

표면처리된 나노알루미나가 첨가된 에폭시/멀티-알루미나 콤포지트의 교류절연파괴 특성

The AC Insulation Breakdown Properties of Epoxy/Multi-Alumina Composites for Adding Surface Modified Nano Alumina

박 재 준*
(Jae-Jun Park)

Abstract - The aim of this study is to improve of properties for electrical AC insulation breakdown strength using epoxy/micro-nano alumina composites with adding glycerol diglycidyl ether (GDE:1,3,5g). This paper deals with the effects of GDE addition for epoxy/micro alumina contents (40,50,60wt%)+surface modified nano alumina(1_{phr}) composites. 14 kinds specimen were prepared with containing epoxy resins, epoxy micro composites and epoxy nano-micro alumina mixture composites. Average particle size of nano and micro alumina used were 30nm and 1~2 μ m, respectively. The micro alumina used were alpha phase with Heterogeneous and nano alumina were gamma phase particles of spherical shape. The electrical AC insulation breakdown strength was evaluated by sphere to sphere electrode system and raising velocity 1kV/s. The AC breakdown strength decreased insulation properties of multi-composites according to increasing micro alumina and GDE addition contents.

Key Words : AC insulation breakdown, Epoxy/Micro-nano alumina composites, Surface modified nano alumina, GIS spacer, Heavy electric apparatus, Epoxy/Multi-alumina composites

1. 서 론

HVAC용 가스절연스위치(Gas Insulated Switchgear: GIS라 부른다)는 광범위하게 사용되어져 왔고 그리고 전력시스템에 중요한 역할을 하고 있다. 최근 HVDC용 GIS Spacer에 주된 관심을 가지고 연구하고 있다[1].

에폭시수지는 절연시스템에서 필수불가결한 것이다. 높은 열적 안정도 그리고 향상된 절연특성을 얻기 위해, 에폭시수지에 적절한 마이크로크기의 필러와 나노크기의 필러를 혼합하여 사용하고 있다. 고분자재료 내 무기필러 가령, 실리카, 알루미나 등의 사용은 오랫동안 사용되어져 왔고, 현재도 주요하게 사용되어지고 있다. 그러나 최근에는 HVDC용 MgO 입자를 공간전하의 감소를 가져오는 콤포지트 개발이 진행되고 있다[2~3].

연구의 목적은 최종적으로 중전기기 절연재료의 전기적 특성에 대한 에폭시메트릭스 내에 마이크로-나노입자의 충전함량의 영향을 보여주고 있다. 실제로, 여러 연구자들의 경우, 이미 나노 콤포지트의 전기적 특성에 대한 나노입자의 특성향상을 보여 주었다[4~5]. 최근에 몇몇 연구자들은 고분자내에 마이크로와 나노 입자사이 조합에 대한 영향에 관한 연구에 각광을 받고 있다 [6~7]. 그리고 장시간 열화 즉, 트리잉과 부분방전 저항성실험

동안 그들의 거동에 대한 특성에 대해 연구 되어졌다[8]. 그때, 전하 전송과 주입, 분극 그리고 트랩과 탈 트랩에 관한 마이크로와 나노입자사이 비율에 대한 영향을 연구하는 것이다.

본 연구에서는 에폭시수지 내에서 나노알루미나의 GDE 표면 처리를 실시하였고, 구조적인 특성으로 TEM을 측정하였다[9]. GDE 첨가량 1,3,5g에 따른 멀티-알루미나 콤포지트를 제조하였고 그리고 현재 산업에 적용하고 있는 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트를 제조하여 신절연소재와 비교평가하기 위해 각각 14 종류의 샘플에 관한 교류절연파괴 강도의 연구결과를 얻었다.

2. 실 험

2.1 재 료

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. 접도는 120℃에서 390~520 mP s이며, 밀도는 25℃에서 1.15g/cm³ 에폭시 함량(equip./kg)은 2.55~2.7이다. 경화제(Hardener)는 제품명으로 HT 903로서 실내온도에서는 고체상체의 냄새가 나지 않은 Carboxylic acid anhydride 기반 경화제이다. 용점범위(melting range)은 128~132℃이며, 밀도는 130℃에서 1.22~1.25 g/cm³ 이

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea.

