

# 에폭시/마이크로/나노알루미나 콤포지트의 부분방전 저항성특성

## A Study on the Partial Discharge Resistance Properties of Epoxy/Micro/Nano Alumina Composites

박 재 준\*  
(Jae-Jun Park)

**Abstract** - Neat Epoxy, nano alumina composites, micro alumina composites and multi-nano alumina composites were prepared and experiment were performed to measure their partial discharge resistant characteristics. The partial discharge resistance obtained for the microcomposites, nanocomposites and multi-nanocomposites are compared with those of unfilled epoxy and with GDE amount for surface modifier. It was observed that compare multi-nano alumina composites to micro alumina composites, the partial discharge resistance to degradation gets improved considerably. The improvement in the degradation resistance is attributed to the interface intension between the nano alumina composites and GDE, micro alumina and epoxy neat.

**Key Words** : GIS spacer, Epoxy nano alumina composites, Partial Discharge Resistance(PDR), Multi-nano alumina composites

### 1. 서 론

에폭시 기반 콤포지트가 고전압절연체로서 광범위하게 사용되어지고 있다. 실리카와 알루미나 같은 무기물 마이크로필러를 이용하여 제조된 고전적 에폭시/마이크로콤포지트가 전기적, 기계적, 열적특성의 맞춤형으로 상업화되었고 그리고 개발되어져왔다. 그 결과 그들의 비중도 감소하게 된 것이다. 그렇지만, 전기적 특성은 나노입자의 첨가로 인하여 종종 계면의 문제점이 결합으로 이어져, 품질이 떨어져 왔다. 특히, 유전율은 일반적으로 증가하여지고 그리고 파괴강도가 감소되어진 것이다[1].

나노기술의 발전으로 마이크로필러를 대체할 수 있는 연구가 발표되어져왔고, 그 결과 나노/마이크로필러의 조합으로 혼합된 연구결과가 발표되어져왔다. 중요한 점은 나노입자의 비표면적이 매우 커서, 고분자내에 분산시 계면특성 과 미분산시 뭉침현상으로 오히려 결합이 발생되어지는 역효과를 발생시키곤 한다. 균질하게 소량의 나노입자를 첨가하여 분산하게 되면, 유전율과 유전손실 그리고 전기적 절연파괴강도, 기계적 인장 및 굴곡강도 그리고 열적특성인 유리전이 온도의 향상을 가져 오게 된다. 즉, 유전율과 유전손실은 알루미나, 실리카, 층상실리케이트, 산화마그네슘 또는 보론질화나노필러(boron nitride nano-fillers)의 첨가에 의해 감소되어 질 수 있다[2,3,4]. 더불어 표면저항성의 향상으로 절연수명을 더욱더 길게 한 것이다[5].

Kozako 등[6,7]의 연구자들은 폴리아미드 층상실리케이트 나

노콤포지트 그리고 본 연구자[8]의 에폭시 층상실리케이트 멀티-콤포지트의 부분방전 저항성에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 그 결과 원형에폭시 및 나노콤포지트와 비교할 때 우수한 부분방전 저항성을 나타남을 알수있었다. 또한 Tanaka 등 연구자들은 [9] 역시 원형수지에 비교하여볼 때 에폭시 - clay 나노콤포지트에 대한 부분방전열화의 저항성이 향상됨을 관찰하였다. Fuse 등 연구자들[10]은 폴리아미드에 마이카의 첨가량은 원형에폭시 수지와 비교하여 볼 때 나노콤포지트의 표면열화저항이 증가함을 관찰하였다. P.Reeetha[11]은 전기적 방전에 노출된 동안 나노콤포지트의 층상나노필러 구조의 형성과 산화메커니즘의 기인한다는 사실을 주장하고 있다. 이것은 부분방전과 플라즈마 저항성이 나노필러함량 증가와 함께 증가함을 보여준 것이다. 계면화학은 마이크로 특성에 영향을 주고 그리고 입자분산과 콜로이드 안정성에 도움을 주기 때문에 중요한 것이다. 나노콤포지트의 전체적 특혜를 얻기 위한 재료-처리과정-특성과의 상호관계와 그들을 스케일-업하여 생산할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다 생각합니다.

본 연구에서는 10가지 샘플을 제조하여 부분방전 저항성에 관한 실험을 실시하였고 원형에 비하여 나노알루미나콤포지트, 마이크로 알루미나 콤포지트 그리고 멀티-나노콤포지트의 결과 멀티-나노콤포지트의 부분방전 저항성이 강함을 알 수 있었다.

