

## 에폭시 알루미나 멀티-컴포지트의 기계적 특성연구

박재준<sup>a</sup>

중부대학교 전기전자공학과

### Mechanical Properties of Epoxy Alumina Multi-Composites

Jae-Jun Park<sup>a</sup>

Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Goyang 10279, Korea

(Received October 15, 2016; Revised November 17, 2016; Accepted November 23, 2016)

**Abstract:** In order to develop an electrical insulation material for gas GIS (insulation switch gear) spacer, 4 types of epoxy/micro-alumina (40, 50, 60, 70 wt%) composites and 9 types of epoxy/nano-alumina (1, 3, 5 g)/micro-alumina (40, 50, 60, 70 wt%) composites were prepared and tensile test was carried out. In here, nano-alumina was previously surface-treated with GDE (glycerol diglycidyl ether). As micro-alumina and GDE-treated nano-alumina contents increased, tensile strength increased and the highest value was shown in the system with 3 g GDE-treated nano-alumina.

**Keywords:** GIS spacer, Tensile strength, Epoxy/micro alumina composites, Epoxy/micro-nano alumina composites, Nano alumina surface modification

#### 1. 서 론

에폭시수지는 고체 절연 개폐기(solid insulated switchgear, SIS)와 가스 절연 개폐기(gas insulated switchgear, GIS)의 절연 시스템에 필수적인 재료이다. 예로서, SIS는 많은 주요한 회로를 몰드하는데 많은 에폭시 캐스팅을 요구하고 있고, GIS는 GIS 탱크 내에 내부도체를 지지하는 절연 Spacer를 요구하고 있다 [1,2]. 에폭시수지는 보통 알루미늄 또는 구리의 열팽창계수와 같은 낮은 열팽창계수를 얻기 위해 많은 양의 마이크로 필러들을 충전하고 있다. 낮은 열팽창계수를 갖는 고전적 충전 에폭시는 에폭시 캐스팅 부분과 열 사이클에 의해 원인이 되는 도체 사이 박리를 피하기 위한 것이다 [3,4].

에폭시 나노컴포지트는 전기적, 열적 그리고 기계적 스트레스를 억제할 수 있기 때문에 다방면의 절연재료를 이용하고 있음은 주지의 사실이다 [9]. 그렇지만, 나노 컴포지트의 특성은 필러와 매트릭스 사이 계면의 상호작용만큼 나노필러의 형상과 종류에 의존한다 [10]. 요구된 응용을 위한 에폭시수지를 보강하는 일반적인 방법은 나노클레이, 나노알루미나 그리고 나노실리카와 같은 유기와 무기필러 그리고 마이크로와 나노의 조합이다 [11-13]. 기계적 특성인 경도, 내마모성 그리고 기계적인 인장 강도와 같은 흥미로운 특성을 갖는 나노알루미나의 우수한 유전 특성 그리고 열적 열전도가 전기적인 절연 소재로 이용될 수 있다. 초기의 연구는 가령 공간전하, 체적저항 비유전을 그리고 유전정점과 같은 나노알루미나를 충전한 에폭시 컴포지트를 조사하였다 [10,14,15]. 그러나 나노단독으로는 전기적인 특성을 향상시킬 수 있지만, 그러나 기계적인 특성의 향상은 어려운 경우이다. 그런 이유로 나노와 마이크로를 혼합한 연구를 통하여 기계적 그리고 전기적인 특성의 향상을 위해 연구를 계속하고 있다.

a. Corresponding author; [jjpark@joongbu.ac.kr](mailto:jjpark@joongbu.ac.kr)

본 연구에서는 GIS spacer에 응용할 기계적인 특성 향상을 위하여, 나노와 마이크로 알루미나를 혼합한 콤포지트를 개발하기 위해, 나노알루미나에 GDE 1, 3, 5 g을 첨가하여 표면개질을 실시하였고, 개질된 나노와 마이크로알루미나 40, 50, 60 wt%를 혼합한 콤포지트를 제조하였다. 샘플을 이용하여 기계적인 인장 강도의 특성연구를 실시하였고 그 결과 와이בל플롯으로 나타내어 해석하였다.

