

## 에폭시-나노복합체의 부분방전 저항성 특성연구

박재준, 이창훈, 최태진, 최태일, 박용범, 이성일\*  
 중부대학교 전기전자공학과, 충주대학교 산업안전공학과\*

### Partial Discharge Resistance of Epoxy-Nanocomposites

Park-Jae Jun, Lee-Chang Hoon, Choi-Tae Jin, Choi-Tae il, Park-Yong Byum, Lee Sung il  
 Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Chungju University\*

**Abstract** - PD의 저항성은 에폭시원형을 포함한 3종류 즉, 에폭시 마이크로 복합체를 실란처리 및 미처리한 경우 그리고 나노-마이크로 입자가 혼합된 복합체의 부분방전저항성을 연구하였다. 이들 재료들은 rod-gap-plane 전극 하에서 PD가 적용되었다. 원형에폭시수지보다 마이크로 복합체가 부분방전저항성이 우월하였다. 더욱이 SiO<sub>2</sub> 나노입자-마이크로 혼합된 복합체가 더욱더 큰 저항성을 얻었다. 이는 마이크로 입자사이로 나노입자가 치밀한 조직을 갖고 있기에 이리 우월한 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

#### 1. 서론

Partial Discharge 원인이 된 표면침식은 원형에폭시수지와 마이크로 필러가 충전된 마이크로복합체의 경우 보다 나노 필러가 2~5wt% 충전된 폴리 아마이드 샘플이 훨씬 작았고 그리고 폴리 아마이드 나노 복합체는 마이크로 필러가 충전 되어 있는 폴리 아마이드와 원형 폴리 아마이드 보다 부분방전저항성이 크게 나타내었다. [1][2][3]

또한 나노효과는 필러와 매트릭스 결합, 필러사이의 공간, 형태학 mesoscopic 상호작용을 포함 하는 PD열화에 대한 작용이라 결론 할수 있다. 다른 보고에서 저자 들은 PD 저항은 에폭시 TiO<sub>2</sub>[4] 그리고 에폭시 boehmite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[5]의 경우에서 나노 필러의 조금만한 양을 첨가 함으로 크게 향상 되었다. 본 연구에서는 원형에폭시수지를 포함하여 3종류의 복합체 즉, 마이크로복합체에 실란처리와 미처리에대한 경우, 나노-마이크로 혼합된 복합체 샘플을 제조하여 표면침식의 원인이되는 부분방전 저항성을 측정하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 Preparation of Nano-and-Micro Mixture Composites

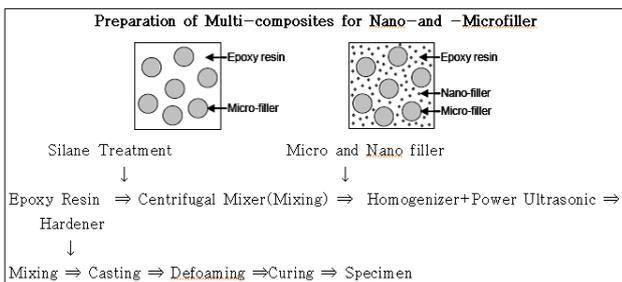


그림1. Multi\_Nano (Nano -and Micro- Mixture) Composites preparation

마이크로 크기 SiO<sub>2</sub> 필러들을 포함한 에폭시수지가 종래의 절연 재료로서 만들어졌다. 평균입자 지름이 3μm을 갖는 SiO<sub>2</sub>필러가 에폭시수지에 분산 되어졌다. 마이크로 필러의 전체량은 40.39Vol%(50wt%)을 사용하였다. 마이크로 필러를 갖는 에폭시수지와 마이크로 필러를 갖는 경화제는 경화반응의 화학적 당량(equivalent weight)에 따라 혼합되어 졌다. 혼합물은 제작된 급형에 붓고 그리고 진공 탈포 하였다. 마이크로필러가 포함된 에폭시의 시편이 120°C×2hr+150°C×24hr에서 1차 및 2차 경화 과정을 통하여 얻어졌다.