### 2. Experiments

#### 2.1 재료

본 연구에 이용한 나노알루미나 입자는 Aluminium Oxide

\* Corresponding Author : Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Korea

E-mail: jjpark@joongbu.ac.kr

Received : May 13, 2016; Accepted : May 26, 2016

Power로서 국내 Sukgyung AT Co., LTD 산으로 SG-ALO30의 제품을 이용하였다. 결정형태는 감마상(Gamma Phase)으로서, 입자크기는 약 30 nm인 알루미늄나노입자이며, BET(비표면적:  $m^2/g$ )는  $100 \pm 20$ 으로서 1g당 표면적을 갖은 것이다. 또한 마이크로 알루미늄의 평균 입자크기는  $2\mu m$ 이고, 입자모양이 균질하지 않은 알파상의 입자를 사용하였다.

상업적인 GDEBA(diglycidyl ether of bisphenol A)타입 에폭시는 상품명 Araldite CT-200을 사용하였다. 점도는  $120^\circ C$ 에서  $390 \sim 520$  mP s이며, 밀도는  $25^\circ C$ 에서  $1.15g/cm^3$  에폭시 함량(equip./kg)은 2.55~2.7이다. 경화제(Hardener)는 제품명 HT 903로서 실내온도에서는 고체상체의 냄새가 나지 않은 Carboxylic acid anhydride 기반 경화제이다. 용점범위(melting range)은  $128 \sim 132^\circ C$ 이며, 밀도는  $130^\circ C$ 에서  $1.22 \sim 1.25 g/cm^3$ 이다. 산의 함량은  $\leq 3(\%)$ , 휘발성 함량은  $0 \sim 0.2\%$ 으로 외관상 백색의 파우더 형태를 갖는다.

경화제로서 사용된 Carboxylic acid type (anhydride)는 충전기 절연소재인 GIS Spacer의 절연소재로서 광범위하게 사용되고 있으며, 감마상 나노알루미늄의 표면개질을 위해 비실란계인 Glycerol diglycidyl ether (이하 GDE라 부른다.)를 사용하였다.

## 2.2 부분방전저항성 측정을 위한 시편제조

나노 알루미늄의 표면 특성을 향상시키기 위해서 표면개질제로 비실란계 GDE를 에폭시수지 대비 10wt%에 1g, 2g의 함량을 사용하였다. 나노알루미늄의 분산을 위하여 초음파처리장치를 이용하여 30분 동안 분산시켰다.

부분방전 저항성 측정에 사용한 샘플의 크기는  $50 \times 50 \times 1mm$ 로 제조하였다. 측정샘플은 표 1에서 나타낸 바와 같이 10종류의 샘플을 실험에 사용하였다.

표 1 샘플종류

Table 1 Types of Sample

Specimen	Epoxy Resin	Hardener	Glycerol diglycidyl ether	nano alumina	micro alumina
			gram	phr	wt%
Neat	100	40	0	0	0
$\mu A70wt\%$	100	40	0	0	70
nA_1phr_G1	100	40	1	1	0
nA_3phr_G1	100	40	1	3	0
nA_1phr_G2	100	40	2	1	0
$\mu A40wt\%$ _nA_1phr_G1	100	40	1	1	40
$\mu A40wt\%$ _nA_1phr_G2	100	40	2	1	40
$\mu A50wt\%$ _nA_1phr_G1	100	40	1	1	50
$\mu A50wt\%$ _nA_1phr_G2	100	40	2	1	50
$\mu A60wt\%$ _nA_1phr_G2	100	40	2	1	60

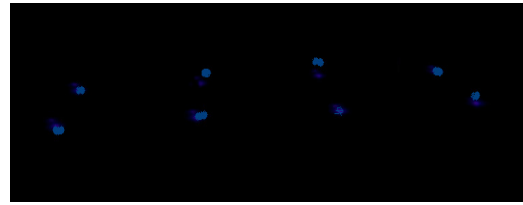


그림 1 부분방전 광방출

Fig. 1 Partial Discharge Light Emission

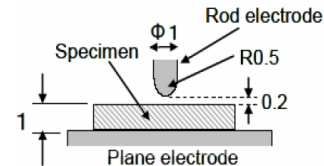


그림 2 부분방전 저항성의 전극 구성

Fig. 2 Electrode configuration of partial discharge resistance

poxy resin : Hardener=100:40

phr: part per hundred of epoxy

Neat: Epoxy Resins

nA: nano alumina

$\mu A$ : micro alumina

G: Glycerol diglycidyl ether(이하: GDE)

gram: GDE gram for nano alumina 10wt%

표 1에서 10가지 샘플에 대한 조성비를 나타내었다.