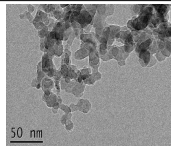
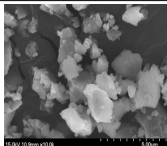
## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

본 연구에 이용한 나노알루미나 입자는 aluminium oxide power로서 국내 Sukgyung AT Co., LTD산으로 SG-ALO30의 제품을 이용하였다. 나노입자와 마이크로 입자의 특성은 표 1에서 나타내었다. 상업적인 DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A) 타입 에폭시는 상품명 Araldite CT-200을 사용하였다. 점도는 120°C에서 390~520 mPs이며, 밀도는 25°C에서 1.15 g/cm<sup>3</sup> 에폭시 함량(equip./kg)은 2.55~2.7이다. 경화제(hardener)는 제품명으로 HT 903로서 실내용도에서는 고체 상태에서 냄새가 나지 않는 carboxylic acid anhydride 기반 경화제이다. 용점 범위(melting range)는 128~132°C이며, 밀도는 130°C에서 1.22~1.25 g/cm<sup>3</sup> 이다. 산의 함량은 ≤3%, 휘발성 함량은 0~0.2%으로 외관상 백색의 파우더 형태를 갖는다.

경화제로 사용된 carboxylic acid type (anhydride)는 중전기기 절연소재인 GIS spacer의 절연소재로서 광범위하게 사용되고 있으며, 감마상 나노알루미나의 표면개질을 위해 비실란계인 GDE (glycerol diglycidyl ether)를 사용하였다.

Table 1. Properties of fillers for the specimens.

Property	Nano alumina	Micro alumina
Mean particle size	30 nm	1 ~ 2 μm
Crystal form	gamma phase	alpha phase
Particle shape		

### 2.2 기계적 인장 강도 특성용 에폭시-마이크로 알루미나-나노 알루미나 콤포지트의 제조 과정

GIS spacer 절연소재 개발을 위해 그림 1에서 나타낸 과정을 통하여 에폭시/마이크로 알루미나/나노알루미나 콤포지트의 제조방법을 나타내었다.

제조된 샘플은 표 2에 나타낸 바처럼 에폭시 원형, 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트(40, 50, 60, 70 wt%) 4종류, 에폭시/알루미나 멀티-콤포지트 즉, 에폭시/마이크로알루미나 40 wt%/나노알루미나 1 phr/

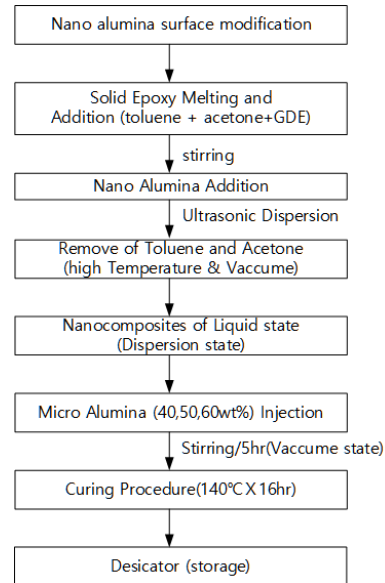


Fig. 1. Preparation procedure of composites for epoxy/micro alumina-nano alumina composites.

Table 2. Type of sample.

Specimen	ER	Hardener	GDE	NA	MA
			gram	phr	wt%
ER	100	40	0	0	0
MA 40 wt%	100	40	0	0	40
MA 50 wt%	100	40	0	0	50
MA 60 wt%	100	40	0	0	60
MA 70 wt%	100	40	0	0	70
MA 40 wt% /NA 1 phr/GDE(1, 3, 5)g	100	40	1, 3, 5	1	40
MA 50 wt% /NA 1 phr/GDE(1, 3, 5)g	100	40	1, 3, 5	1	50
MA 60 wt% /NA 1 phr/GDE(1, 3, 5)g	100	40	1, 3, 5	1	60

GDE (1, 3, 5 g) 콤포지트 3종류, 에폭시/마이크로알루미나 50 wt%/나노알루미나 1 phr/GDE (1, 3, 5 g) 콤포지트 3종류 그리고 에폭시/마이크로알루미나 60 wt%/나노알루미나 1 phr/GDE (1, 3, 5 g) 콤포지트 3종류를 제조하였다. 본 연구에 사용한 샘플 종류는 14종류로서 각각 8개의 샘플을 이용하여 측정된 결과를 나타내었다.