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr

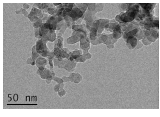
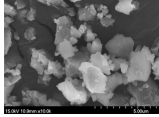
Received : July 31, 2016; Accepted : August 17, 2016

다. 산의 함량은 ≤3(%), 휘발성 함량은 0~0.2%으로 외관상 백색의 파우더 형태를 갖는다.

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

표 1 제조된 샘플의 필러 특성

Table 1 Properties of fillers for the specimens

Property	Nano Alumina	Micro Alumina
mean particle size	30nm	1~2μm
crystal form	gamma phase	alpha phase
particle shape		
purity(%)	99	?
BET (specific surface area) : m ² /g	100±20	?

2.2 교류절연과피용 에폭시- 마이크로알루미나- 나노 알루미나 콤포지트의 제조 과정

GIS Spacer 절연소재 개발을 위해 그림 1에서 나타난 과정을 통하여 에폭시/마이크로 알루미나/나노알루미나 콤포지트의 제조 방법을 나타내었다.

제조된 샘플은 표 3에 나타난 바처럼 에폭시 원형, 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트(40, 50, 60, 70wt%) 4종류, 에폭시/멀티-알루미나 콤포지트 즉, 에폭시/마이크로알루미나_40wt%/나노알루미나_1phr/GDE(1,3,5g)콤포지트 3종류, 에폭시/마이크로알루미나_50wt%/나노알루미나_1phr/GDE(1, 3, 5g)콤포지트 3종류 그리고 에폭시/마이크로알루미나_60wt%/나노알루미나_1phr/GDE(1,3,5g) 콤포지트 3종류를 제조하였다. 본 연구에 사용한 샘플종류는 14 종류로서 각각 12개의 샘플을 이용하여 측정된 결과를 나타내었다.

표 2 용어정의

Table 2 Definitions of Terms

약어(abbreviation)	원어 (the original terms)
GDE	Glycerol diglycidyl ether
ER	epoxy resins
NA	nano alumina
MA	micro alumina
MC	micro composites
EMC	epoxy micro composites
MS	micro silica
EMA	epoxy-micro alumina
EMAC	epoxy-micro alumina composites
EMANAC	epoxy-micro alumina-nano alumina composites

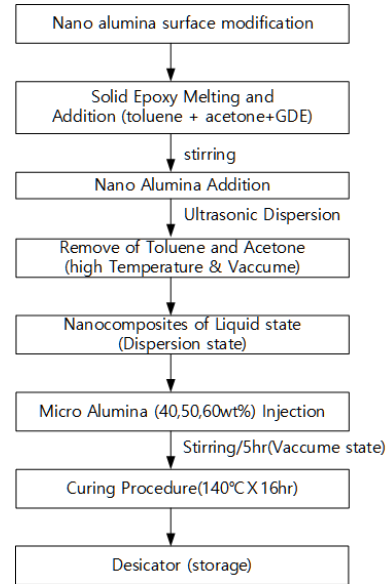


그림 1 에폭시/마이크로알루미나/나노알루미나 콤포지트의 제조 방법

Fig. 1 Preparation procedure for Epoxy/Micro Alumina/Nano Alumina Composites

표 3 시편의 종류

Table 3 Type of sample

Specimen	ER	Hardener	GDE	NA	MA
			gram	phr	wt%
ER	100	40	0	0	0
MA40wt%	100	40	0	0	40
MA50wt%	100	40	0	0	50
MA60wt%	100	40	0	0	60
MA70wt%	100	40	0	0	70
MA40wt%/NA_1phr/GDE(1,3,5)g	100	40	1,3,5	1	40
MA50wt%/NA_1phr/GDE(1,3,5)g	100	40	1,3,5	1	50
MA60wt%/NA_1phr/GDE(1,3,5)g	100	40	1,3,5	1	60

2.3 교류 절연과피 측정

본 연구에서는 단시간 교류절연과피 강도를 측정하기 위해 사용한 고전압 발생장치는 100 kV/100 mA, 60 Hz를 이용하여 절연과피전압을 측정하였다. 인가전압 승압속도는 1 kV/s로 파괴 시까지 일정하게 승압하였다. 사용전극은 구 대 구를 사용하였으며, 전극은 스테인레스 재질이며, 구 전극의 지름은 11 mm로 하였다. 측정샘플은 두께가 2 mm이며, 원판형태로 지름이 100 mm φ로서 동일한 특성을 갖는 샘플로서, 샘플의 개수는 12개씩 사용하였다. 측정환경 온도는 25 °C로서 제어장치를 통하여 일정한 온

도를 유지하였다. 모든 측정 자료는 weibull plot을 이용하여 나타내었다.