- (1) Neat: 원형에폭시(Araldite CT-200),
- (2)  $\mu A_{70wt\%}$  : 마이크로알루미나 70wt% 콤포지트
- (3) nA: 나노알루미나 콤포지트
- (4)  $\mu A+nA+G$ : 마이크로알루미나와 GDE로 표면처리된 나노알루미나의 혼합된 콤포지트 등, 전체 10 종류에 대한 시편을 부분방전 저항성 실험을 실시하였다.

## 2.3 부분방전 저항성 측정

부분방전 저항성 (Partial Discharge Resistance, 이하 PDR이라 한다.) 측정시스템은 그림 2에서 나타내었다. 부분방전시 발생된 광은 저항성 평가를 위하여 Rod 대 평판전극 시스템의 공기 갭으로부터 방출된 것이다. PDR의 광방출의 일시적 변화를 그림 1에서 나타내었다. 측정은 8개의 샘플을 동시에 측정할 수 있는 전극장치를 개발하여 측정하였고, 부분방전시 발생된 광은 Toshikatsu Tanaka[9]의 연구에서와 같이 열화시간에 의존하지 않음을 본 연구에서 확인 할 수 있었다. 부분방전은 초기 rod의 전극 선단부분에서 부분방전이 전체 영역에서 발생되었고, 인가전압 교류 4kV(720Hz)에서 168시간(7일) 후 전극의 침전단 부위에는 까맣게 변색이 되어있었다. 이는 공기 중 방전으로 인한 산화와 에폭시로부터 증발된 에폭시분자가 표면에 부착되어진 것으로 보이며, 오히려 이러한 전극표면을 덮고 있는 금속산화물과 절연재료의 부

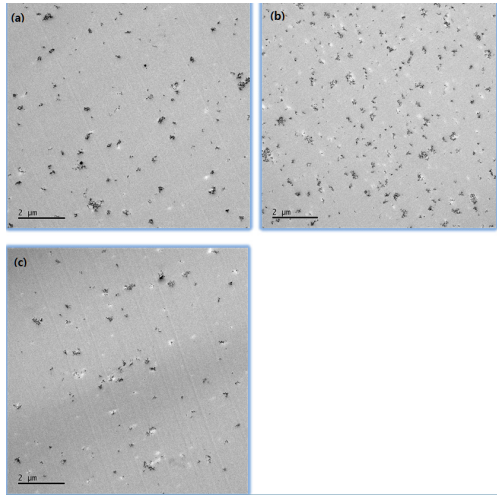


그림 3 에폭시 매트릭스에서 분산된 나노알루미늄의 TEM 영상.  
 (a) nA\_1phr\_G1 (b) nA\_3phr\_G1 (c) nA\_1 phr\_G2  
**Fig. 3** TEM image for the nano alumina particles dispersed in epoxy matrix. (a) nA\_1phr\_G1 (b) nA\_3phr\_G1 (c) nA\_1phr\_G2

착이 부분방전의 저항성을 억누르게 할 수 있는 것이다[9].

### 3. 결과 및 검토 고찰

#### 3.1 TEM

에폭시수지에서 나노알루미늄 입자가 분산된 내부 균질성 분석을 위해 3종류의 샘플을 10000 배율의 TEM 영상을 이용하여 수행하였다. 3종류의 샘플은 그림 3에 나타난 바와 같이 (a) 나노알루미늄 1phr, GDE1 (b) 나노알루미늄 3phr, GDE1 그리고 (c) 나노알루미늄 1phr, GDE2 의 내부구조를 촬영한 영상이다. 나노알루미늄 함량은 1phr, 3phr의 양에 관계없이 분산결과 대체로 입자가 균질하게 분산된 결과를 보여주고 있는 것이다.

#### 3.2 PDR (Partial Discharge Resistance)

표면부분방전 저항성평가를 위해 여러종류의 nA콤포 지트를 제조하였고 원형에폭시 수지 샘플과 비교하였다. 그리고 고전적  $\mu\text{A}$ 와 멀티나노알루미늄( $\mu\text{A}+\text{nA}+\text{GDE}$ )와 역시 비교하였다. 침식물은 교류 4kV/720Hz 를 168시간 동안 Rod전극 대 평판전극하에 1mm 절연 두께를 갖는 판상 절연체사이에 노출된 침식깊이를 계산하여 나타내었다.