### 2.3. 기계적인 특성 실험

인장 강도는 기계적 특성 중에 가장 대표적인 것으로 시험방법은 JIS B7502 규정에 따른다. 인장 강도를 측정하는 기기는 universal tester (SHM-C-500, Shamhan Tech)를 사용하였다. 측정은 시험편의 양단을 붙잡고 cross-head speed를 10 mm/min의 일정한 속도로 인장하중을 가하는 시험기를 이용하였다. 측정은 자체 소프트웨어를 이용하여 인장응력-변형곡선의 관계로부터 인장 강도 및 탄성률 등을 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기계적 특성 연구

#### 3.1.1 에폭시/마이크로 알루미나 콤포지트 인장 강도

그림 2에서는 마이크로 알루미나 필러의 충전 함량 증가에 따른 기계적 인장 강도 특성을 와이블플롯으로 나타내었고 그리고 표 3에서는 특성값을 나타내었다. 와이블 플롯의 특성파라미터인 스케일파라미터(63.2%)와 B10(10%) 수명은 충전 함량 증가에 따른 인장 강도의 결과를 나타낸 것이다. 마이크로알루미나의 입도분포는 1~2  $\mu\text{m}$  크기였고, 알파상(alpha phase) 알루미나로서 균질 분산된 콤포지트로서, 충전 함량 40, 50, 60, 70 wt%로 증가하면, 전반적으로 기계적 인장 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 충전 함량 40~70 wt% 범위에서는 에폭시원형수지 보다 상대적으로 높은 인장 강도의 결과를 나타내었다. 그 결과 원형 에폭시수지의 경우 73.29 MPa, 40 wt%에서는 원형에폭시수지에 비하여 7.14%, 50 wt%에서는 11.33%, 60 wt%에서는 20.74% 그리고 70 wt%에서는 26.41% 크게 향상된 결과를 얻었다. 그리고 절연파괴 강도의 경우 40 wt%에서 70 wt%까지는 감소하는 기계적 인장 강도의 특성 결과와는 반대로 나타내었다 [5].

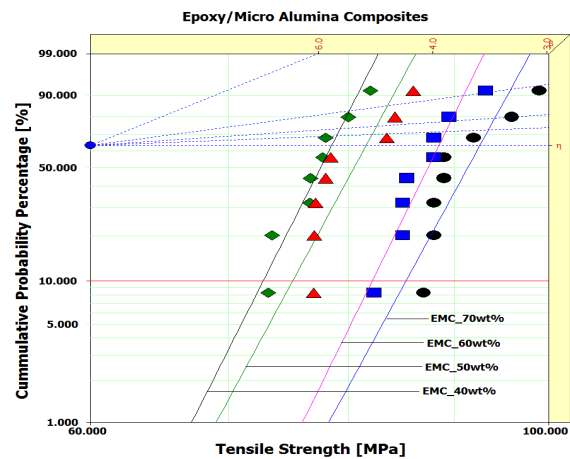


Fig. 2. Weibull plot mechanical tensile strength properties according to micro alumina content.

Table 3. Properties parameter of weibull plot for Fig. 2.

Samples	Shape parameter	Scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
Epoxy resin	13.03	73.29	61.71
MA 40 wt%	29.45	78.52	72.71
MA 50 wt%	27.53	81.59	75.17
MA 60 wt%	30.23	88.49	82.14
MA 70 wt%	27.29	92.64	85.33

이상의 결과를 정리하여 보면, 마이크로 알루미나 입자의 크기를 비교 평가할 때, 마이크로 알루미나 입도분포는 1~2  $\mu\text{m}$ 이지만, 다량의 미세한 알루미나 입자들이 다량 존재 하고 있다. 원형 에폭시수지에 마이크로알루미나 필러를 충전 하는 것은 순수한 에폭시수지에 불순물을 투입하는 경우와 같다. 그러나 기계적 특성은 마이크로알루미나 입자의 충전에 의해 인장 강도 특성 향상을 가져왔다.

그러나 마이크로알루미나 필러 자체로서는 충전기기에 사용할 절연물을 설계할 수가 없다. 왜냐하면, 소량의 마이크로 알루미나필러가 소량 충전 할 때면 입자수가 상대적으로 적기 때문에 입자간의 거리가 대단히 멀리 떨어져있게 된다. 그와 같은 입자의 내부 분포상태에서는 오히려 마이크로알루미나필러가 불순물로 작용할 수 있는 경향을 갖게 된다. 즉, 기계적 결함의 시점이 되어 진다는 것이다. 그러므로 충전 함량이 증가

되면 될수록 마이크로알루미나 입자간 간격이 좁아지고 그리고 계면이 상대적으로 증가하게 되어, 입자 간격이 좁아지면 수지의 영역이 좁아 들게 되어, 반대적인 기계적 특성 향상을 가져올 수 있는 무기물의 영역이 증가된 결과로 인하여 인장 강도 특성향상을 가져올 수가 있다 사료된다.

