전극은 극간격 0.5-2.5(mm)로 부착하고 누설전류, 절연과피 및 부분방전 특성 측정용 계면시료는 극간격을 1(mm)와 2(mm)로 하여 에폭시 수지를 도포한후 경화시켰다. 도포한 원전극의 전극 두께는 약 8(μm)정도이며 경화후의 복합시료와 계면시료 두께는 약 2-3 (mm)이다. 실험에 사용된 계면시료의 종류는 마이카 표면처리의 실란농도에 따라 표1 과같이 분류하였다. 시료번호 만으로 표면처리 조건이 쉽게 식별되도록 마이카의 종류는 P와M으로 구별하고, 실란의 농도는 숫자를 첨자로 표시하였다.

2-2. 실험방법

유전특성은 실온(23-26(°C)) 에서 측정하였으며, 측정장치는 고속측정 기능을 가진 LCZ Meter (YOKOGAWA제, 4277A)와 퍼스널 컴퓨터 (EPSON, PC 286 CD), 프린터를 고주파에서 정확도가 요구되는 측정에 큰 이점을 가진 4 단자대 (Four Terminal Pairs) 법으로 구성하였다.

표 1. 계면시료의 종류

Table 1. Kinds of Interface Specimen

Sample Number	Micas	Silane Density (Wt.%)
Ps	Phlogopite mica	0 (No Treatment)
Ps2	ditto	0.5
Ps4	ditto	1.0
Ps5	ditto	1.5
Ps6	ditto	2.0
Ps7	ditto	2.5
M2s	Muscovite mica	0 (No Treatment)
M22	ditto	0.5
M24	ditto	1.0
M25	ditto	1.5
M26	ditto	2.0
M27	ditto	2.5

P-마이카, M-마이카 및 경화된 에폭시 수지의 단일성 소재 두께는 각기 0.11, 0.21 및 2.4(mm)로서 크기는 20x20(mm)로 하여 양면에 은페인트로 직경 12(mm)의 원전극을 도포하고 측정용 시료홀더에 장착하여 측정하였다. 측정주파수범위는 10-1,000(KHz)로 하였다. 직류누설전류 측정은 계면시료의 한쪽 원전극에 0-10(KV)의 부극성 직류전원(일본 측기계 직류 안정화 전원 PH-10 AKN형)으로부터 직류전압을 인가하고 다른쪽의 원전극은 미소전류계 (Electrometer, Adeven Test사, TR-84M형)를 통하여 접지하였다. 측정용 시료는 전기항온조(Fine Oven, Yamamoto사, DF-42형)을 이용하여 측정분위기 온도를 26±0.4(°C)로 유지하였으며 시료에 가깝게 금-콘스탄탄 열전대를 설치하고 미소전류계 및 열전대의 지시는 팬-레코더(National사, VP-6531A형)로 상시 기록하였다. 절연과피 및 부분방전 특성시험은 실온의 실리콘유 중에서 그림 2와 같이 현미경(Olympus, MTV-3형), CCD카메라(Victor, TK-310형), 비디오 및 모니터를 설치하여 화상시스템을 구성하고 실험상태를 관찰하면서 시험하였다. 부분방전 펄스는 오실로스코프를 통하여 상시 관찰하면서 방전용량이나 발생 빈도등 부분방전의 특성량은 부분방전 분광 분석장치 (Partial Discharge Spectral Analysis Device, MS/SPAC 120형)를 이용하여 측정하였다. 측정계에서 결합콘덴서 C<sub>k</sub>는 2,000 (μF)로 선정하고 측정전 펄스 제너레이터 (일본 측측기계, NPG-2형)를 이용하여 교정하였다.

마이카-에폭시 복합재료의 계면에서의 절연파괴 특성

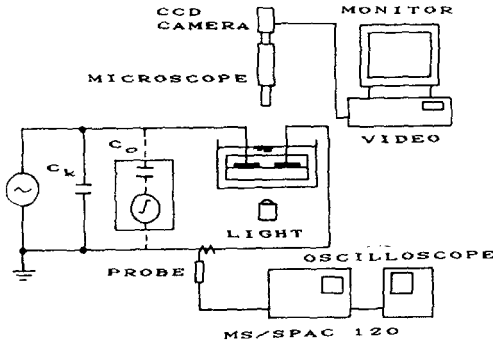


그림 2. 절연파괴 및 부분방전 특성 측정 계통도

Fig. 2. Measurement processing diagram of insulating breakdown and partial discharge

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마이카의 물성 및 전기적 특성

친수성은 정적법으로 적하 5[min]후 접촉각을 측정하고 결과를 표 2에 나타내었다.

실험결과, 수적의 접촉각은 전혀 마이카의 표면처리를 행하지 않은 경우의 P-마이카가 M-마이카보다 1.55배의 크기를 가지므로서 친수성이 작음을 확인할 수 있었으며, 이 결과는 마이카의 분자구조에서 외각의 Si가

표 2. 마이카의 액적의 접촉각

Table 2. Contact Angle of Liquid Drops in Micas

Surface Treatment		Micas	Liquid Drop [degree]	
Heating	Silane		Water	Epoxy
No Treatment	No Treatment	Muscovite	20	24
		Phlogopite	31	22
550[°C] 30[min]	No Treatment	Muscovite	25	27
		Phlogopite	39	25
	Silane 3[Vt. %]	Muscovite	52	30
		Phlogopite	61	29

SiO<sub>2</sub> 로 되려하는 친수성을 갖고며, M-마이카는 8개의 양이온을 갖고있는 반면 P-마이카는 7개의 양이온을 갖고있어 M-마이카가 극성이 강함을 알 수 있다. 열처리만을 행한 경우 처리하지 않은 경우보다 M-마이카