##### 3.2.1 Neat 및 nA콤포지트의 PDR 침식깊이 및 프로파일

그림 4와 그림 5에서는 원형에폭시수지(Neat)에 침식된 표면의 형상을 현미경에서 관찰된 영상으로 그림 5(a)에 나타내었고 그리고 그림 5(b)에서는 침식깊이를 profiler에 의해 측정된 표면

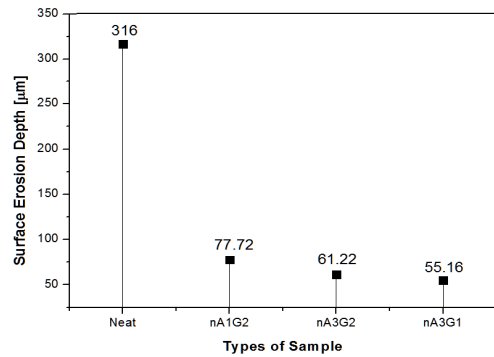
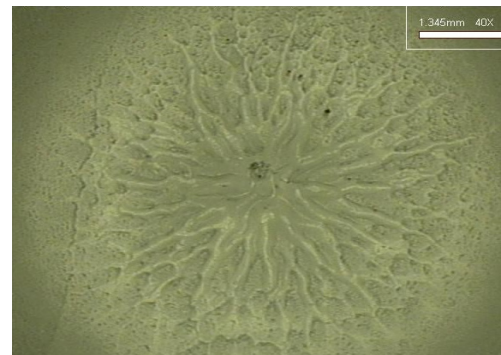
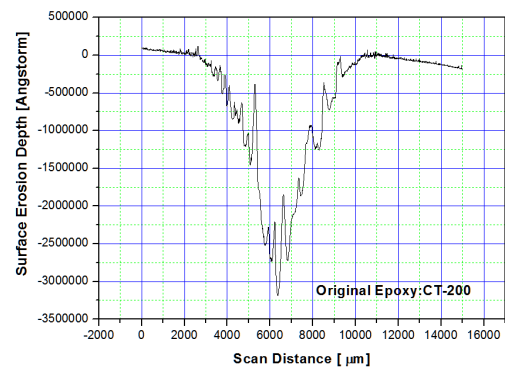


그림 4 Neat와 nA의 PDR에 의한 침식깊이  
**Fig. 4** Erosion Depth of PDR for Neat and nA



(a) microscope image of Neat



(b) erosion profile of Neat

그림 5 Neat의 PDR에 의한 침식깊이 영상 및 프로파일  
**Fig. 5** Erosion of microscope image and profile of Neat for PDR

침식 profile을 나타내었다. 가장 깊은 곳의 침식깊이는 원형에폭시수지의 경우 316 $\mu\text{m}$ 를 나타내었고, nA 콤포지트와 침식깊이를 비교하여 보면, nA를 1phr 충전 분산시킨 경우 77.2 $\mu\text{m}$ , nA를 3phr분산시킨 샘플의 경우 61.22 $\mu\text{m}$ 가 침식되었다.

nA의 충전함량이 많아질수록 침식률이 낮았다. 그리고 같은 nA 3phr의 경우 표면처리제의 첨가량 비교에 따라 GDE를 1g 과 2g 처리한 경우, 2g를 처리한 경우 약간 침식률이 높게 나타

난 결과이었다. Neat에폭시수지와 nA콤포지트 간의 침식결과를 비교하여볼 때 대략 5.72배 침식률 차이로, nA콤포지트가 PDR에 강함을 알 수 있었다.

Neat와 nA 콤포지트와의 큰 PDR의 표면침식 차이를 나타낸 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

Neat와 nA 표면침식 profile 경우, 원형에서는 대체로 매끄럽게 요철이 진행된 점과 nA 콤포지트의 경우 상대적으로 작은 요철이 매우 많이 발생된 점을 들 수 있다. P.Preetha의 연구자들 [11]은 두 종류의 에폭시에서 나노콤포지트와 상호작용을 하는 부분의 계면과 전혀 상호작용을 하지 않은 느슨한 경우를 통하여 볼 때, 이런 느슨한 에폭시재료의 체적은 nA입자의 함량에 상당히 의존적이다. 부분방전에 지배되어있을 때, 느슨한 에폭시는 nA 콤포지트와 단단하게 계면의 결합을 갖은 경우보다 매우 빠르게 열화(침식)되는 경향을 나타내었다.