그러나 기계적 특성향상의 핵심은 마이크로알루미나가 에폭시수지에 균질한 상태로 분산이 이루어져야만 한다. 그리고 내부 구조적인 조직에 의해 마이크로 알루미나 입자가 에폭시수지와 계면의 결합력을 크게 가질 때, 특히 기계적 특성향상을 가져오게 되는 것이다. 마이크로알루미나의 문제점은 계면이 작기 때문에 장시간 하중의 스트레스를 지속적으로 받게 되면, 마이크로 알루미나 필러와 수지 계면과의 결합력 약화로 치명적인 계면 결함이 발생하게 된다. 그런 이유로 현재 상용화하여 제조된 전력기기의 경우 장시간 신뢰성에 노출되어 수명을 짧게 하는 원인이 된다.

본 연구에 사용한 마이크로 알루미나 입도분포는 1~2 μm 정도를 사용하였다. 그러나 실제로 입도분포에서 1~2 μm 보다 훨씬 작은 입자들이 상당부분 존재하고 있다. 그런 입자들이 혼합되어 과량인 70 wt% 정도이면 입자간 간격이 매우 좁아지고, 상대적으로 수지 층이 감소되는 결과를 가져온 결과이다. 연구에 사용되는 마이크로알루미나 필러가 인공적으로 제조된 것이 아니므로, 필러자체의 형상과 표면이 SEM에서 보여준 바처럼 균질한 형상이 아니고, 마이크로알루미나 표면이 심하게 요철이 발생되어 마이크로 보이드 및 나노 보이드와 같은 미소 공극이 생성되어 있을 수가 있다. 그런 이유로 균질하고 보이드가 없는 교반과 탈포 그리고 표면처리를 통하여 최소한의 결함을 제거하여야만 완전한 절연소재가 탄생될 것이며, 성능의 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.1.2 에폭시/알루미나 멀티-컴포지트의 인장 강도 특성

그림 3, 표 4에서는 에폭시/마이크로알루미나 40 wt% 콤포지트, 에폭시/마이크로알루미나 40 wt%-나노알루미나 1 phr-GDE 1, 3, 5 g 첨가된 콤포지트 (에폭시/멀티-컴포지트)는 에폭시수지에 표면개질된 나노알루미나입자를 첨가하여 마이크로알루미나와 함께 혼합하여 제조된 콤포지트이다. 그 샘플에 대한 기계적 인장 강도 특성에 대한 연구 결과를 와이블플롯과 특성 파라미터 결과를 나타낸 것이다.

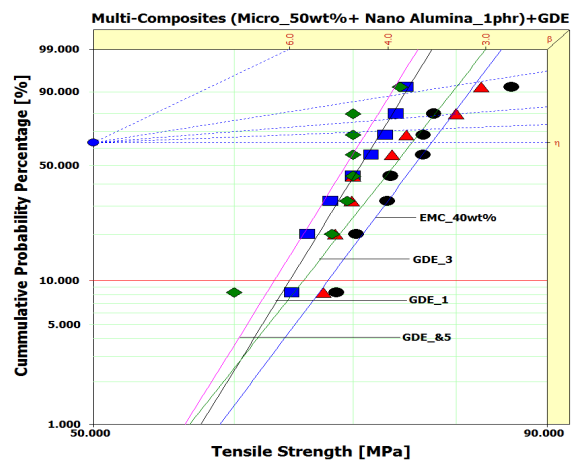


Fig. 3. Weibull plot of mechanical tensile strength for various epoxy/multi-composites (MA 40 wt%, MA 40 wt%/NA 1 phr/GDE 1, 3, 5 g).

Table 4. Parameter properties for weibull plot of Fig. 3.