와 P-마이카 모두 약 0.25 배 정도 수적의 접촉각이 커짐을 알 수 있었다. 이것은 열처리에 의해 마이카 표면에 흡장된 수분 또는 결정수가 증발하므로 젖음특성이 다소 억제된 것으로 판단된다. 반면 열처리후 실란처리를 한 경우 M-마이카는 약 2.5배, P-마이카는 약 2배 정도로 큰값을 나타내므로 친수성이 급격히 감소하는것을 보여주고 있다. 이것은 계면결합제가 수지와 화학적으로 반응하기 때문에 열처리 후에도 잔류한 OH기가 해리되어 결합제의 Si기와 결합하며 또한 화학적 흡착으로인하여 마이카 표면의 손상부를 피복하여 물에의한 침식으로부터 보호 하는것으로 생각된다. 표면처리 여부에 관계없이 에폭시 수지는 별로 변화하지 않는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 에폭시 수지는 어느 경우에도 쉽게 젖는 특성이 있음을 알수있다. 마이카의 관측방향으로의 절연파괴 특성은 12.5 [mm]의 구-구 전극간에 시료를 삽입하고 실온의 실리콘유중에서 양 전극간에 교류전압을 승압속도 0.5 [KV/sec]로 인가하여 관통파괴가 발생할때의 전압을 두께에 따라 측정한 결과를 그림 3에 표시하였다. 두께 0.19[mm]에서 절연 파괴전

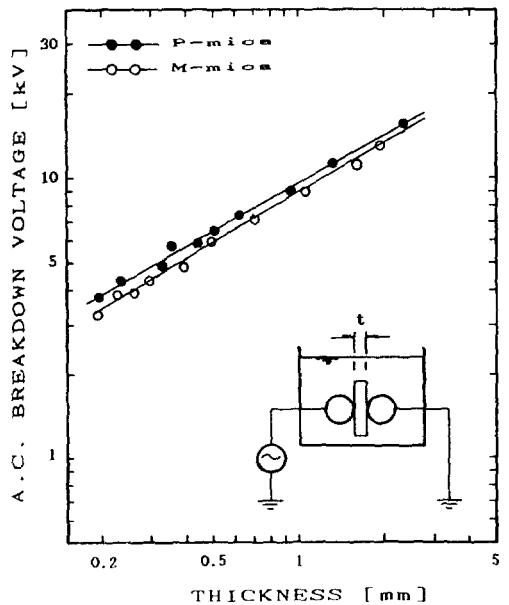


그림 3. 마이카의 관측방향 절연파괴전압의 두께 의존성

Fig. 3. Dependence of thickness on breakdown voltage along penetrating direction in mica

압은 M-마이카가 10-11(KV), P-마이카는 13-14(KV)로 P-마이카가 M-마이카보다 다소 높은 값을 나타내고 있으나 두께가 커질수록 파괴 전압의 차는 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 어느 두께 이상에서는 M-마이카가 오히려 P-마이카 보다 파괴전압이 높아질것을 의미한다. 이것은 마이카 격자 구조에서 격자 중심이 M-마이카는 4개의 알루미늄 원자로, P-마이카는 6개의 마그네슘 원자로 구성되어있어 두께가 작으면 M-

마이카가 쉽게 관통되나 두께가 커지면 알루미늄의 경질성에 의해 P-마이카보다 절연 파괴 특성이 강해지는 것으로 생각된다. 사진1및2는 각각 P-마이카와 M-마이카의 절연 파괴에 의한 관통혈을 200배로 확대한 주사전자 현미경 (SEM) 사진이다. 관통혈의 크기는 직경 약 0.12(mm)정도로 비슷한 크기이나 P-마이카의 경우 관통혈 주위로 파괴부위가 넓게 퍼져있으며 M-마이카의 경우에는 파괴부가 좁은 반면 파단선이 길게보이고 있어 양 마이카의 기계적 강도가 잘 비교되고 있다.

마이카의 연층 방향으로의 방전특성을 조사하기 위해서 열처리 하여 흡장 수분을 제거한 다음 시료의 표면에 은-페인트로 원-원 전극을 부착하고 실온의 공기중에서 교류전압을 0.5 (KV/sec)의 승압 속도로 인가하며 연면 방전 발생 전압을 측정하여 결과를 그림 4에 나타내었다. 연면 방전의 발생기준은 10[mA] 이상의 방전전류가 흐를때의 인가전압으로 하였다. 극간격에 따른 연면 방전전압의 크기는 극간격 1.0(mm)의 경우 M-마이카가 2.4(KV), P-마이카는 2.5(KV)에서



사진 1. P-마이카의 관통혈 (SEM 200 배율)  
Photo 1. Penetration hole due to break-down in P-mica (Magnification : 200, SEM)

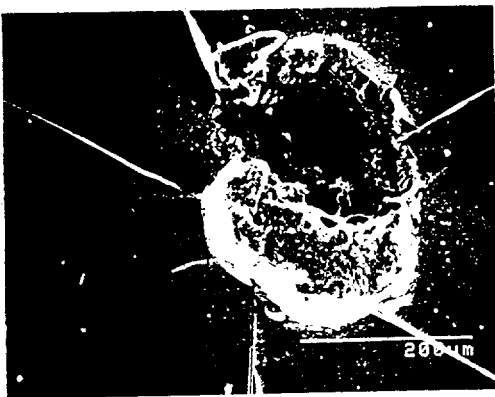


사진 2. M-마이카의 관통혈 (SEM 200 배율)  
Photo 2. Penetration hole due to break-down in M-mica (Magnification : 200, SEM)

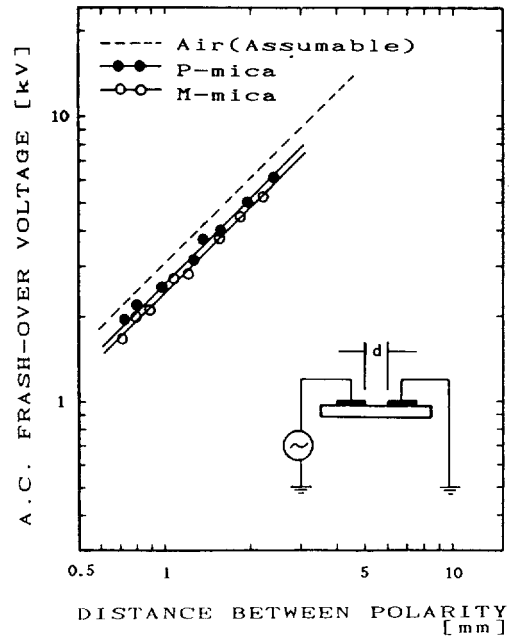
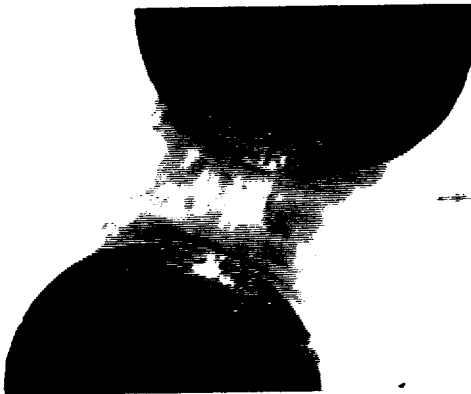