부분방전 노출시간이 길어지면 침식깊이 축을 따라 또는 샘플의 폭으로 확장이 더욱더 진행되어지는 경향이었고 방전이 진행하는데 대하여 저항성이 최소로 이루어진다는 점을 알 수 있었다. 그러나 본 연구에서의 경우처럼 nA 입자의 표면 개질된 샘플은 부분방전이 진행하여도 진행이 제한적이고, nA 콤포지트라도 에폭시부분이 존재하는 방향으로 진행방향이 이루어지고 그리고 나노입자들이 존재한 곳에서는 더욱더 부분방전 저항성이 강하게 나타나게 되어 침식률이 약하게 되어졌다. 그런 이유로 nA 콤포지트의 경우는 매우 작은 요철이 다수개 존재하지만, 원형인 경우 매우 부드러운 요철이 깊게 나타난 결과로 사료된다. 또한 nA 콤포지트 충전함량의 차이 결과에서 nA\_1phr의 경우보다 3phr의 경우가 입자와 입자상호간 거리가 매우 좁다. 그러나 반대로 함량이 낮은 경우는 입자간 거리가 매우 크게 된다. 그래서 느슨한 에폭시의 양의 존재가 많으면 느슨한 에폭시부분을 뚫고 진전 하게 될 것이다. nA 충전함량이 많아지면 그런 현상이 매우 둔화되는 결과로 침식깊이가 얇게 되는 결과를 초래하게 될 것이다.

### 3.2.2 멀티-nA콤포지트의 GDE 변화에 대한 PDR

그림 8과 10의 경우는 에폭시 멀티-nA 콤포지트 샘플의 경우  $\mu\text{A}$  충전함량 및 GDE변화에 따른 PDR 침식깊이대한 특성을 나타내었다. 또한 그림 9, 11에서는  $\mu\text{A}$ 의 충전함량 40, 50wt%에 대한 멀티-nA 콤포지트의 침식 프로파일에 대한 침식형상을 보여주고 있다.

그림 8에서는  $\mu\text{A}_{40\text{wt}\%}$ , nA\_1phr 그리고 nA입자 표면처리를 위한 비실란처리제 1, 2g의 변화의 멀티-콤포지트의 침식된 깊이를 나타낸 경우로서, GDE1일 때 (78.22 $\mu\text{m}$ ) 그리고 2g일 때 (86.77 $\mu\text{m}$ )의 결과를 얻었다.

그림 10의 경우  $\mu\text{A}_{50\text{wt}\%}$ , nA\_1phr 그리고 nA입자 표면처리를 위한 비실란처리제 1, 2g의 변화에 대한 멀티-콤포지트 침식된 깊이를 나타낸 경우로서, GDE\_1g일 때(54.66 $\mu\text{m}$ ) 그리고 2g일 때(56.92 $\mu\text{m}$ )의 결과를 얻었다.

이상의 결과로부터 첫째로, GDE의 표면처리제의 첨가량이 증가할 때(1g  $\rightarrow$  2g) 침식이 더욱 용이함을 알 수 있었다. 구체적으

로  $\mu\text{A}_{40\text{wt}\%}$ 인 경우 침식률이 10.9% 증가하였고 그리고  $\mu\text{A}_{50\text{wt}\%}$ 인 경우 침식률이 4.1% 증가하였다.

둘째로, GDE의 중량을 일정하게 하고,  $\mu\text{A}$  충전함량을 증가시켰을 때(40wt%  $\rightarrow$  50wt%) GDE1인 경우 43% 침식률이 감소하였고 그리고 GDE2인 경우 52.5% 역시 침식률이 감소됨을 알 수 있었다.

glycerol diglycidyl ether (GDE)는 양쪽 말단에 epoxide ring과 친수성기가 달려 있는 분자량이 작은 GDE가 사용되었고 그리고 알루미늄 입자 표면은 친수성기가 많아 OH기가 달려 있는 GDE와의 친화력이 좋고 GDE 말단에 epoxide ring이 달려 있어 에폭시와도 우수한 친화력을 갖게 된다. 이런 이유로 알루미늄과 에폭시(CT-200) 간의 빈 공간에 GDE를 붙여 에폭시수지와 nA 간의 계면접착력과 분산성이 향상될 수 있다 (그림 6).