3. 결과 및 검토 고찰

2.1 에폭시/마이크로 알루미나 콤포지트의 교류절연파괴 특성

그림 3과 표 4에서는 GIS 및 중전기기의 새로운 절연소재 개발을 위해, 현재 산업에서 사용하고 있는 EMAC의 전기적 절연 특성을 이해하고 평가기준으로하기 위해 실험하였다. 표 1에서는 입자의 특성을 나타내었다. MA입자의 평균입도 1~2 μm, 알파상 결정구조를 갖는 MA를 이용하여 ER내에서 충전함량 증가(40→50→60→70wt%)에 따른 교류 절연파괴 전압의 측정결과를 와이블플롯으로 나타내었다.

그 결과 와이블 플롯의 경우, 형상파라미터의 값이 대단히 큰 값(48~128)으로서, 실험결과 값이 매우 균질함을 알 수 있었다. 이는 신뢰도가 매우 높은 절연파괴 결과임을 의미한 것이다. 또한 B10의 경우 스케일 파라미터와 근사한 결과를 나타내고 있다.

예로서, 형상파라미터가 128인 경우, ER/MA_50wt%에서 스케일파라미터와 B10의 결과 값이 0.84kV/2mm의 차이정도를 나타내고 있다. 이는 형상 파라미터가 크면 스케일파라미터와 B10수명 값이 근사한 값을 나타낸 것이다.

결과적으로 에폭시 수지 내 MA 충전함량 증가에 따라 절연파괴강도의 63.2% 결과(스케일파라미터)가 감소하는 경향을 얻었다. 그리고 ER과 EMAC간의 절연파괴강도를 비교하여 볼 때, EMAC_40~60wt%까지는 ER에 비하여 높은 절연파괴 결과를 나타내었지만, EMAC_70wt% 경우 ER에 비하여 4.1% 낮은 파괴강도의 결과를 나타내었다.

EMAC 충전함량 증가에 따라 교류 절연파괴결과 감소하는 이유에 대해서 다음과 같다.

샘플제조시, ER에 MA를 충전하여 5시간 동안 진공조건하에서 교반을 통하여 ER에 분산된 콤포지트의 교류절연파괴 강도를 측정하였다. EMA_40wt% 콤포지트의 경우 가장 높은 50.12kV/2mm 파괴강도를 나타내었고, 그 후 충전함량이 증가할수록 50wt%에서는 3.15% , 60wt%에서는 6.1% 그리고 70wt%에서는 12.3% 감소하는 경향을 나타내었다.

이는 MA입자가 ER에 혼합될 때, 입자표면에 하전입자와 같은 불순물이 투입되어져 결합으로 작용하는 경우와 같다. 즉, 입자의 함량이 많아지면, 그 만큼 불순물이 투입되어진 양이 많아진 결과이다. 상대적으로 충전함량이 적은 경우 분산이 용이하게 된다. 그러나 MA 형상이 구형형상을 갖고 있지 못하고 요철부분이 존재하기 때문에, 요철부분에 무기물입자와 에폭시수지사이 계면에 나노 및 마이크로 보이드와 같은 결합이 과량 충전시 함유되는 정도가 다를 것으로 사료된다.

또한 MA 과량 충전시 EMAC의 가교밀도를 형성하는 에폭시 기능기의 이동도가 떨어져서 경화반응을 오히려 방해하는 요소로 작용하여, 결국 충전함량이 증가할수록 절연파괴강도가 감소하는 것으로 사료된다.

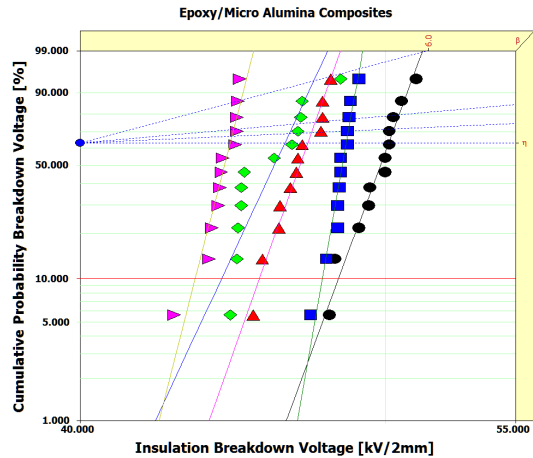


그림 3 ER/MA 콤포지트의 충전함량 변화에 따른 교류 절연파괴 강도 특성

Fig. 3 Properties of AC Breakdown Strength for ER/MA Composites according to Contents Variation