Samples	Shape parameter	Scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
Micro alumina 40 wt%	16.79	77.49	67.70
Micro alumina 40 wt% /Nano 1 phr/GDE 1	20.46	71.99	64.47
Micro alumina 40 wt% /Nano 1 phr/GDE 3	15.96	75.58	65.62
Micro alumina 40 wt% /Nano 1 phr/GDE 5	20.28	70.65	63.24

4종류 샘플에 대한 와이블플롯의 스케일 파라미터 (63.2%) 와 B10수명(최하위: 10% 값)의 결과를 분석하면, 마이크로 알루미나 콤포지트의 형상파라미터는 16.79이며, 절연파괴강도 77.49 MPa의 측정 결과를 나타내었다. 그리고 나머지 3종류의 멀티-컴포지트 경우는 형상파라미터가 20.46, 15.96 그리고 20.28의 결과를 나타내었다. 대체로 측정결과 균질성이 양호한 결과를 나타낸 것이다. 에폭시/알루미나 멀티-컴포지트 의 인장 강도(MA\_40 wt%/NA\_1 phr/GDE 1, 3, 5 g) 결과는 GDE 첨가량의 변화 결과에도 경우에도 마이크로 알루미나 콤포지트에 비하여 상대적으로 감소되는 결과를 얻게 되었다. 결과적으로, 마이크로알루미나 40 wt% 콤포지트를 기준으로 할 때, GDE 3인 경우 75.58 MPa로서 최대값을 나타내었다. 마이크로 알루미나 콤포

포지트에 비하여 2.53% 낮은 결과이다.

그림 4, 표 5에서는 에폭시/마이크로 알루미나 50 wt% 콤포지트, 에폭시/마이크로알루미나 50 wt%-나노알루미나 1 phr-GDE 1, 3, 5 g 첨가된 콤포지트의 인장 강도의 와이블플롯과 특성값을 나타낸 결과이다. 그 결과 마이크로알루미나 50 wt% 콤포지트 보다 멀티알루미나-콤포지트의 인장 강도 측정결과 스케일파라미터는 에폭시/마이크로 콤포지트 50 wt%에 비하여 GDE 1 g이 첨가된 경우 3.3%, GDE 3 g인 경우 11.4% 그리고 GDE 5 g 의 경우 1.16% 향상된 결과를 얻게 되었다. 그 중 GDE 3 g의 경우 가장 특성 향상이 높은 결과이다. 결과를 분석하면, 마이크로알루미나 콤포지트의 형상파라미터는 27.55으로 절연파괴강도 81.59 MPa로서 양호한 균질성과 높은 결과를 나타내었다. 그리고 3종류인 멀티-콤포지트의 경우는 형상파라미터가 20.35, 24.14 그리고 25.92의 결과를 나타내었다. 측정결과 균질성이 양호한 결과이다. GDE 변화에 따른 멀티-콤포지트 측정결과는 GDE 표면처리제 첨가량이 증가 할수록 증가하였지만, GDE 3 g 이후 과량 첨가시 오히려 감소되는 결과를 얻게 되었다. 결과적으로, 마이크로알루미나 50 wt% 콤포지트를 기준으로 할 때, GDE 3 g의 경우 90.9 MPa로서 가장 높은 인장 강도의 결과를 나타내었다. 마이크로 알루미나 50 wt% 콤포지트에 비하여 11.4% 향상된 결과이다. B10의 경우 형상파라미터가 양호한 결과로 인하여 상대적으로 높은 인장 강도의 결과를 나타내었다.

GDE 3 g에서 가장 높은 인장 강도를 나타낸 이유는 다음과 같다. 40, 50, 60 wt%의 비교에서 마이크로알루미나+나노알루미나의 혼합 콤포지트 경우 최적 조성비의 상태로 생각되며, 전기적인 특성과 다른 양상을 나타내고 있다. 전기적 절연파괴의 경우 GDE 3 g의 첨가제 투여는 오히려 불순물인 전하 캐리어로 작용하여 절연의 성능을 오히려 감소시키는 원인이 되고, 기계적 인장 강도의 특성에서는 GDE 3 g가 나노의 이중층 모델에서 느슨한 층을 잡아당기어 탄성을 강하게 만드는 결과로 사료된다 [5].

그림 5, 표 6에서는 에폭시/마이크로 알루미나 60 wt% 콤포지트, 에폭시/마이크로 알루미나 60 wt%-나노알루미나 1 phr-GDE 1, 3, 5 g이 첨가된 콤포지트의 기계적 인장 강도 특성결과를 나타내었다.

결과를 분석하면, 마이크로알루미나 60 wt% 콤포지트의 형상파라미터는 30.23 그리고 60 wt% 멀티-콤포지트 경우 14.43, 48.73, 18.43으로 균질성면에서 매우 우수한 결과를 나타내었다.