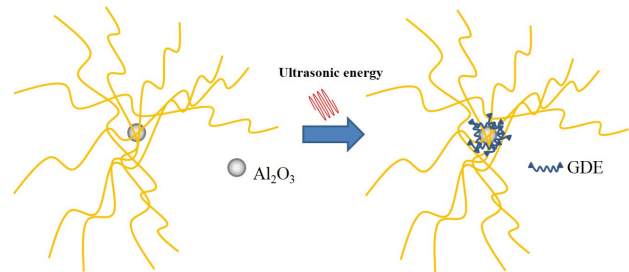


그림 6 GDE 표면처리된 nA입자의 모식도.

Fig. 6 Diagram of surface modified nA particle to GDE

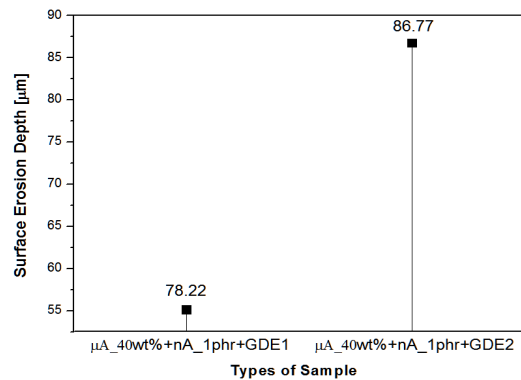


그림 7 에폭시 멀티-nA콤포지트의 GDE변화에 따른 PDR의 침식 깊이 ( $\mu\text{A}_{40\text{wt}\%}$ )

Fig. 7 Erosion Depth for PDR according to GDE Variation of Epoxy Multi-nA Composites ( $\mu\text{A}_{40\text{wt}\%}$ )

GDE 첨가량의 증가는 에폭시수지에 nA 첨가량이 증가한 경우 유리전이 온도가 낮아지는 경향을 확인하였다. 이유는 고분자 사슬의 유동성이 결과적으로 GDE 첨가량이 증가할수록 감소하기 때문이며, 낮은 에너지를 가하여도 고분자 사슬이 쉽게 움직인 결과, 유리전이온도가 낮아지는 결과이다.

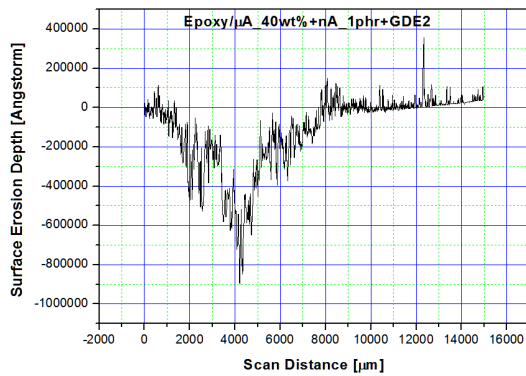


그림 8 에폭시 멀티-나노알루미나 콤포지트의 침식프로파일 (μA\_40wt%)  
 Fig. 8 Erosion profile for Epoxy Multi-nA Composites (μA\_40wt%)

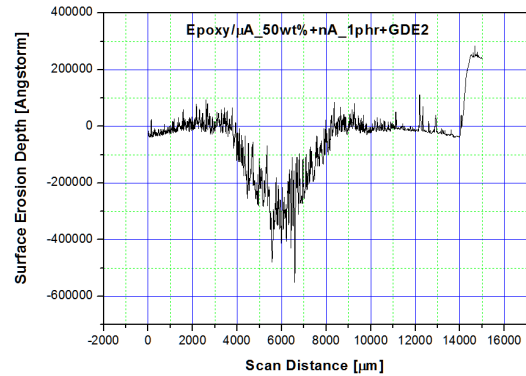


그림 10. 에폭시 멀티-nA 콤포지트의 침식프로파일 (μA\_50wt%)  
 Fig. 10 Erosion profile for Epoxy Multi-nA Composites (μA\_50wt%)

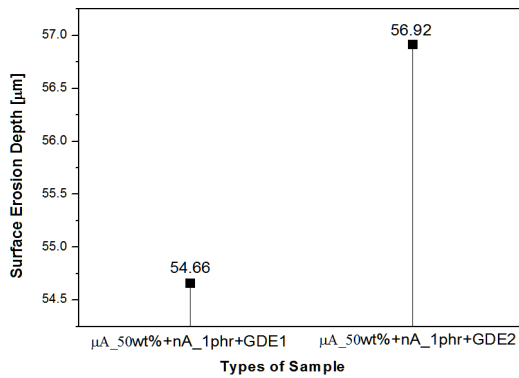


그림 9 에폭시 멀티-nA 콤포지트의 GDE변화에 따른 PDR의 침식깊이 (μA\_50wt%)  
 Fig. 9 Erosion Depth for PDR according to GDE Variation of Epoxy Multi-nA Composites (μA\_50wt%)