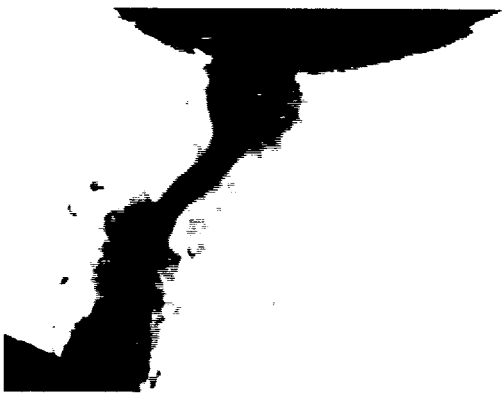
그림 4. 마이카 연면방전의 극간거리 의존성  
Fig. 4. Dependence of polar distance on flash-over voltage along surface direction in micas

연면 방전이 발생하고 극간격 2[mm] 에서는 M-마이카가 4.8(kV), P-마이카가 5.0(kV)의 크기로 P-마이카 가 M-마이카 보다 약간 큰 값을 나타내고, 극간거리 의존성은 양 마이카가 유사특성을 보이고있다.

그러나 방전로의 형성은 사진 3 과 같이 연질 마이카인 P-마이카는 탄화흔적이 뚜렷한 좁은 방전로가 형성되었으나 경질 마이카인 M-마이카의 경우는 방전로 가 넓게 퍼져 뚜렷한 탄화 흔적은 없이 방전열에 의한 변색 상태만 보이고 있다. 이것은 최종적인 절연 파괴 과정에서 방전현상이 연면방향으로 확산하기 쉬운 효과때문으로 M-마이카가 P-마이카보다 확산효과가 크다는것을 알수있다.



( a ) Muscovite Mica



( b ) Phlogopite Mica

사진 3. 방전에 의해 형성된 표면 방전로  
Photo 3. Surface discharge path formed by flash-over

3-2. 유전특성

측정시편은 약 2 x 2[cm]의 크기로 시편의 양측에 은페인트로 직경 12[mm]의 원전극을 도포하고 양 전극간에 유전특성을 측정하였다. 본 실험에서의 출력데이터는 정전용량(C)과 유전정접(D)으로 표시되므로 비유전율과 유전손율은 두께로 보정하였다. 보정된 단일상 소재의 유전특성은 표 3과 같다.

표 3. 단일상 소재의 유전특성  
Table 3. Dielectric Properties of Composite Material

Description	P - mica	M - mica	Epoxy
Capacitance, C	6.2995 X 10 <sup>-11</sup>	3.2902 X 10 <sup>-11</sup>	1.21603 X 10 <sup>-12</sup>
Dissipation, D	0.00167	0.003	0.01469
Thickness, t[mm]	0.11	0.21	2.4
Relative Dielectric Constant	6.923	6.903	2.9159
Dielectric Loss Factor	0.0115	0.0207	0.0428

일반적으로 비 유전율은 절연물의 절연성을 평가하는 비교계수로 절연 내력은 비유전율에 반비례하고 유전손율에 비례하는 특성을 나타낸다. 표에서 P-마이카가 M-마이카에 비해 비유전율이 약간 큰값(3%)을 보여주고 있으며 이러한 특성은 친수성이 크고 극성이 강하여 흡수량이 많기 때문으로 여겨진다. 마이카-에폭시 복합체의 계면층을 이상수지층으로 전제하면 복합 시료는 "마이카-계면층-에폭시 수지"로 구성된 3종의 콘덴서가 직렬로 접속된 회로로 동작할 수 있다. 그러므로 개별 단일상 유전특성값을 두께로 보정하여 마이카-에폭시의 2종 콘덴서 직렬회로로 계산한 이론적인 계산값과 마이카-계면층-에폭시의 3종 콘덴서로 구성된 복합 시료의 실제 측정값을 표 4에 표시하였다. 마이카-에폭시 복합체의 유전율은 복합시료의 동가회로에서 본 합성 유전율로 보고 계산값과 측정값을 이용하여 산출한 계면층의 비유전율 및 유전손율을 그림 5에, 유전정접을 그림 6에 나타내었다. 계면층의 비유전율은 P-마이카의 경우 무처리 시료는 4.15이고 실란농도 2.0 (Wt.%)의 표면처리한 시료는 3.18로 최소값을 보이며 실란농도가 커지거나 적어지는 경우에는 상승하는 경향을 보이고 있다. M-마이카는 무처리 시료에서 3.51, 실란농도 1.5(Wt.%)에서 처리한 시료

표 4. 등가시료의 복소 유전율  
Table 4. Complex Dielectric Constant of Simulated Specimens

Specimens No.	Calculated Value	Measurement Value
P <sub>00</sub>	0.8611 - j 0.0066	0.7122 - j 0.0063
P <sub>05</sub>	0.9127 - j 0.0085	0.7413 - j 0.0081
P <sub>10</sub>	0.8356 - j 0.0074	0.6761 - j 0.0071
P <sub>15</sub>	1.0120 - j 0.0085	0.7777 - j 0.0080
P <sub>20</sub>	0.9048 - j 0.0073	0.7058 - j 0.0068
P <sub>25</sub>	0.8524 - j 0.0083	0.6765 - j 0.0078
M <sub>00</sub>	0.8434 - j 0.0072	0.6800 - j 0.0069
M <sub>05</sub>	0.8191 - j 0.0076	0.6619 - j 0.0072
M <sub>10</sub>	0.7076 - j 0.0066	0.5764 - j 0.0063
M <sub>15</sub>	0.5905 - j 0.0062	0.4928 - j 0.0058
M <sub>20</sub>	0.5274 - j 0.0059	0.4498 - j 0.0056
M <sub>25</sub>	0.6987 - j 0.0070	0.5770 - j 0.0065

