

마이카-에폭시 복합재료 계면에서의 왜도특성

◦임장섭*, 이은학**, 구할본*, 김태성*

전 남 대 학 교 전 기 공 학 과

The Skewness Properties at Interface in Mica-Epoxy Composite

◦Jang-Seob Lim*, Eun-Hak Lee**, Hal-Bon Gu*, Tae-Seoung Kim*

* : Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

** : Sam-An Consulting Engineering

ABSTRACT

In this paper, the skewness properties of partial discharge 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 confirmed that the interface exists as abnormal resin layer and the contact condition at the interface is depended upon the density of silane aqueous solution. The 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. The aging model can be represented from the variable characteristics of skewness.

1. 서 론

고전압 절연재료의 연구분야에서 응용소재로 각광 받고 있는 에폭시-마이카 복합재료는 가공성 및 전기 절연특성이 우수하다. 그러나 열화가 진행되면 복합재료의 계면에서 부분방전이 발생하여 절연특성이 저하된다.

계면이란 2 개의 상이 접촉되어 있는 경계면을 말하며 계면의 전기적 성질은 이중층 전위에 의해 지배된다. 전기 이중층의 개념은 19 세기말 Helmholtz 에 의해 도입된 이래 응용분야에서의 계면현상에 대한 연구는 1969 년 J.C.Halpin이

이상적인 계면반응으로 혼합방법론을 발표하므로서 본격적인 계면연구가 시작되었다.

이후, G. Lister 와 K.Kadotani 등에 의해 마이카-에폭시 복합재료의 계면에서의 유전특성이 보고되었으며, 1982 년 일본의 전력중앙연구소의 T. Tanaka팀은 부분방전의 새로운 처리방법으로서 사이클 평균 위상-방전량 특성을 제시하므로서 계면현상의 해석에 부분방전을 이용한 연구들이 활발하게 이루어지기 시작하였다.

그러나 계면에 대한 연구는 계면특성을 향상시키기 위한 계면 결합제와의 처리방법등과 병행하여 연구가 되어 왔으나 계면의 개질이론 및 열화현상에서는 아직 많은 가설들로 남아있는 실정이다.

본 연구에서는 이 점에 착안하여 마이카와 에폭시 수지를 이층구조로한 계면시료를 제작하여 절연특성시험을 행하였으며, 부분방전의 새로운 해석방법인 왜도(Skewness) 특성을 고찰하므로서 계면에서의 열화현상을 연구하였다.

2. 왜도특성에 관한 고찰

종래의 부분방전 특성의 해석은 최대 방전전하, 방전펄스의 발생빈도 및 방전전하와 발생빈도의 관계등의 고찰에 컴퓨터에 의한 데이터 처리를 행하고 교류의 위상각을 관련시키는 수법이 주로 활용되어왔다. 최근에는 방사선 계측의 영향을 받아 펄스 파고분포특성등이 계측되고 있다. 그러나 부분방전에는 위상각이라는 중요한 파라미터가 존재한다. 부분방전의 모든 데이터를 전압 위상각을 포함시켜 해석하기는 어렵다. 따라서 위상각을 포함하는 평균화 조작이 필요하므로 위상각을 미소한 크기로 분할하여 위상구간에

발생한 부분방전 펄스를 평균하는것을 생각할 수 있다.

평균 ϕ -q분포는 하나의 패턴으로 나타낼 수 있으며 이를 표현하는 양으로써 왜도(S)의 개념이 도입되고 있다. (ϕ :평균위상, Q:총방전량, σ 는 편차)

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi)^3}{Q \sigma^3}$$

S값의 물리적인 해석은 급후의 과제이나 현상적으로는 개략의 형상을 표현한다. S는 분포 형상의 편기를 나타내는 물리량이다. 이 값이 정의된 큰값을 갖는 경우는 작은 위상각의 부분에 집중하여 방전이 발생하고, 위상각이 큰 쪽으로는 길게 꼬리를 느끼는것과 같은 형상을 보인다. 따라서 큰 방전이 발생하면 후속하는 방전은 작아지는 경우의 방전 전하분포에 대응한다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마이카의 연면파괴 특성.