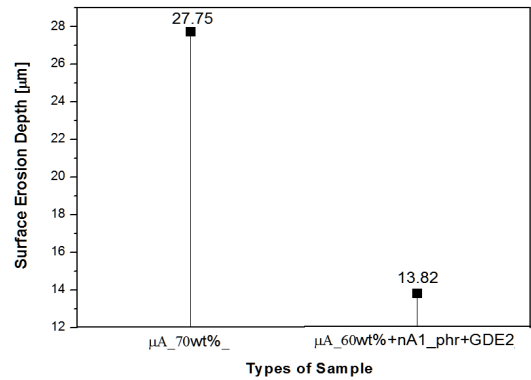


그림 11 μA콤포지트와 멀티-nA 콤포지트의 침식깊이  
 Fig. 11 Erosion Depth for μA Composites and Multi-nA Composites

그런 이유로 μA입자를 일정하게 하고 GDE 첨가량을 증가한 경우 표면침식이 더욱 용이한 이유는 nA입자와 에폭시수지사이 계면의 유동성이 증가하기 때문에 PD가 지속적으로 주어질 때, 계면부분이 약화되어 침식이 용이한 조건이 되기 때문이다. 또한 GDE조건이 일정하게하고, μA입자의 충전함량이 증가되면 에폭시 수지 및 nA의 함량은 변화되지 않고 단지 μA입자만 과량 충전 되어 PDR이 지속적으로 발생하여도 μA의 PDR이 더욱 강해지기 때문에, PDR이 더욱 강하게 나타난 결과이다.

μA\_40wt%와 50wt%의 경우 43%, 52.5% 침식율을 나타낸 이유로 생각된다.

### 3.2.3 μA 콤포지트와 Multi-nA 콤포지트의 PDR

그림 11에서는 에폭시 μA\_70wt%을 충전시킨 μA콤포지트와 에폭시 멀티-nA 콤포지트(μA\_60wt%+nA\_1phr+GDE2)의 표면 침식결과 μA의 경우 27.75μm의 침식깊이를 나타내었고 그리고

멀티-nA 콤포지트의 경우 13.82μm 침식을 나타내었다. μA의 경우보다 멀티-nA의 경우 부분방전 저항성이 200% 억제되는 결과의 효과를 나타내었다. 여기서는 과량의 μA가 원형에폭시수지와 결합된 μA콤포지트로서 마이크로 입자사이즈는 1~2μm이며, nA의 입자사이는 20~30nm의 입자분포를 갖는 것으로 μA는 alpha-alumina이며, nA는 gamma-alumina를 사용한 것이다.

세 가지 원인으로서는 200%의 부분방전 저항성이 우수한 멀티-나노콤포지트와의 비교를 통한 결과를 분석하여 보면 다음과 같다.

첫째, 나노입자의 표면개질의 효과로서, GDE의 경우는 양쪽 말단에 epoxide ring과 친수성기가 달려 있는 OH기가 존재하는 분자량이 작은 GDE의 역할이 계면의 강화와 나노입자의 상호작용력의 강화를 가져와 μA에 비하여 상대적으로 강한 결합력의 원인이 될 수 있다. 앞서 설명한 바처럼 nA 경우 GDE의 효과는 부분방전 저항성에대한 침식깊이를 낮게 한 결과를 설명하였다. Toshikatsu Tanaka의 나노필러주변에 형성된 멀티-코어(multi-core) 이론[12]에서처럼 부분방전저항성이 크게 기여한 것이다.

둘째, μA+nA 최적의 혼합비가 마이크로와 나노사이 혼합에

의해 조직적인 배합으로 마이크로사이 나노입자의 치밀한 배열의 조직이 부분방전 저항성에 대한 침식을 약화된 원인으로 사료된다.

셋째, 과량의  $\mu\text{A}$  입자 충전으로 계면과 더불어 강력한 입자간의 힘이 크게 작용되어, 느슨한 에폭시부분이 부분방전의 지속적인 원인이 되어도 침식이 이루어지지 않은 원인이 된 것이다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 GIS Spacer의 절연소재를 개발하기 위하여 부분방전 저항성에 관한 연구를 실시하였다.