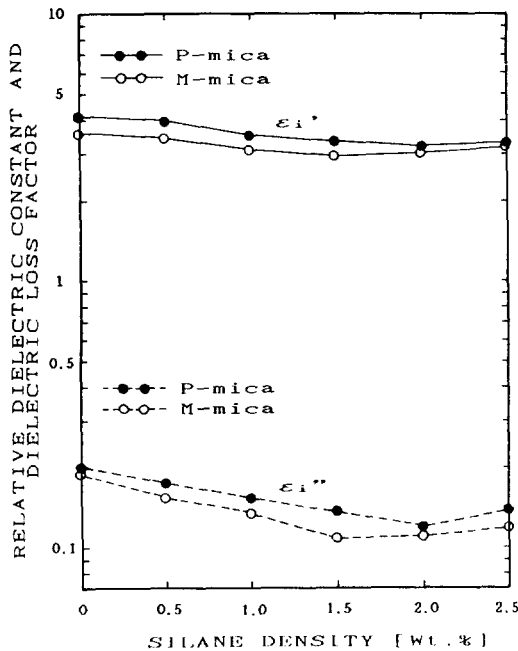


그림 5. 실란농도에 따른 계면층의 비유전율과 유전손실의 변화특성  
Fig. 5. Variation properties of relative dielectric constant and dielectric loss factor at interface layer according to silane density

에서는 최소값인 3.02로 실란농도의 의존성은 P-마이카와 같은 경향을 나타내고 있다.

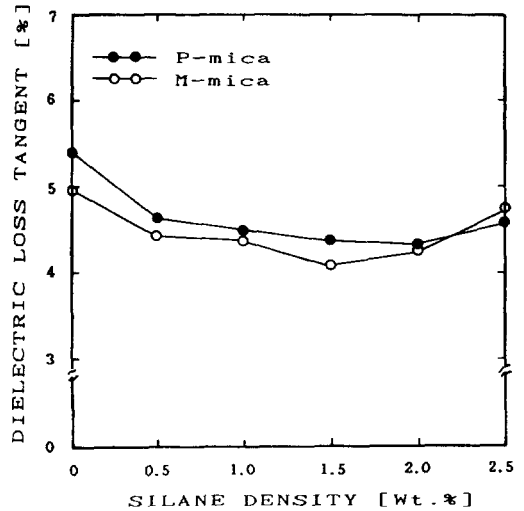


그림 6. 실란농도에 따른 계면층의 유전손실의 변화특성  
Fig. 6. Variation property of dielectric loss tangent at interface layer according to silane density

유전손실은 P-마이카의 경우 2.0(Wt.%) 시료에서 0.13, M-마이카의 경우 1.5(Wt.%) 시료에서 0.11로 최소값을 가지며 실란 농도가 커지거나 적어지는 경우에는 상승하는 경향을 보인다. 유전손실의 주 원인이 되는 유전손실의 실란농도 의존성도 같은 경향을 나타내고 있다.

### 3-3. 계면층의 누설전류 특성

누설전류의 크기는 유전체의 절연성, 열화 상태 및 계면정합상태에 의존하므로 누설전류 측정용 계면시료는 유전특성이 우수하게 나타난 P<sub>20</sub> 및 M<sub>15</sub> 시료와 양 마이카의 무처리 시료를 선정하고 인가시간 및 인가전압의 변화와 누설 전류와의 관계를 조사하여 결과를 그림 7에 나타내었다. 전압의 최대 인가시간을 10<sup>3</sup>(sec)로 취한 것은 소정의 시험전압인 10(KV)까지는 0.5(KV/sec)의 승압속도로 20(sec) 정도의 시간을 요하며 누설전류의 시간변화가 충분히 작아 질때까지의 감쇄시간을 고려한 것이다.

그림 7에서 계면층의 비유전율이 큰 무처리 시료에서는 P-마이카와 M-마이카 모두 인가 후 약 50(sec)에서 누설전류의 시간 변화가 완만해졌다가 100(sec) 정도에서 다시 감쇄속도가 커져 약 7(min)후 평형 누설 전류가

나타나는 경향을 보여주고 있다. 무처리시료에서는 흡장된 수분 (물 또는 결정수)이 산 무수물과 반응하여 유리산으로 되며 또한 극성이 강하므로 유리산을 끌어당겨 이상반응을 하므로 계면부정이 발생한다. 따라서 이러한 완화현상은 충전 보이드에서의 면전하의 축적에 의한것으로 생각된다. 반면 처리시료는 양 마이카 모두 약 3(min) 정도에서부터 안정되어 평형 누설 전류가 흐르며,

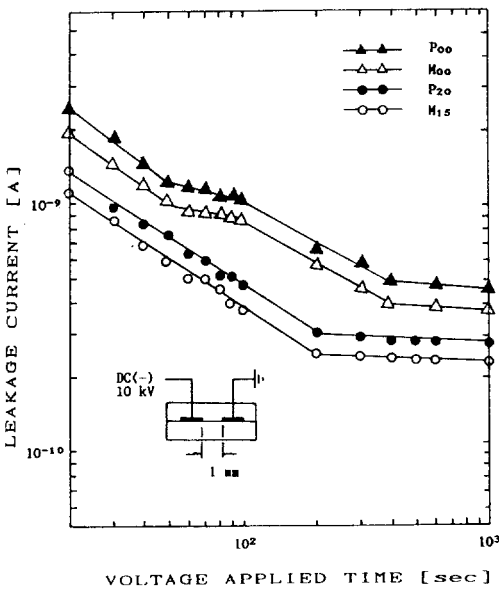


그림 7. 계면층에서의 누설전류-시간 특성  
Fig. 7. Current - Time Properties at interface layer

무처리시료와 같은 재감쇄 현상이 나타나지 않는것은 계면의 정합상태가 양호하여 충전 보이드가 적기 때문인것으로 판단된다. 또한 유리산과 에폭시의 화합물은 산무수물과 에폭시의 화합물 처럼 분자가 길게 늘어지지 않고 말단에 OH기를 가진채 짧게 끊어져 흡수를 더욱 촉진하며 이로인한 이상수지층을 두껍게 하므로써 충전 보이드를 발생시킨다 부극성 직류전압 10(KV)를 인가하여 누설전류가 충분히 안정된 10<sup>3</sup>(sec)후 약 5 (min)간격으로 1(KV)씩 강압하며 측정 한 누설 전류의 크기를 인가 전압의 크기에 대한 변화 특성으로 대수좌표로 하여 그림 8에 나타내었다.