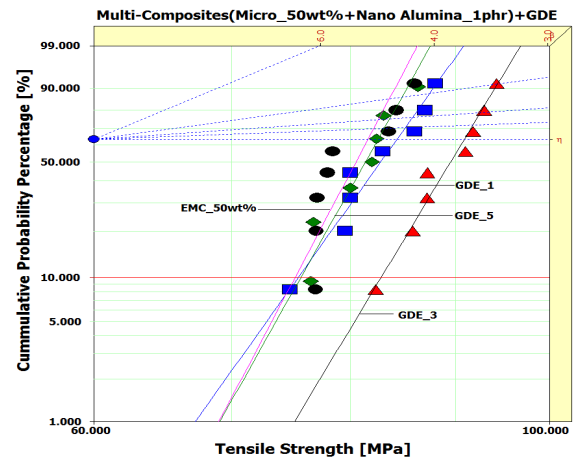


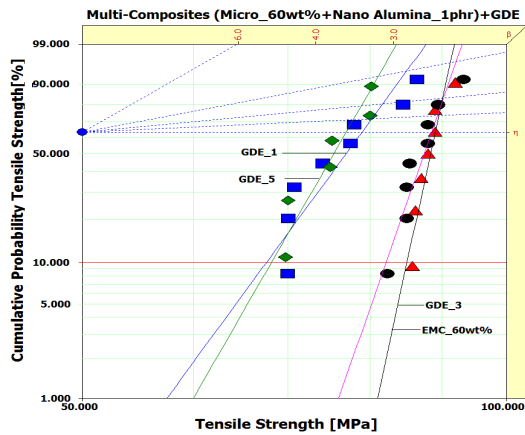
Fig. 4. Weibull plot of mechanical tensile strength for various epoxy/multi-composites (MA 50 wt%, MA 50 wt%/NA 1 phr/GDE 1, 3, 5 g).

Table 5. Parameter properties for weibull plot of Fig. 4.

Samples	Shape parameter	Scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
Micro alumina 50 wt%	27.55	81.59	75.15
Micro alumina 50 wt% /Nano 1 phr/GDE 1	20.35	84.28	75.43
Micro alumina 50 wt% /Nano 1 phr/GDE 3	24.14	90.90	82.81
Micro alumina 50 wt% /Nano 1 phr/GDE 5	25.92	82.53	75.66

그리고 역시 GDE 3 g 경우 크게 향상된 결과이다. 마이크로 알루미나 60 wt% 콤포지트의 경우 스케일파라미터 88.49 MPa의 결과를 얻었고, GDE 1 g인 경우 마이크로알루미나 60 wt%에 비하여 12.09%감소하였고, GDE 3 g의 경우 1% 향상 그리고 GDE 5 g의 경우 14.9% 감소되는 결과를 얻게 되었다.

이상의 결과는 그림 3~5, 표 4~6까지의 에폭시/알루미나 멀티-콤포지트의 인장 강도 특성을 나타낸 것으로, 마이크로알루미나 40, 50, 60 wt%에 나노알루미나입자에 GDE 1 g, 3 g, 5 g 표면개질제로 처리된 나노알루미나를 첨가하여 혼합한 콤포지트를 제조된 인장 강도 결과를 나타낸 것이다. 특성으로 다음과 같다.



**Fig. 5.** Weibull plot of Mechanical tensile strength properties for various epoxy-multi composites (MA 60 wt%, MA 60 wt%/ NA 1 phr/GDE 1, 3, 5 g).

**Table 6.** Parameter properties for weibull plot of Fig. 5.

Samples	Shape parameter	Scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
Micro alumina 60 wt%	30.23	88.49	82.01
Micro alumina 60 wt% /Nano 1 phr/GDE 1	14.43	78.95	67.50
Micro alumina 60 wt% /Nano 1phr/GDE 3	48.73	89.03	84.99
Micro alumina 60 wt% /Nano 1 phr/GDE 5	18.43	76.96	68.13

첫째, 마이크로 알루미나(40, 50, 60 wt%)에 GDE 1 g, GDE 3 g, GDE 5 g를 표면처리한 나노알루미나 (1 phr)를 첨가된 마이크로알루미나 충전 함량이 증가 할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 단 GDE 5 g인 경우 60 wt%에서 감소되는 경향을 나타내었다.