사진 1 및 2 는 각각 P-마이카와 M-마이카의 절연파괴에 의한 관통혈을 200 배로 확대한 주사전자 현미경(SEM) 사진이다. 관통혈의 크기는 직경 약 0.12 [mm] 정도로 비슷한 크기이나 P-마이카의 경우 관통혈 주위로 파괴 부위가 넓게 퍼져 있으며, M-마이카의 경우에는 파괴부위가 좁은 반면 파단선이 길게 보이고 있어 양 마이카의 기계적 강도가 잘 비교되고 있다. 그러나 방전로의 형성은 연질 마이카인 P-마이카는 탄화흔적이 뚜렷한 좁은 방전로가 형성되었으나 경질 마이카인 M-마이카의 경우는 방전로가 넓게 퍼져 뚜렷한 탄화 흔적은 없이 방전열에 의한 변색상태만 보이고 있다. 이것은 최종적인 절연 파괴과정에서 방전현상이 연면방향으로 확산하기 쉬운 효과 때문으로 M-마이카가 P-마이카보다 확산효과가 크다는것을 알 수 있다.

3-2 부분방전 특성

부분방전 특성시험은 실온의 실리콘유중에서 교류전압을 0.5 [kV/sec]의 속도로 승압시켜 가며 오실로스코프로 관찰하여 2.5 [pC]를 초과하는 부분방전이 생길때의 전압을 부분방전 개시전압으로 하였다. 방전량 측정은 부분방전 분광분석장치를 이용하여 시험전압인 15 [kV]까지 승압하고 부분방전펄스의 ϕ -q, ϕ -N 및 q-N

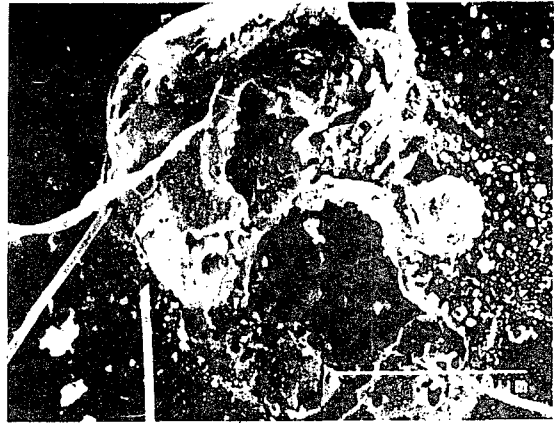


Photo 1. Penetration hole due to breakdown in P-mica (Magnification : 200, SEM)

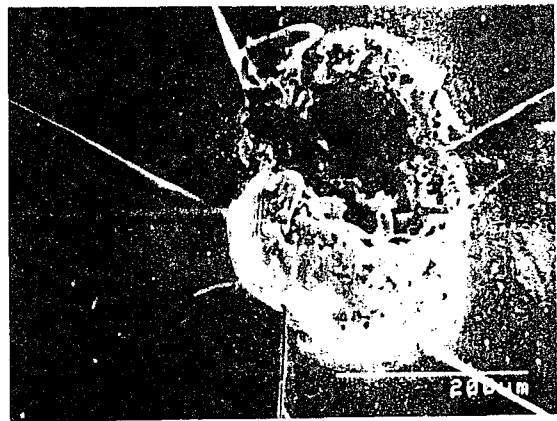


Photo 2. Penetration hole due to breakdown in M-mica (Magnification : 200, SEM)

특성을 계속하였다. 부분방전 소멸전압은 동일한 강압속도로 저하시키며 소멸전압을 계속하고 결과를 표 1 에 나타내었다.

실란농도에 따른 계면에서의 결합상태의 비교결과와 부분방전의 개시전압 특성은 절연파괴 시험에서의 특성과 같은 결과를 나타내며, P-마이카에서는 실란농도 2.0 [Wt.%)에서 처리한 시료가 13.1 [kV], M-마이카의 경우는 실란농도 1.5 [Wt.%)에서 처리한 시료는 13.5 [kV]로 가장 우수한 내부방전성을 보여주고 있다. 일단 부분방전이 발생하면 계면층에 존재하는 기층부분에서 후속발생하는 부분방전으로 인하여 인가전압을 저하시켜도 부분방전은 쉽게 소멸되지 않는다. 부분방전의 소멸은 개시전압의 약 70 [%] 전압에서 소멸되거나 결합력이 양호한 시료에서는 80-90 [%]의 전압에서 소멸된다.