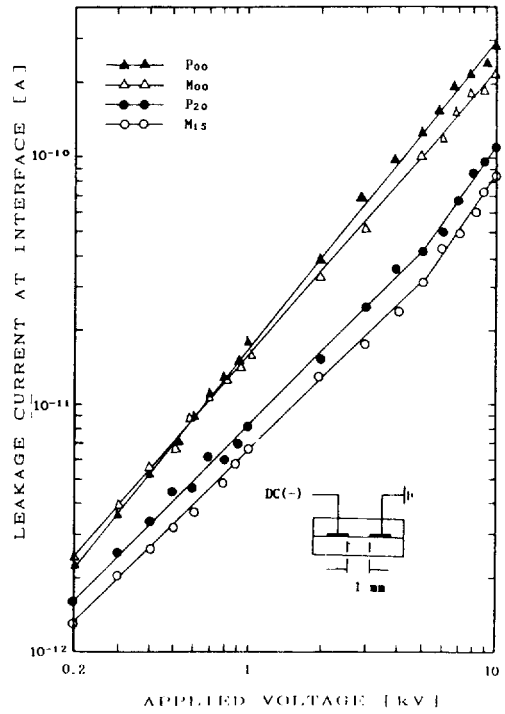


그림 8. 계면층의 누설전류-인가전압 특성

Fig. 8. Current - Voltage Properties at interface layer

표 5는 그림 8에 나타낸 각 시료의 근사 직선의 기울기이다. 여기서 저전압 영역과 고전압 영역의 2영역으로 나눌수 있으며 영역 구분은 대략 기울기가 변화하는 전압인 5(KV)를 기준하였다. 마이카의 표면을 실란처리한 시료에서는 P-마이카나 M-마이카의 경우 모두 저전압 영역에서는 음특성을 보여주고 있다. 그러나 고전압 영역에서는 기울기의 경사도가 실란 2.0 (Wt.%)에서 처리한 P-마이카가 1.38, 실란 1.5(Wt.%)에서 처리한 M-마이카의 경우는 1.45의 급격한 경사를 보이고 있다.

그러나 이값은 영역의 평균적인 값으로 기울기는 전압이 높아짐에 따라 커지는 경향이 있다. 이것은 M. A. Lampert<sup>6)</sup>에 의해 보고된 점전극으로 부터의 공간전하 제한전류는 전압의 약 1.5승에 비례한다는 연구 보고와 일치하는 결과를 제시하고 있다. 또한 이것은 절연 파괴 시험항에서 기술하는 전자주입

표 5. Log 전압 - Log 전류 특성의 근사직선의 기울기

Table 5. Decline of Resemblance Straight Line in Log. Current - Log. Voltage Property

Specimens No.	Low Voltage Area	High Voltage Area
Fee	1.24	1.18
Mo	1.15	1.09 (Resemble Ohmic)
Pze	1.01 (Ohmic)	1.38
Mis	0.98 (Ohmic)	1.45

현상에 의한 가능성을 지지하는 것으로 생각할수 있다. 무처리 시료의 경우는 저전압 영역에서도 음 특성을 벗어난 P-마이카가 1.15값을 나타낸다. 이것은 전술한바와 같이 계면의 부정합에 따른 층간 보이드에서의 전자의 포획 및 발산에 의한것으로 판단된다.

3-4. 계면층의 절연특성

실온의 실리콘 유층에서 극간거리 2[mm]의 계면시료에서 한쪽의 원전극에 상용주파 60 [Hz]의 교류전압을 인가하고 다른 한쪽의 원전극은 접지하여 0.5[KV/sec]의 승압속도로 인가하여 계면층이 파괴될때의 절연파괴 전압을 측정하였다. 측정시료는 10개씩 측정하여 최고값과 최저값은 버리고 나머지의 산술 평균값을 취하여 그림 9에 나타내었다. P-마이카의 경우 무처리 시료의 절연파괴 전압이 18.2 [KV]에 비하여 실란농도 2.0 [Wt. %]로 처리한 시료는 29.7[KV]로 상승하였으며 M-마이카는 무처리 시료에서 19.5(KV), 1.5 [Wt. %] 실란농도에서 처리한 시료는 32.4(KV)의 값을 나타내었다. 각종의 실란농도에서의 절연파괴 전압의 실란농도 의존성은 비유전율 및 유전손율의 변화 특성과 같은 경향을 나타내고 있다.

실온의 실리콘 유층에서 교류전압을 케노트론관에서 반파 정류하여 0.25[μF]의 콘덴서로 평활 시킨 직류전압을 0.5[KV/sec]의 승압속도로 인가하여 계면층이 파괴될때의 직류 절연파괴 전압을 측정하였다. 측정시료는 양 마이카의 무처리시료 2종과 교류 절연파괴시험에서 절연성이 우수한 P<sub>20</sub>시료와 M<sub>15</sub>시료의 4종을 선정하여 극간격 1[mm]에서의

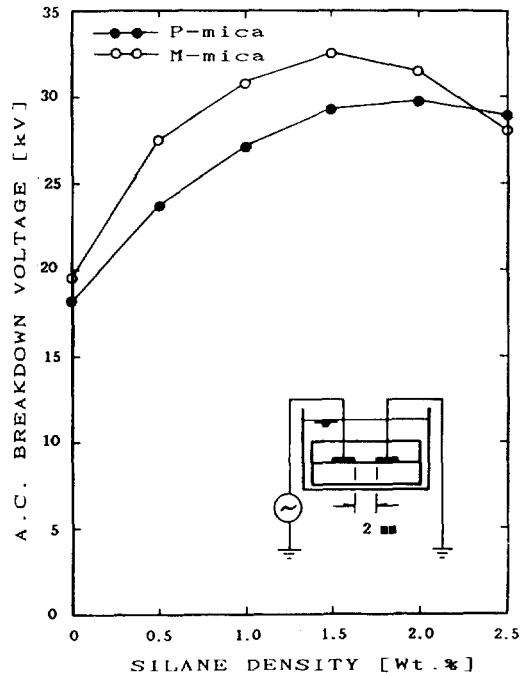


그림 9. 계면층에서의 실란농도에 따른 교류 파괴전압특성

Fig. 9. AC Breakdown voltage properties at interface layer according to variation of silane density