나노와 마이크로 혼합복합체 분산의 경우는 나노입자(SiO<sub>2</sub>\_12nm)와 마이크로입자(SiO<sub>2</sub>\_3μm)을 포함하는 에폭시수

지는 그림1의 제조과정으로 나타내었다. Nano 입자인 SiO<sub>2</sub>는 spherical filler 로서 fumed SiO<sub>2</sub>이다. 입자의 평균지름은 약 12nm이었다. 나노입자와 마이크로 입자는 초음파와 균질기를 통하여 에폭시수지에 분산시켰고 그리고 경화제를 첨가하여 원심분리기에서 혼합하였다. 마이크로 입자의 충전비율은 나노필러의 충전 함량비율에 따라 다르다. 본 연구에서는 실란처리된 마이크로복합체(50wt%)와 실란미처리된 마이크로복합체 (50wt%) 두가지 그리고 Nano-and-Micro Mixture Composites(나노입자 충전 함량 체적비: 6.2Vol%) 한가지에대한 부분방전저항성에 대하여 연구하였다. 자세한 성분비는 표1 에서 자세히 나타내었다.

표 1. 나노 와 마이크로 혼합 체적비

Specimen		Conventional Filled Epoxy	MNC (Nano SiO <sub>2</sub> _6.2Vol% )
Epoxy Resins	[phr]	100	100
Hardener	[phr]	80	80
Nano SiO <sub>2</sub> (12nm)	[phr]	0	1 (6.2 Vol%)
Micro SiO <sub>2</sub> (3μm)	[phr]	50 (40.39 Vol%)	50 (37.88Vol%)

##### 2.2 Partial Discharge Resistance Electrodes and Experimentation

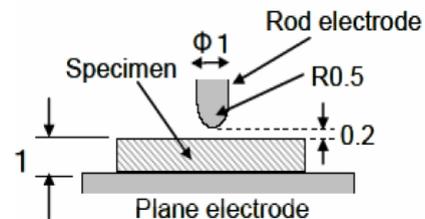


그림 2. 부분방전 저항성 전극 구성

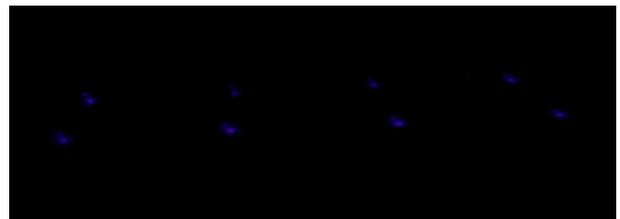
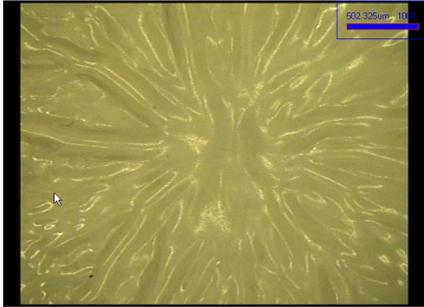


그림 3. 부분방전 Light Emission

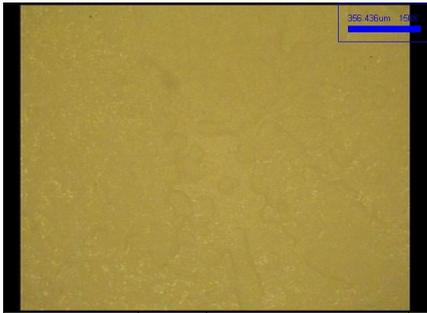
부분방전 저항성측정을 위해 사용된 Rod 전극은 5mm곡률반경을 갖는 텅스텐 재질의 상부전극과 하부 평판전극 사이 갭 길이는 0.2mm의 전극을 갖는 구성이 그림2에서 나타내었다. 부분방

전 시 발생한 광은 PD저항성 평가를 위하여 Rod대 평판전극 시스템의 공기 갭으로부터 방출되었다. PD광 방출의 일시적 변화는 그림 3에서 나타내었다. 부분방전 측정은 8개의 샘플을 동시에 측정할 수 있는 부분방전 저항성 전극장치를 개발하였고, 같은 종류 샘플이 4개를 기준으로 하여 측정하였다. 부분방전 광이 Toshikatsu Tanaka[6]의 연구에서와 같이 열화시간에 의존하지 않음을 확인 할 수 있었다. PD는 초기에(0hr) rod 전극 선단에 부분방전은 전체 영역에서 발생되었고 그리고 인가전압 6kV에서 96시간 후 전극의 침전단 부위에는 까맣게 변색이 되었다. 이는 공기 중 방전으로 인한 산화와 에폭시에서 증발되어 에폭시의 표면 부착으로 보여진다. 오히려 이러한 전극표면을 덮고 있는 금속산화물과 절연재료의 부착이 부분방전을 억누르게 할 수가 있다.