10가지의 샘플을 제조하였다. Neat, nA를 GDE의 표면개질제를 처리한 에폭시/nA 콤포지트 (3종류), 에폭시/ $\mu\text{A}$ \_70wt% 콤포지트, 에폭시/nA/ $\mu\text{A}$ +GDE를 처리한 멀티-콤포지트(5종류)를 이용하여 4kV/720Hz에서 168시간 인가후 부분방전저항성의 특성을 연구하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. nA입자의 표면처리를 위해 glycerol diglycidyl ether(GDE)의 첨가량 증가에 따른 에폭시/nA 콤포지트의 PDR에 따른 표면 침식이 더욱 증가한 결과를 얻었다.
2. 에폭시/멀티-나노콤포지트( $\mu\text{A}$ +nA+GDE)에 따른 PDR의 표면 침식깊이 측정에서,  $\mu\text{A}$  입자의 충전함량이 증가하면 PDR에 의한 침식진행이 둔화되고 그리고  $\mu\text{A}$ +nA 일정한 상태에서 GDE 첨가량 증가에 따라 침식 깊이도 증가하는 결과이다.
3. 에폭시/ $\mu\text{A}$ \_70wt%와 멀티-나노콤포지트( $\mu\text{A}$ \_60wt%+ nA\_1phr+GDE2) 콤포지트에서 멀티-나노콤포지트가 200% 표면침식이 감소함을 알았다.
4. 이상의 결론으로 PDR의 표면침식에서 GDE의 표면 개질은 에폭시수지와 nA입자계면의 강화를 가져오고 그리고 GDE 첨가량 증가하면 오히려 고분자 사슬의 유동성이 커서 오히려 PDR에 의해 침식이 용이함으로 생각된다. 또한 nA와  $\mu\text{A}$ 의 최적의 혼합은 조직의 치밀성을 증가시키고 그로 인하여 PDR의 침식에 오히려 강한특성의 결론을 얻었다.

### References

- [1] J. Keith Nelson, J. C. Fothergill, "Internal charge behavior of nanocomposites", Nanotechnology, Vol. 15, 2004
- [2] Q. Wang, G. Chen. and A. S. Alghamdi, "Influence of nanofillers on electrical characteristics of epoxy resins insulation", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2010
- [3] T. Andritsch, R. Kochetov, P. H. Morshuis, and J. J. Smitt, "Dielectric properties and space charge behavior of MgO-epoxy nanocomposites", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2010
- [4] R. Kochetov, T. Andritsch, U. Lafort, P. H. F. Morshuis, S. J. Picke, and J. J. Smit, "Preparation and Dielectric

Properties of Epoxy-BN and Epoxy-AIN Nanocomposites," IEEE Electrical Insulation Conference, PP. 397-400, 2009.

- [5] T. Tanaka, Y. Ohki, M. Ochi, M. Harada, and T. Imai, "Enganced 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, PP. 81-89, 2008.
- [6] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, T. Tanaka, "Surface Degradation of Polyamide Nanocomposites Caused by Partial Discharges Using IEC(b) Electrodes", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 833-839, 2004.
- [7] M. Kozako, R. Kido, T. Imai, T. Ozaki, T. Shimizu and T. Tanaka, "Surface Roughness Change of Epoxy/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites due to Partial Discharges", Intern. Sympos. Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan, pp. 661-64, 2005.
- [8] Jae-jun Park, "Effect of Electric Frequency on the Partial Discharge Resistance of Epoxy Systems with Two Diluents", Transaction on Electrical and Electronic Materials, Vol. 14, No. 6, pp. 317-320, 2013
- [9] T. Tanaka, T. Yazawa, Y. Ohki, M. Ochi, M. Harada and T. Imai, "Frequency Accelerated Partial Discharge Resistance of Epoxy/Clay Nanocomposite Prepared by Newly Developed Organic Modification and Solubilization Methods", IEEE Intern. Conf. Solid Dielectrics (ICSD), Winchester, UK, PP. 337-340, 2007.
- [10] N. Fuse, Y. Ohki, M. Kozako and T. Tanaka, "Possible Mechanisms of Superior Resistance of Polyamide Nanocomposites to Partial Discharges and Plasmas", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15 pp. 161-170, 2008.
- [11] P. Preetha and M. Joy Thomas, "Partial Discharge Resistant Characteristics of Epoxy Nanocomposites", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, PP. 264-274, 2011.
- [12] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse and Y. Ohki, "Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol 12, pp. 669-681, 2005.

## 저 자 소 개

박재준(Jae-Jun Park)

전기학회 논문지 62권 12호 참조