Table 1. Initiate Voltage and Extinguish Voltage of Partial Discharge.

Spec. No.	Initiate Voltage Vi [KV]	Extinguish Voltage Vi [KV]	Ve/Vi
P00	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	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

실란처리 농도의 크기에 따른 최대 방전전하량은 1 회를 초과하는 전하량을 기준하였으며 결과를 그림 1 에 나타내었다.

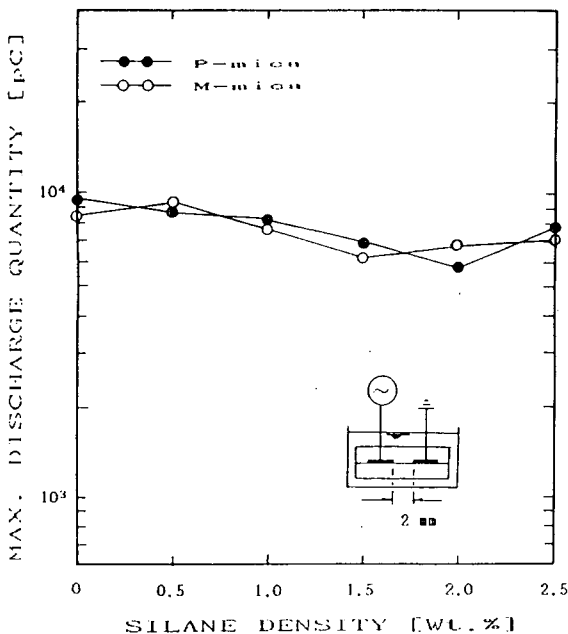


Fig. 1. Maximum discharge charger quantity at interface layer

최대 방전전하량은 P-마이카의 무처리 시료와 M-마이카의 0.5 [Wt. %] 에서 처리한 시료에서 9000-9500 [pC] 의 크기로 시료중 최대값을 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 적어지는것을 나타내고 있어 절연성의 측정결과와도 같은 경향을 보여준다. 인가전압의 크기에 따른 최대 방전전하량 및 발생빈도의 관련성을 조사하기 위하여 처리시료중 전기적 특성이 우수하였던 M-마이카의 실란처리농도 1.5 [Wt. %] 시료와 무처리 시료를 선정하여 0.5 [kV/sec] 의 승압속도로 상승시키고, 전압이 10 [kV] 에 도달할때 부터 측정을 시작하여 인가전압의 변화에 따른 방전용량 및 발생빈도를 측정하였다.

무처리 시료는 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 증가하며 17 [kV] 에서 부터 약 5,600 - 6000 [pC] 의 범위에서 방전량의 포화현상을 보이고 있다.

방전의 발생빈도는 무처리 시료의 선형적인 증가특성과는 달리 지수함수적으로 증가하는 특성을 나타내며, 특히 방전량이 포화되기 시작하는 인가전압 17 [kV] 정도에서 부터 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상은 무처리 시료의 경우는 계면의 정합상태가 불량함에 따라 층간보이드가 많으므로 쉽게 방전이 개시되며 계면 보이드간에 연속적인 후속방전이 쉽게 일어나 방전량과 함께 발생빈도도 증가하는것으로 생각된다.

1.5 [Wt. %] 로 처리한 시료에서는 층간 보이드가 적으므로 쉽게 방전이 발생하지 않으며 최대 방전전하량의 의 포화는 발생빈도가 큰 후속방전의 발생에 기인하는 것이라 여겨진다. 이러한 결과는 절연체의 열화과정에서 열화를 촉진시키는 요소는 발생하는 최대 방전전하량의 크기만이 아니라 발생빈도에 더 의존하는것을 의미하며 주입된 전자가 포획되어 발산을 반복하는 과정에서 후속방전의 진전을 촉진하며 열화를 진행시킨다고 생각된다.

3-3 왜도특성

왜도(Skewness)는 분포형상의 편기를 나타내는 물리량이다. 열화진전에 따른 부분방전의 발생분포 형태를 조사하였다. 그림 2은 부분방전의 열화에 따른 왜도특성을 고찰한 것이다.