### 2.3 부분방전 저항성 표면침식 깊이



(a) Epoxy Resins



(b) Nano-and -Micro Mixture Composites

그림4. 부분방전 저항성 표면 침식표면 현미경 사진 (96hr적용)

<표 1> 표면 침식 깊이

기호	내용	침식깊이(µm)
1	Epoxy Resins	260
2	Micro_SiO2_50wt% 충전된 마이크로 콤포지트 (with Silane)	142.7
3	Micro_SiO2_50wt% 충전된 마이크로 콤포지트(Without Silane)	119.5
4	Microsize_SiO2_50wt%+ Nano SiO2_12nm 1wt% 혼합된 Composites (with Silane)	64.1

그림4에서는 나노와 마이크로입자가 혼합된 콤포지트로서 고전적 마이크로SiO2 입자 50wt% 충전 과 나노입자(SiO2\_12nm)을 1wt% 혼합한 경우와 원형 에폭시수지가 동일한 조건 (교류 6kV, 720Hz, 96시간)에서 실험을 실시하였다. 나노와 마이크로 혼합 콤포지트 와 원형에폭시 수지가 침식된 표면은 전혀 다른 패턴을 나타내고 있다. 즉, 원형 에폭시수지 경우 표면 요철이 심하게 침식된 경우를 볼 수 있다. 또한 나노콤포지트의 경우 심하게 응집된 경우 부분방전에 의해 입자가 쉽게 떨어져 나가게 되고, 균질한 분산의 경우는 침식이 어렵게 되어 저항성 향상되어진다. 나노-그리고-마이크로 혼합 콤포지트 재료의 최대 침식 깊이가 64.1µm로 측정되었다. 원형에폭시수지의 경우 260µm와 비교하여 볼 때 침식물은 304%만큼 침식이 지연되는 결과를 얻었다. M. Kozako씨의 연구에서도 나노콤포지트 층상 실리콘