직류절연파괴 시험을 행하였다. 절연파괴 강도는 비유전율  $\epsilon_1$  및  $\epsilon_2$ 의 유전체의 계면상에 2개의 도형전극이 2c만큼 떨어져 있으며 인가전압을 1[KV]로 모델화 하면 전체의 세기 |E|는 다음식으로 나타낼수 있다. 여기에서 r과 Z는 곡률반경 및 복소좌표 값이다.

$$|E| = \frac{V}{[Z \cdot (|c^2 + rc - Z^2|)^{1/2} \cdot \sin^{-1} \frac{c}{c^2 + rc}]} \quad (1)$$

도형전극에서 r < 2c 이면 전극선단의 전체의 세기는 식(1)에 Z= ± c를 대입하면 식(2)가 얻어진다.

$$E_{tip} = \frac{V}{\pi (rc)^{1/2}} \quad (2)$$

마이크라-에폭시 복합재료의 계면에서의 절연파괴 특성

전극선단의 곡률반경을 전극의 두께 약 8( $\mu$ m)의 반인 4( $\mu$ m)로 가정하면 1 (KV)인가시 7.55 (KV/mm)의 값을 가지므로 시료의 파괴 전압의 배수로 구한 절연 파괴 강도는 표 6과 같다. 단일상 에폭시 수지의 직류 전성 절연파괴 강도는 약 70 (KV/mm)정도이다. 이상 수치층인 계면의 절연 파괴 강도는 이보다 약할것으로 추정되나 실험 결과와 같이 108-162(KV)의 값을 나타낸다.

표 6. 계면층의 직류 파괴전압 및 절연강도

Table 6. DC Breakdown Voltage and Insulating Strength of Interface Layer

Specimens No.	Breakdown Voltage (kV)	Breakdown Strength (kV/mm)
P00	14.3	108
M00	15.1	114
P20	19.3	145
M15	21.5	162

따라서 전극단부의 전계를 완화하는 무엇인가의 효과가 생긴다고 생각된다. 이와같은 전계완화의 원인으로는 예민한 전극단부로부터의 주입 전자에 의한 공간 전하 효과를 들수있다. 이것은 포획된 주입전자가 호모전하를 형성하기 때문에 전극단부의 전계가 완화된다고 생각된다. 별도의 원인으로는 주입 전자류에 의한 주울열의 발생도 생각할수 있다. L. C. Burton<sup>7)</sup>은 적층 세라믹 콘덴서의 절연열화의 원인으로서 적층 콘덴서의 내부전극의 부정때문에 주입된 고밀도전자류에 의한 주울열의 발생을 들고있다. 또한 계면시료의 전극선단은 예민하기 때문에 전극선단의 전류밀도는 높다고 생각된다. 이 경우 전극 근방은 유전체가 주울열에 의해 가열되어 국부적으로 도전율이 증가하여 등가적으로 곡률반경이 확대되는 과정인 극성효과를 생각할수 있다. 따라서 직류 누설전류의 시험결과도 이와같이 전자주입의 가능성을 지지하는것으로 생각할수 있다. Log전류-Log 전압 특성의 기울기가 1.5에 가까운 전압 영역이 있으며 이는 M. A. Lampert의 점전극으로부터의 공간전하 제한전류는 인가전압의 3/2승에 비례한다는 보고와 일치하고 있다. 계면시료와 같은 도형전극의 경우 공간전하 제한전류와 전압의 관계는 명확하

게 규명할수 없지만 다음과 같은 가능성이 있다. 계면시료의 전극단부를 현미경으로 관찰하면 전극단부는 원활하지 않고 부정이 많은것을 알수있다. 이러한 부정이 점전극과 같은 역할을 한다고 생각하면 계면시료의 누설전류- 전압특성이 대수좌표 그래프에서 기울기가 3/2에 가까운것을 설명할수있다.

3-5. 부분방전 특성

부분방전 특성 시험은 실온의 실리콘 유층에서 교류전압을 0.5 (KV/sec)의 속도로 승압하면서 오실로스코프로 관찰하여 2.5(pC)를 초과하는 부분 방전이 생길때의 전압을 부분방전 개시전압으로 하였다. 방전량 측정은 부분방전 분광분석장치를 이용하여 시험전압을 15(KV)까지 승압하여 부분방전 펄스의  $\Phi-q, \Phi-N$  및  $q-N$ 특성을 계측하였다. 부분방전 소멸전압은 동일한 강압속도로 저하시키며 소멸 전압을 계측하고 결과를 표 7에 나타내었다. 실란농도에 따른 계면에서의 비교결과와 부분방전의 개시전압 특성은 유전성이나 절연파괴 시험에서의 특성과 같은 결과를 나타내며 P-마이크라에서는 실란농도 2.0(Wt.%)에서 처리한 시료가 13.1(KV), (Wt.%)에서 처리한 시료는 13.5(KV)로 가장 우수한 내부부분방전성을 보여주고 있다. 일단

표 7. 부분방전의 개시전압 및 소멸전압

Table 7. Initiate Voltage and Extinguish Voltage of Partial Discharge

Specimens No.	Initiate Voltage $V_i$ [kV]	Extinguish Voltage $V_e$ [kV]	$V_e/V_i$
P00(No Treatment)	8.9	6.9	0.77
P05	10.2	7.2	0.70
P10	10.9	8.3	0.76
P15	12.0	10.2	0.85
P20	13.1	11.8	0.90
P25	12.2	8.4	0.68
M00(No Treatment)	9.4	7.2	0.76
M05	10.5	7.8	0.74
M10	11.3	8.1	0.71
M15	13.5	11.4	0.85
M20	12.4	10.5	0.84
M25	12.8	8.5	0.66

부분방전이 발생하면 계면층에 존재하는 기층부분에서 후속발생하는 부분 방전으로 인

하여 인가전압을 저하시켜도 부분방전은 쉽게 소멸되지 않는다. 부분방전의 소멸은 개시전압의 약 70 (%)전압에서 소멸되나 결합력이 양호한 시료에서는 80-90(%)의 전압에서 소멸된다. 실란처리 농도의 크기에 따른 최대 방전전하량은 1회를 초과하는 전하량을 기준하였으며 결과를 그림 10에 나타내었다.