표 4 그림 3에 대한 와이블플롯의 특성표

Table 4 Properties Table of Weibull Plot for Fig 3

Micro Alumina Composites	shape parameter	scale parameter (kV/2mm)	B10 Life
ER/MA_0wt%	48.62	46.46	44.35
ER/MA_40wt%	61.34	50.12	48.34
ER/MA_50wt%	128.18	48.59	47.75
ER/MA_60wt%	63.65	47.24	45.59
ER/MA_70wt%	88.42	44.63	43.51

2.2 에폭시/마이크로 알루미나/나노알루미나/GDE 첨가된 멀티-콤포지트의 교류절연파괴 특성

2.2.1 에폭시/마이크로알루미나_40wt%/나노알루미나_1phr/GDE (1,3,5g) 콤포지트의 절연파괴

그림 4와 표 5에서는 EMAC_40wt%와 EMA_40wt%/NA_1phr/GDE 콤포지트에 GDE의 첨가량 변화 1, 3, 5g에 대한, 멀티-콤포지트의 전기적 교류절연파괴강도 측정결과와 와이블플롯으로 나타내었다. 그 결과 EMA_40wt%와 EMANA_GDE_1g의 경우 50.1 kV, 60.6 kV로서 10.5 kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 20.9% 절연파괴 강도의 성능향상을 얻었다. 그리고 EMA_40wt%와 EMANA_GDE_3g의 경우 50.1 kV, 56.18 kV로서 6.08 kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 약 12% 절연파괴 강도의 성능향상을 나타내었다. 또한 EMA_40wt%와 EMANA_GDE_5g의 경우 50.1 kV, 52.99kV로서 2.87kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 5.73% 절연파괴 강도의 향상을 얻었다. 결과적으로 GDE 첨가량 증가에 따라 절연 파괴강도가 감소하는 결과를 얻었으며, EMAC_40 wt%에 비하여 멀티-콤포지트의 성능향상 결과 GDE_1g인 경우 20.9%, GDE_3g

인 경우 12% 그리고 GDE_5g인 경우 5.73%의 향상되는 결과를 얻었다.

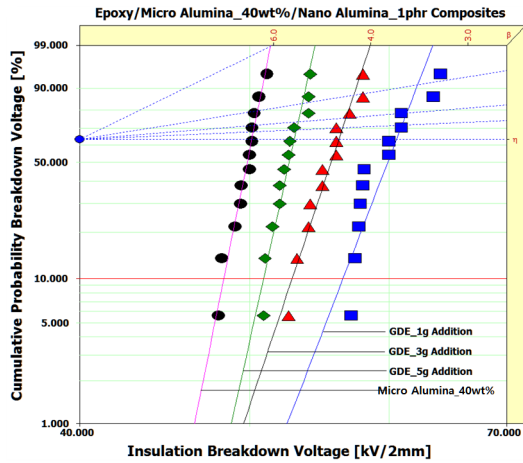


그림 4 EMAC_40wt%와 EMA_40wt%/NA_1phr/GDE 콤포지트의 GDE(1,3,5g) 첨가량변화에 따른 교류절연과피 특성

Fig. 4 Properties of AC Breakdown Strength for EMAC_40wt% and EMAC_40wt%/NA_1phr/GDE Composites according to GDE(1,3,5g) addition variation

표 5 그림 4에 대한 와이블플롯의 특성표

Table 5 Properties Table of Weibull Plot for Fig. 4

ER/Multi_40wt% Composites	shape parameter	scale parameter (kV/2mm)	B10 Life (kV/2mm)
ER/MA_40wt%	61.43	50.12	48.30
ER/MA_40wt%/NA_1phr/GDE 1g	32.07	60.60	56.53
ER/MA_40wt%/NA_1phr/GDE 3g	36.85	56.18	52.84
ER/MA_40wt%/NA_1phr/GDE 5g	55.81	52.99	50.89

그림 4, 표 5 결과에서 NA입자 또는 MA입자를 ER에 주입하는 것은 2-1에 설명한 바처럼 결합으로 작용 하게 된다. 이는 교류절연과피강도 저하의 원인이 된다. 또한 분산능력이 떨어지면 치명적인 결합으로 작용되어 더욱더 절연성능이 저하된다[10].