이트를 갖는 폴리아마이드 나노콤포지트가 원형 폴리아마이드 수지보다 부분 방전 저항성이 훨씬 더 향상된 결과를 얻었다[2]. T. Tanaka [7]도 에폭시수지의 경우 나노필러가 혼입된 경우 PD 저항의 향상을 가져왔고, 본 연구와 유사한 결과를 얻어 된 것이다. 실리카 필러의 입자크기에 따른 부분적인 방전특성에서 입자가 작을수록 부분방전의 저항성이 크고 입자가 클수록 부분방전저항성이 작아지는 부분방전저항성과 입자크기와는 반비례하는 특성을 설명하고 있다. 또한 실란 커플링은 어느 정도 PD 저항을 향상시키는데 도움을 준다 라고 보고[7] 하였으며, 본 연구에서 실시한 경우 실란처리된 나노 와 마이크로입자가 혼입된 경우가 안정된 부분방전을 나타내었다. 이는 마이크로와 나노입자가 균일한 분산으로 1wt% 나노입자를 포함한 경우 50wt%마이크로 입자사이로 침투되어 조밀한 내부구조로서 안정된 구조를 이루고 있다. Silane coupling을 통하여 나노입자인 무기물과 유기고분자사이 계면강화와 고분자의 이동도가 작게 발생되어 더욱더 튼튼한 구조를 이루고 있기 때문에 부분방전저항성이 크게 향상된 결과로 사료된다. 이처럼 원형에폭시수지보다 나노와 마이크로혼합 콤포지트가 부분방전 저항성이 우수한 특성을 갖게 되는 것이 명쾌하게 설명될 수가 있다. Toshikatsu Tanaka[6][7]의 연구에서도 나노와 마이크로 필러가 혼합되어진 것들은 단일한 나노콤포지트나 또는 마이크로콤포지트 보다 훨씬 나은 PD저항을 가지고 있다. 본 연구에서도 여러 연구자가 가지는 향상된 특성과 크게 일치한 경향을 갖고 있음을 알 수 있었다. 역시 향후 중전기기의 물드 절연에서 좋은 퍼포먼스 갖는 전력기기의 생산이 가능할 것으로 사료된다. 적절한 나노와 마이크로와 나노가 혼합되어진다면 기존의 나노가 가지는 열팽창계수 [8]를 극복하고 또한 마이크로 입자사이 나노입자가 채워지면 에폭시수지 부분의 체적이 크게 줄어들어 더욱 이동도가 낮아지는 결과를 가져올 것은 자명한 일이다. 그 결과 향상된 퍼포먼스를 나타낼 수가 있을 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 원형에폭시수지를 기준으로 하여 고전적 에폭시 마이크로 콤포지트 와 나노-마이크로입자가 혼합된 콤포지트(멀티-나노콤포지트)를 부분방전저항성 연구를 위해 콤포지트를 제조하였다. 부분방전 저항성 측정전극 및 시스템을 이용하여, 교류 6kV, 750Hz, 96Hr의 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Surface profiler (표면침식깊이 측정장치)를 이용하여 침식된 표면깊이를 측정하였다.
2. 원형에폭시 수지를 기본으로 하였을 때 나노-마이크로혼합 콤포지트의 표면침식깊이가 305% 억제된 저항성 특성을 나타내었다.
3. 에폭시-마이크로 콤포지트의 실란처리에대한 부분방전 저항성 특성의 향상을 기대할 수는 없었다. 이는 여러연구자의 연구결과와 유사한 특성을 나타내었다.
4. 나노콤포지트의 경우 균질 분산과 응집된 경우 나노콤포지트의 부분방전 저항성 차이는 크게 나타난 결과로 알 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

[1] M. Kozako, N. Fuse, K. Shibata, N. Hirai, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Surface Change of Polyamide Nanocomposite Caused by partial Discharges", 2003 Annual Report CEIDP, No.2B-3, pp.75-78, 2003.

[2] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, and T. Tanaka, "Surface Degradation of Polyamide Nanocomposites Caused by Partial Discharges Using IEC (b) Electrodes", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, No.5, pp.833-839, 2004.

[3] M. Kozako, R. Kido, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Difference in Surface Degradation due to Partial Discharges between Polyamide Nanocomposites and Microcomposites", 2004 Annual Report CEIDP, No.5A-15, pp.398401, 2004.

[4] M. Kozako, R. Kido, T. Imai, T. Ozaki, T. Shimizu, and T. Tanaka, "Surface Roughness Change of Epoxy/TiO2 Nanocomposites due to Partial Discharges", Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, No.P2-34, pp.661-664, 2005.

[5] M. Kozako, S. Yamano, R. Kido, Y. Ohki, M. Kohtoh, S. Okabe, and T. Tanaka, "Preparation and Preliminary Characteristic Evaluation of Epoxy/Alumina Nanocomposites", Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, No.A4-3, pp.231-234, 2005.

- [6].Toshikatsu Tanaka,Yoshimichi Ohki,Mitsukazu Ochi, Miyuki Harada,and Takahiro Imai ,“Enhanced Partial Discharge Resistance of Epoxy/Clay Nanocomposite Prepared by Newly Developed Organic Modification and Solubilization Methods”,IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1,pp. 81-89; February 2008
- [7] T. Tanaka, S. Kuge, M. Kozako, T. Imai, T. Ozaki and T. Shimizu, “Nano Effects on PD Endurance of Epoxy Nanocomposites”, Proc. ICEE, No. ME1-01, pp.4, 2006.
- [8]Takahiro Imai, Fumio Sawa, Tamon Ozaki, Toshio Shimizu,Shin-ichi Kuge,Masahiro Kozako and Toshikatsu Tanaka, “Approach by Nano-and Micro-filler Mixture toward Epoxy-based Nanocomposites as Industrial Insulating Materials”, IEEJ Trans. FM, Vol 126, No11, 2006.