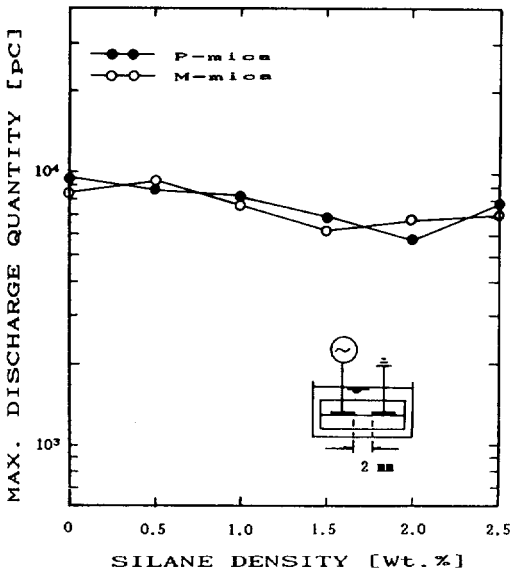


그림 10. 계면층에서의 최대 방전 전하량  
Fig. 10. Maximum discharge charge quantity at interface layer

최대 방전전하량은 P-마이카의 무처리 시료와 M-마이카의 0.5 (Wt. %)에서 처리한 시료에서 9000-9500 [pC]의 크기로 시료중 최대 값을 보이며 P-마이카의 2.0(Wt. %)에서 처리한 시료는 5600[pC], M-마이카는 1.5(Wt. %) 처리시료에서 6000[pC]으로 계면의 정합이 양호한 시료들이 최대 방전전하량이 적어지는 것을 나타내고 있으며 절연파괴 측정결과와도 같은 경향을 보여준다. 인가전압의 크기에 따른 최대 방전전하량 및 발생빈도의 관련성을 조사하기 위하여 처리시료중 전기적특성이 우수한 M-마이카의 실란처리 농도 1.5 (Wt. %) 시료와 무처리시료를 선정하여 0.5(KV/sec)의 승압속도로 상승시키고 전압이 10 [KV]에 도달할때 부터 측정을 시작하여 인가전압의 변화에 따른 방전용량 및 발

생빈도를 측정하고 결과를 그림 11 및 그림 12에 나타내었다. 무처리시료는 19(KV)에서 계면이 절연파괴되는 현상을 보였으며 절연파괴가 발생하기 직전의 최대 방전전하량은 약 16,000[pC]이며 전압상승에 따라 방전량이 증가하며 발생빈도도 선형적으로 증가하는 특성을 나타내고 있다. 실란농도 1.5(Wt. %) 시료는 12(KV)에서 520[pC]의 크기로 부분방전이 발생하기 시작하여 전압증가와 함께 증가하여 17(KV)에서 부터 약 5600-6000 [pC]의 범위에서 방전량의 포화현상을 보이고 있다. 방전의 발생빈도는 무처리 시료의 선형적인 증가 특성과는 달리 지수함수적으로 증가하는 특성을 나타내며 특히 방전량이 포화되기 시작하는 인가전압 17(KV)정도에서 부터 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상은 무처리시료의 경우는 계면의 정합상태가 불량함에 따라 층간 보이드가 존재하므로 쉽게 방전이 개시되며

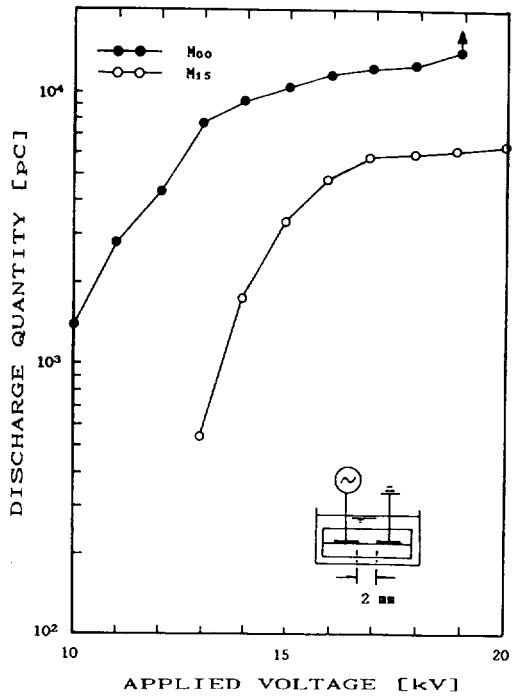


그림 11. 계면층에서의 최대 방전전하량의 인가전압 의존성  
Fig. 11. Applied voltage dependence of maximum discharge charge quantity at interface layer

계면 보이드간에 연속적인 후속방전이 쉽게 일어나 방전량과 함께 발생빈도도 증가하는 것으로 생각된다. 1.5 [Wt. %]로 처리한 시료에서는 층간 보이드가 적으므로 쉽게 방전이 발생하지 않으며 최대 방전 전하량의 포화특성은 발생빈도가 큰 후속방전의 발생에 기인하는것이라 생각된다. 이러한 결과는 절연체의 열화과정에서 열화를 촉진시키는 요소는 발생하는 최대 방전전하량의 크기뿐만 아니라 발생빈도에도 의존하는것을 의미하며 주입된 전자가 포획되어 발산을 반복하는 과정에서 후속방전의 진전을 촉진하며 열화를 진행시킨다고 생각된다.