또한 나노입자의 결합층에 의한 원인을 생각할 수 있다. 첫 번째 층은 무기물인 NA표면과 에폭시수지 사이 층이 단단하게 결합된 층으로 움직이지 못한 층과 다음 확장된 층은 더욱 두텁게 결합된 층으로 자유체적에 해당되는 층 또는 느슨하게 결합된 층으로 전하의 이동과 트랩 그리고 탈트랩이 발생하는 계면 결합층으로, 나노입자가 소량 첨가될 때면 더욱더 강한 결합을 나타낸다[11]. 그러나 GDE 첨가량이 NA의 표면처리에 사용될 때, 잔류된 OH기가 하전입자로 작용하고, 더욱더 많은 양이 존재하게 되면 경화반응을 방해하는 역할을 하게 되어 절연과피강도가 낮아지는 것으로 사료된다[12].

2.2.2 에폭시/마이크로알루미나_50wt%/나노알루미나_1phr/GDE (1,3,5g) 콤포지트의 절연과피

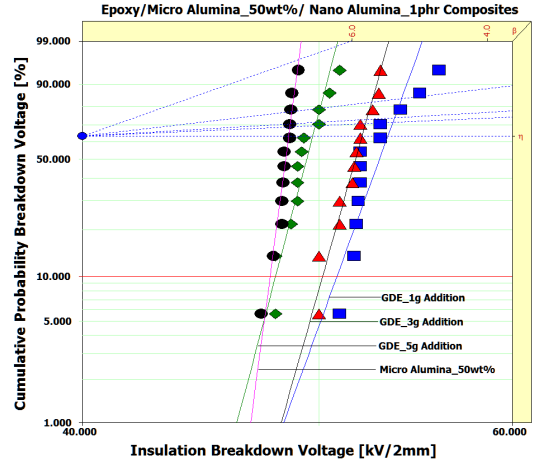


그림 5 EMAC_50wt%와 EMA_50wt%/NA_1phr/GDE 콤포지트의 GDE(1,3,5g) 첨가량변화에 따른 교류절연과피 특성

Fig. 5 Properties of AC Breakdown Strength for EMAC_50wt% and EMAC_50wt%/NA_1phr/GDE Composites according to GDE(1,3,5g) addition variation

표 6 그림 5에 대한 와이블플롯의 특성표

Table 6 Properties Table of Weibull Plot for Fig. 5

ER/Multi_50wt% Composites	shape parameter	scale parameter (kV/2mm)	B10 Life (kV/2mm)
ER/Micro_50wt%	128.18	48.59	47.75
ER/MA_50wt%/NA_1phr/GDE 1g	46.79	53.36	50.85
ER/MA_50wt%/NA_1phr/GDE 3g	60.34	52.08	50.17
ER/MA_50wt%/NA_1phr/GDE 5g	64.34	49.70	47.99

그림 5과 표 6에서는 EMAC_50wt%와 EMA_50wt%/NA_1phr/GDE 콤포지트에 GDE의 첨가량 변화 1,3,5g에 대한, 멀티-콤포지트의 전기적 교류절연과피강도 측정결과를 와이블플롯으로 나타내었다.

그 결과 EMA_50wt%와 EMANA_GDE_1g의 경우 48.59kV, 53.36kV로서 4.77kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 9.82% 절연과피강도의 성능향상을 얻었다. EMA_50wt%와 EMANA_GDE_3g의 경우 48.59kV, 52.08kV로서 3.49kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 약 7.12% 절연과피 강도의 성능향상을 나타내었다. 그리고 EMA_50wt%와 EMANA_GDE_5g의 경우 48.59kV, 49.70kV로서 1.11kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 2.22% 절연과피 강도의 성능향상을 나타내었다.

결과적으로 GDE 첨가량 변화에 따라 절연과피강도는 감소하는 결과를 얻었으며, EMAC_50wt%에 비하여 멀티-콤포지트의

성능향상 결과는 GDE_1g인 경우 9.82%, GDE_3g인 경우 7.12% 그리고 GDE_5g인 경우 2.22%가 향상되는 결과를 얻었다. NA_1phr/GDE 콤포지트와 비교한 결과 절연파괴 성능향상정도가 낮아지는 이유는 MA충진함량의 영향으로 사료되며, EMA_50wt%에서 GDE 첨가량 증가에 따라 절연파괴 강도가 감소하는 이유도 앞서 설명한 GDE 첨가량이 증가함에 따라 잔류된 OH기의 영향으로 사료된다[12].