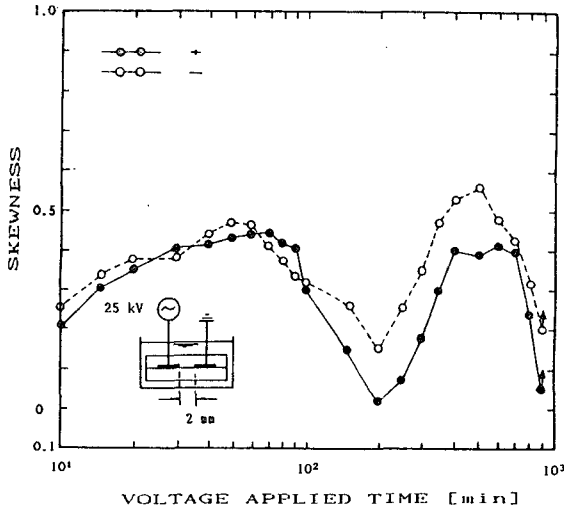


Fig. 2. Time dependence of skewness at interface layer

N.Nagata는 부분방전을 이용한 전산모의 실험에서 왜도의 경시특성이 전압 인가 초기에 약간의 상승후 감소하였다가 다시 상승하는 과정에서 절연파괴가 일어나는것으로 단봉장의 왜도특성을 발표한바 있으나 본 실험결과에서는 그림과 같이 쌍봉장의 형태를 보여주고 있다.

왜도의 시간변화특성은 시료에 따라 변화의 폭은 크지만 왜도가 전압 인가초기에 한번 증가후 감소하는 현상은 전체 시료중 약 80 [%]의 시료에서 관측할 수 있다.

열화시에 위상각이 작은부분에 방전이 집중하다 절연파괴 직전에는 전 위상에서 방전이 발생하는 현상에 대해서는 다음과 같이 생각할 수 있다. 열화초기에 위상각의 중심에서 방전이 집중하다 위상각이 작은 부분으로 진행되는 것은 열화의 진전에따라 새로운 위상에서 방전이 발생하는 것으로 생각된다. 또한 절연이 파괴되기 직전의 열화말기에 방전이 전 위상에서 발생하는것은 횡방향 누설에 따른 중첩외에도 균소펄스의 영향을 고려할 수 있다. 통상의 부분방전 측정장치의 검출감도는 0.3 [pC] 정도로 이 이하를 균소펄스라 한다면 왜도에서 길게 꼬리를 늘리는 부분은 균소펄스의 영역으로 추정이 가능하다.

4. 결론

마이카-에폭시 복합 절연계 계면층에서의 절연 파괴특성을 규명하기 위하여 계면시료를 제조하고, 이 시료로 부터 전기적 특성과 계면현상을 분석, 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 절연 파괴과정에서 방전현상이 연면방향으로 확산하기 쉬운 효과 때문에 M-마이카가 P-마이카보다 확산효과가 크다
- 2) 계면층에서의 부분방전 특성은 계면의 정합상태에 따라 달라진다.
- 3) 계면층의 열화현상은 방전 전하량의 크기와 방전의 발생빈도에 크게 의존한다. 주 요인은 방전전하량보다는 발생빈도에 더 의존한다.
- 4) 열화초기에 위상각의 중심에서 방전이 집중하다 위상각이 작은 부분으로 진행되는 것은 열화의 진전에따라 새로운 위상에서 방전이 발생함을 알 수 있다.

참고 문헌

- 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, p p.152-156
- 4) 김태성, "에폭시 수지의 경화형태와 전기절연 특성과의 관련성", 한국전기전자재료학회지, 제 3 권, 제 2 호, 1990. 12, pp. 9-12
- 5) 김태성, "마이카-에폭시 계면층에서의 열화현상", 대한전기학회, 춘계학술발표회 논문지, 1992. 4, pp. 71-74
- 6) 김태성, "마이카-에폭시 복합재료의 계면에서의 절연파괴특성", 한국전기전자재료학회지, 제 5권, 제2호, 1992, pp. 224-236.