둘째, GDE의 첨가량 증가에 따라 멀티-컴포지트의 인장 강도의 특성이 향상되었다. 단지 GDE 5 g인 경우 오히려 감소하는 결과를 얻었다. 순서로 볼 때 GDE 3 g > GDE 1 g > GDE 5 g 순서로 기계적인 인장 강도의 경우와 절연파괴 강도와는 서로 다른 특성을 나타내고 있다 [5]. 즉, 절연파괴 강도는 GDE 1 g > GDE 3 g > GDE 5 g 순서로 첨가제 증가에 따라 감소하는 결과를 얻었다.

셋째, 에폭시 수지, 에폭시/마이크로 알루미나 콤포지트, 에폭시/알루미나 멀티-컴포지트와의 비교 평가

한 결과 다음과 같다.

마이크로 알루미나 콤포지트 단독보다는 멀티-컴포지트의 인장 강도 특성이 상대적으로 크게 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 멀티-컴포지트 40 wt% 보다는 50 wt% 그리고 60 wt%로서 마이크로 충전함량이 증가할수록 특성이 향상됨을 알 수 있었다. GDE 3 g인 경우 기계적 인장 강도에서 GDE 1 g 보다 높은 결과를 나타내었으며, 반대로 과량이 첨가된 GDE 5 g인 경우는 오히려 특성이 저하되는 결과를 나타낸 것이다. 이유는 인장 강도는 인장 스트레스 하에서 재료의 저항을 평가하기 위해 수행되는 것이며, 충전 함량이 증가하면(40, 50, 60 wt%), 그리고 GDE 첨가량이 증가(1, 3, 5 g)할 때, 여러 종류의 멀티-컴포지트가 마이크로 알루미나 콤포지트 보다 향상되었다.

마이크로 알루미나가 일정한 충전 함량에서 GDE 1 g보다 오히려 GDE 3 g가 높은 인장 강도 특성을 나타낸 이유는 전기적 절연파괴와는 GDE 첨가량의 효과가 다르게 작용하고 있음을 알 수 있다. GDE는 양쪽 말단에 epoxide ring과 친수성기가 달려 있는 분자량이 작은 비실란제이다. 알루미나 입자 표면은 친수성기가 많아 OH기가 달려 있는 GDE와의 친화력이 좋고 GDE 말단에 epoxide ring이 달려 있어 에폭시와도 우수한 친화력을 갖게 된다. 이런 이유로 알루미나와 에폭시 간의 빈 공간에 GDE를 붙여 에폭시수지와 나노알루미나 간의 계면접착력과 분산성이 향상될 수 있는 것이다. 이런 특성을 갖는 GDE이지만 과량이 첨가 되면 표면처리 되고 미결합된 첨가제가 역시 불순물(캐리어)로 작용하게 되어 절연파괴강도가 낮아지는 결과를 가져온 것이다 [5].

Tsagaropoulos's와 Tanaka 모델에 따르면, 나노필러와 수지사이 상호작용이 나노알루미나 콤포지트 주위에 두 개의 고분자 층을 형성한다 [6-8]. 처음의 층은 입자에 단단하게 결합된 움직임이 적은 층 그리고 두 번째 층은 이전보다 더욱더 두꺼운 층 그리고 처음 층에 둘러 쌓여있는 더욱더 많은 체인을 이동할 수 있는 입자와의 더욱더 느슨한 결합력을 갖는 체인으로 만들어진 것이다. 이들 두 개의 층 특히, 두 번째 층이 나노콤포지트 특징을 결정 하는 중대한 기능을 갖고 있다. 그러나 기계적 특성인 인장 강도는 수지와 마이크로 알루미나 및 나노알루미나 입자 계면결합력에 영향을 받기 때문에 입자와 수지사이 1차 계면 층이 매우 얇고 그리고 2차 계면 층이 상대적으로 두껍게 된다. 그러나 전기적 절연특성은 2차 계면 층에 전하의 트랩으로 인하여 전하의 거동 때문에 GDE 첨가량이