2.2.3 에폭시/마이크로알루미나_60wt%/나노알루미나_1phr/GDE (1,3,5g) 콤포지트의 절연파괴특성

그림 6과 표 7에서는 EMAC_60wt%와 EMA_60wt%/NA_1phr/GDE 콤포지트에 GDE의 첨가제 함량변화 1,3,5g에 대한, 멀티-콤포지트의 전기적 교류절연파괴강도 측정결과를 와이블플롯으로 나타내었다.

그 결과 EMA_60wt%와 EMANA_GDE_1g의 경우 47.24 kV, 53.65 kV로서 6.41 kV 절연파괴강도가 향상된 결과를 얻었다. 즉, 13.57% 절연파괴 강도의 향상을 얻었다. EMA_60wt%와 EMANA_GDE_3g의 경우 47.24kV, 49.9kV로서 2.66kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 약 5.63% 절연파괴 강도의 성능향상을 나타내었다. 그리고 EMA_60wt%와 EMANA_GDE_5g의 경우 47.24kV, 49.23kV로서 1.99kV 향상된 결과를 얻었다. 즉, 4.22% 절연파괴 강도의 성능향상을 얻었다. 결과적으로 GDE 첨가량 변화에 따라 절연파괴강도는 감소하는 결과를 얻었으며, EMAC_60wt%에 비하여 멀티-콤포지트가 성능이 향상된 결과는 GDE_1g인 경우 13.57%, GDE_3g인 경우 5.63% 그리고 GDE_5g인 경우 4.22%의 결과를 얻었다.

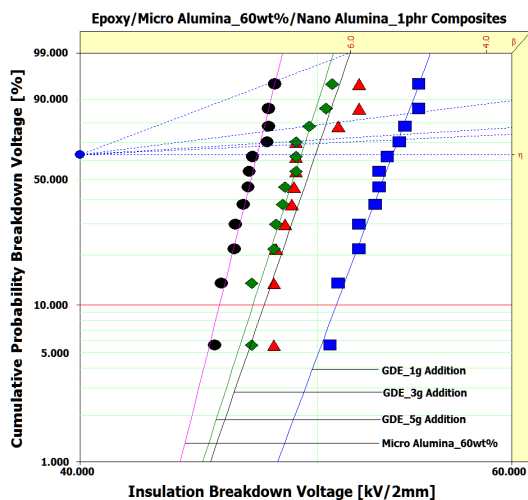


그림 6 EMAC_60wt%와 EMA_60wt%/NA_1phr/GDE 콤포지트의 GDE(1,3,5g) 첨가량변화에 따른 교류절연파괴 특성
 Fig. 6 Properties of AC Breakdown Strength for EMAC_60wt% and EMAC_60wt%/NA_1phr/GDE composites according to GDE(1,3,5g) addition variation

표 7 그림 6에 대한 와이블플롯의 특성표

Table 7 Properties Table of Weibull Plot for Fig. 6

ER/Multi_60wt% Composites	shape parameter	scale parameter (kV/2mm)	B10 Life (kV/2mm)
ER/Micro_60wt%	63.65	47.24	45.61
ER/MA_60wt%/NA_1phr/GDE1g	42.61	53.65	50.90
ER/MA_60wt%/NA_1phr/GDE 3g	46.65	49.90	47.55
ER/MA_60wt%/NA_1phr/GDE 5g	49.82	49.23	47.04

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 그림 4 그리고 표 5에서는 GDE 첨가량 증가에 따라 멀티-콤포지트의 교류절연파괴 성능이 감소하는 결과(20.9, 12, 5.73%)를 얻었다. 또한 그림 5 그리고 표 6에서는, GDE 첨가량 증가에 따라 멀티-콤포지트의 교류절연파괴 성능이 감소하는 결과 (9.8, 7.12, 2.22%)를 얻었다. 그리고 그림 6 그리고 표 7에서는, GDE 첨가량 증가에 따라 멀티-콤포지트의 절연파괴강도의 성능이 감소하는 결과 (13.57, 5.63, 4.22%)를 얻었다. 결과적으로 두 가지 경우에 대한 이유는 다음과 같다.