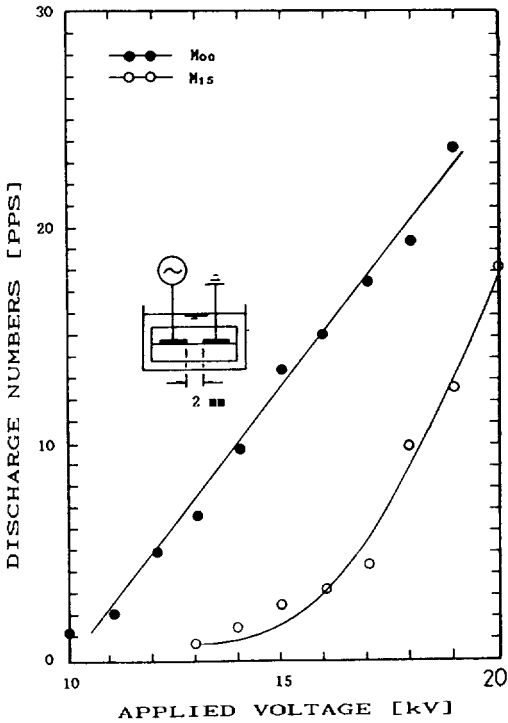


그림 12. 계면층에서의 부분방전 발생빈도의 인가전압 의존성

Fig. 12. Applied voltage dependance of originating frequency of partial discharge at interface layer

#### 4. 결론

마이카-에폭시 복합 절연계 계면층에서의 절연과피 특성을 규명하기 위하여 계면시료를 제조하고 이 시료로부터 전기적 특성과

계면현상을 분석 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 계면층의 비유전을 및 유전손실은 실란농도에 따라 변화한다. P-마이카에서는 실란농도 2.0[Wt. %], M-마이카에서는 1.5[Wt. %] 시료에서 비유전율과 유전손실이 최소로 되며 실란농도가 커지거나 적어지는 경우에는 상승하는 경향을 보인다.
- 2) 실란처리한 계면시료의 직류 누설전류 특성은 2영역으로 구분된다. 5[KV]이하의 저전압 영역에서는 음특성을 나타내고 고전압영역에서는 약 1.4 (1.38-1.45)승에 비례한다.
- 3) 계면층의 직류 절연 과피 강도는 단일상수지의 진성 절연과피 강도의 1.5-2.0 배로 나타난다. 이는 전극단부의 부정이 접전극의 역할을 하므로서 주입전자에 의한 공간전하 효과 즉 주입전자가 호모 전하를 형성하므로서 전극단부의 전계가 완화되는 현상임을 알수있다.
- 4) 계면층의 부분방전 특성은 계면의 정합상태에 따라 현저한 차이가 있다. 계면정합이 양호한 경우에는 인가전압의 상승에 따라 방전량이 포화되는 시점에서부터 발생빈도는 지수함수적으로 증가하나 불량한 경우는 부분 방전의 증가와 함께 발생빈도가 선형적인 증가특성을 보인다.
- 5) 계면층의 열화현상은 방전 전하량의 크기와 방전의 발생빈도에 크게 의존한다. 그러나 계면층에서의 열화를 촉진시키는 주원인은 최대 방전전하량의 크기보다는 발생빈도에 더 의존함을 알수 있었다.

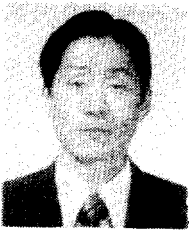
본 연구는 한국 학술 진흥 재단 연구비에 의해 이루어졌기에 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 近藤 保, "界面化學", pp. 79, 東京, 三共出版 (1986)
- 2) Tsai, S. W., Halpin, J. C., "Effects of Environmental Factors on Composite Materials", AFML-TR-67-423, 1969
- 3) G. Lister, R. Lefebvre and L. Kohn, "Epoxy-Mica Mat in Class F Stator Ground Ground Wall Insulation", IEEE, CH-195, Jan. 1977, pp. 152-156

- 4) K. Kadotani and Y. Kado, "Capability of Insulation Diagnosis for Mica-Resin Insulated Coils", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. EI-15, No. 6, Dec. 1980, pp. 481-490
- 5) T. Okamoto and T. Tanaka, "Cycle-mean  $\phi$ -q Characteristics of Partial Discharge in Six Electrodes System", T. IEEE, Vol. 102A, No. 7, July 1982, pp. 7-14
- 6) M. A. Lampert and P. Mark, "Current Injection in Solids", New York, Academic, (1970)
- 7) L. C. Burton, "Leakage Currents in Multi-layer Ceramic Capacitors", IEEE Trans. Components Hybrids, Manuf. Technol., Vol. CHMT-7, Dec. 1984, pp. 443-453
- 8) 김태성, 이진, "에폭시 수지의 열경화 특성", 한국조명설비학회지, 제 2권 제 1호, 1988. 3, pp. 75-82
- 9) 김태성, 이진, 이은화, "에폭시 수지의 경화 형태와 전기절연특성과의 관련성", 한국전기전자재료학회지, 제3권, 제2호, 1990. 12, pp. 9-12
- 10) 김태성, 구할본, 이은화, 임장섭, "마이크-에폭시 계면층에서의 열화현상", 대한전기학회, 춘계학술발표회 논문지, 1992. 4, pp. 71-74

(1992년 5월 16일 접수)



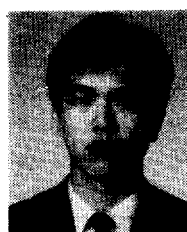
**김태성**  
1935년 11월 29일생. 1959년 2월 전남대학 전기공학과 졸업. 1981년 2월 조선대학 대학원(공학박사). 1983년 7월 일본 청산학원대학 전기전자공학과 연구교수. 1989년 7월 일본 동경대학 전기전자공학과 연구교수. 1992년 현재 전남대학 전기공학과 교수.



**구할본**  
1951년 10월 24일생. 1974년 2월 영남대학 전기공학과 석사. 1988년 3월 일본 Osaka대학 전기공학과(공학박사). 1992년 현재 전남대학 전기공학과 조교수.



**이은화**  
1946년 9월 5일생. 1974년 2월 명지대학 전기공학과 졸업. 1979년 2월 명지대학 전기공학과 석사. 1992년 2월 전남대학 전기공학과(공학박사). 1992년 현재 (주)삼안건설 상무이사.



**임장섭**  
1967년 1월 19일생. 1989년 2월 전남대학교 전기공학과 졸업. 1989년 2월 전남대학교 전기공학과 석사. 1992년 현재 전남대학교 전기공학과 박사과정.