소량인 GDE 1에서 우수한 절연특성을 얻을 수 있지만 기계적 특성은 그것과는 다른 양상을 갖기 때문에 2차 층이 두꺼워 결합력을 강화하는 원인이 될 수가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 GIS spacer 절연소재개발을 위해 에폭시수지에 나노알루미나를 GDE (glycerol diglycidyl ether) 비실란계로 표면처리된 나노알루미나와 마이크로알루미나의 혼합에 의한 콤포지트를 제조하였다. 제조된 콤포지트의 기계적 특성을 연구하기 위하여 기계적 인장 강도의 특성을 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트 : 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트의 충전 함량 (40, 50, 60, 70 wt%) 증가에 따라 기계적 인장 강도가 증가(77.29 ~ 90.29 MPa)하였다. 에폭시수지(73.29 MPa)에 비하여 마이크로콤포지트 인장 강도의 증가율은 40 wt%에서는 7.14%, 50 wt%에서는 11.33%, 60 wt%에서는 20.74% 그리고 70 wt%에서는 26.41% 크게 향상된 결과를 얻었다. 충전 함량이 증가할수록 입자간 간격이 매우 좁아지고, 상대적으로 수지 층이 감소되는 결과와 입도분포에서 매우 작은 알루미나 입자의 존재로 조직의 치밀성을 가져오는 결과로 사료된다.

2) 에폭시/나노알루미나-마이크로알루미나-GDE 첨가량 혼합 콤포지트 : 에폭시/표면 처리된 나노알루미나 1 phr-마이크로알루미나(40, 50, 60 wt%)-GDE 1, 3, 5 g 멀티-콤포지트의 기계적 인장 강도는 40 wt%, 50 wt%, 60 wt%의 경우 GDE첨가량 변화의 결과에서 GDE 3 g의 경우 특성이 우수한 결과를 나타내었다. 이와는 반대로 전기적인 특성에서는 GDE 1 g 경우 절연파괴 성능이 가장 우수한 결과를 얻었다. 이는 알루미나와 에폭시 간의 빈 공간에 GDE를 붙여 에폭시수지와 나노알루미나 간의 계면접착력과 분산성이 향상된 결과이며, 전기적인 특성에서는 GDE가 과량이 첨가되면 표면처리 되고 미결합된 첨가제가 불순물(캐리어)로 작용하게 되어 절연파괴강도가 낮아지는 결과를 가져온 것이다.

#### REFERENCES

[1] T. W. Dakin, *IEEE Transaction on Dielectrics and*

*Electrical Insulation*, **EI-9**, 121 (1974). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TEI.1974.299321>]

[2] J. Sato, O. Sakaguchi, N. Kubota, S. Makishima, S. Kinoshita, T. Shioiri, T. Yoshida, M. Miyagawa, M. Homma, and E. Kaneko, *Proc. Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia Pacific* (Yokohama, Japan, 2002) p.1791. [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1177727>]

[3] T. Imai, F. Sawa, T. Nakano, T. Ozaki, T. Shimizu, M. Kozako, and T. Tanaka, *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr.*, **13**, 319 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1624276>]

[4] T. Imai, F. Sawa, T. Yoshimitsu, T. Ozaki, and T. Shimizu, *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, 402 (2004).

[5] J. J. Park, *Trans. KIEE.*, **65** (2016).

[6] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse, and Y. Ohki, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, **12**, 669 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1511092>]

[7] G. Tsagaropoulos and A. Eisenberg, *Macromolecules*, **28**, 6067 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1021/ma00122a011>]

[8] Z. Farhadinejad, M. Ehsani, S. Moemenbellah, S.M.B. Alavi, M.M.S. Shirazi, and H. Borsi, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, **11**, 957 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2012.2209458>]

[9] R. Sarathi, R. K. Sahu, and P. Rajeshkumar, *Mater. Sci. Eng. A*, **445**, 567 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.077>]

[10] H. Shi, N. Gao, H. Jin, and C. Wang, *Mater. Sci. Forum*, **658**, 463 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.658.463>]

[11] A. Omrani, L. C. Simon, and A. A. Rostami, *Mat. Chem. Phys.*, **114**, 145 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.08.090>]

[12] Z. Ahmad, M. P. Ansell, and D. Smedley, *Int. J. Eng. Technol.*, **10**, 32 (2010).

[13] S. A. Meguid and Y. Sun, *Mater. Design*, **25**, 289 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.10.018>]

[14] R. R. Patel and N. Gupta, *Proc. 15th Nat. Power Syst. Conf.* (Mumbai, India, 2008) p. 361.

[15] Q. Wang, G. Chen, and A. S. Alghamdi, *Proc. 10th IEEE Int. Conf. Solid Dielectr.* (Potsdam, Germany, 2010) p. 263.