첫째, 에폭시/멀티-콤포지트의 MA충진 함량 변화(40, 50, 60wt%)에 따라 절연파괴강도 즉, 와이블플롯의 스케일파라미터 (63.2%)의 결과 감소하는 결과를 얻었다.

모든 멀티-콤포지트의 절연파괴강도는 ER(46.46kV/2mm)에 비하여 향상된 결과를 가져왔다. 앞서 EMAC에서 언급한 바대로, MA필러의 첨가는 ER에 불순물을 주입하는 경우와 같다. 그러나 NA의 소량 첨가(1phr)와 GDE가 첨가된 콤포지트의 절연파괴강도는 향상된 결과이다.

이유에 대해서, 거시적으로 볼 때, MA에 NA의 첨가로 인하여 MA가 낮은 파괴강도를 갖게 되지만, MA+NA 콤포지트가 낮은 절연파괴강도를 NA가 첨가됨으로 인하여 향상되는 시너지 효과로서 이는 조직의 치밀성을 갖게 되어 나타난 원인이다. NA의 성능은 부분방전 저항성과 전기적 트리밍에서 우수한 저항성에 관계되어지고 있다[12]. 더불어 NA 입자의 첨가는 절연파괴 강도 결과 산란을 줄일 수 있는 형상파라미터로부터 알 수 있었다. 주요한 결과는 NA의 첨가는 EMAC 약점을 보완하는 것이다[13]. 또한 나노 TiO₂와 MS의 혼합 콤포지트의 절연파괴특성에서도, 고전적인 마이크로콤포지트에 비하여 크게 향상된 결과이다.

Zhe Li[14]등 연구자들은 EMAC는 ER에 비교하여 낮은 파괴강도를 갖는 것은 분명하다. 그러나 나노필러가 MA에 첨가된 후 약간의 상승을 가져왔다. MA 필러는 EMAC의 열전도를 증가하게 하는 장점을 갖고 있고 반면 절연파괴 강도를 감소하게 하는 단점을 갖고 있다.

우리들의 연구경험에서도 MC안으로 나노입자가 첨가됨으로 인하여 성능향상을 확인 하였다. Zhe Li[14]의 경우에서, 나노필러에 의해서 부분방전 저항성 및 절연파괴 경로를 막은 것으로 경험하였다. 그러나 MA의 경우 파괴강도를 낮게 하는 결합의 결과로 생각된다.

I. A. Tsekmes[18] 연구자들은 나노크기 입자는 ER에 첨가되면, ER에 비하여 성능향상을 가져왔고, EMC가 나노필러로 보강하게 되면, 파괴강도가 향상되어진다[15]. 그러나 나노입자의 크기가 더욱더 작아질수록 마이크로 입자사이 상호작용이 더욱더 크게 되어 성능이 향상된다. NA와 NS의 경우, 교류절연파괴강도에서는 두가지 모두 유사한 결과를 나타내었지만, 그러나 DC 절연파괴에서는 차이가 있다. 즉, NS 콤포지트의 경우 물의 흡수가 큰 영향을 주었기에 낮은 파괴 강도를 나타내었고 그리고 NA의 경우는 상대적으로 물 흡수에 덜 민감하였다. 물의 흡수는 특히, DC 스트레스하에서 콤포지트의 성능에 상당한 영향을 미치고 있음을 보고하였다[16].

본 연구에서와 같이 표면처리된 나노입자의 첨가는 더욱더 단단한 콤포지트 구조로 되기 때문에, 더욱더 높은 절연파괴 결과를 얻었다.

둘째, Suvu Virtanen 여러 연구자들은, NA의 분산특성 향상은 나노입자사이의 거리를 감소시켜주고 그리고 그런 원인으로 인하여 절연파괴강도가 증가하는 결과이다[17].

ER에 NA_1phr를 첨가하고 GDE1,2,3,5g을 첨가하여, 표면처리된 액상 나노혼합체에 MA 필러를 40, 50, 60wt%를 혼합한 멀티-콤포지트의 경우, 유리전이온도 측정에서 GDE 첨가량의 영향은 기본적으로 GDE의 OH기와 NA 표면의 OH가 존재 하게 된다. GDE "H"와 NA의 "O"가 결합하는 방식으로 미약한 수소결합이 일어나게 된다. 과량의 GDE의 첨가는 NA 또는 MA의 OH와 결합 후에도 ER에 OH가 일부 잔류되게 되면, 가소제와 같은 역할로서 부드러워지고 그리고 ER와 경화체간의 가교를 방해하는 역할을 할 수도 있다. 그 결과 ER의 미반응기가 존재하게 되면 유리전이온도가 낮게 된다.

또한 온도증가에 따라 유동성이 크게 되어 유리전이온도를 낮게 하는 역할을 하게 된다. GDE 첨가량이 증가되어, 일부 잔류하게 되면 전기적인 절연파괴 강도가 하전입자의 원인으로 작용하여, 오히려 절연파괴 강도를 낮게 하는 역할을 하게 됨으로 절연파괴 강도를 낮게 하게 된다. 그런 이유로 그림 4~7처럼 GD첨가량이 증가할수록 절연파괴 강도가 낮아지는 역할을 하는 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 HVAC와 HVDC의 전력용 변전기기인 GIS Spacer의 신절연소재를 개발하기 위해 ER, EMAC_40, 50, 60, 70wt%, 4종류 그리고 멀티-콤포지트 9종류, 전체 14종류의 샘플을 제조하였다. 샘플 각각에 대해 12개씩 교류절연파괴 강도(60Hz)를 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, EMAC의 충전함량에 따른 교류절연파괴 특성

MA 충전함량 40, 50, 60, 70wt%의 증가에 따른 교류절연 파괴 특성으로, 충전함량이 증가할수록 교류절연파괴 강도가 감소함을 확인하였다. 또한 40~60wt% 범위의 EMAC에서는 ER보다 높은 결과를 얻었지만, 70wt%에서는 ER보다 낮은 결과를 얻게

되었다. 이는 충전함량이 지나치게 많은 경우 경화반응을 방해하는 역할을 하기 때문으로 사료된다.

둘째, 멀티-콤포지트의 MA충전함량에대한 교류절연파괴 특성
EMAC에 NA의 첨가로 인하여, MC자체보다는 향상된 결과이다. 이는 EMAC자체의 단점은 절연파괴 강도를 낮게 하는 것이며, 장점은 열전도 및 열팽창계수를 향상시키는 특성 갖고 있다. 그러나 GDE의 표면처리된 NA 첨가는 조직의 치밀성을 강화시켜 시너지효과의 결과 절연파괴강도가 향상된 결과로 사료된다.

셋째, NA 표면처리제 GDE 첨가량 변화에따른 멀티-콤포지트의 교류절연파괴 특성

GDE첨가량 증가는 EMA_40,50,60wt%+NA_1phr+GDE 멀티-콤포지트의 교류절연파괴강도는 감소하였다. 주요한 원인에 대해서는 GDE의 첨가량이 증가할수록 잔류된 OH기가 NA입자계면에 하전입자로 작용하여 오히려 절연을 약하게 하는 원인으로 작용하여 파괴강도가 낮아지는 결과로 사료된다.

References

- [1] T. S. Ramu; H. N. Nagamani, "Alumina and silica based epoxy nano-composites for electrical insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 21, Issue: 1, Pages: 236~243, 2014
- [2] Thomas Andritsch; Roman Kochetov; Peter H. F. Morshuis; Johan J. Smit, "Short term DC breakdown and complex permittivity of Al₂O₃- and MgO-epoxy nano-composites", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2010 Annual Report Conference on, Pages: 1~4, 2010
- [3] G. C Stevens; N. A. Freebody; A. Hyde; F. Perrot; I. Szkoda-Giannaki; A. S. Vaughan; S. Virtanen; P. Baker; S. A. F. Bon; S. R. Coles; J. A. Medlam, "Balanced nanocomposite thermosetting materials for HVDC and AC applications", 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Pages: 193~196, 2015
- [4] M. F. Frechette; R. Y. Larocque; M. Trudeau; R. Veillette; R. Rioux; S. Pelissou; S. Besner; M. Javan; K. Cole; M.-T. Ton That; D. Desgagnes; J. Castellon; S. Agnel; A. Tourelle; G. Platbrood, "Nanostructured polymer microcomposites : A distinct class of insulating materials", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 15, Issue: 1, Pages: 90~105, 2008
- [5] T. Imai; F. Sawa; T. Nakano; T. Ozaki; T. Shimizu; M. Kozako; T. Tanaka, "Effects of nano- and micro-filler mixture on electrical insulation properties of epoxy based composites", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 13, Issue: 2, Pages: 319~

- 326, 2006
- [6]. Fabiani; G. C. Montanari; A. Krivda; L. E. Schmidt; R. Hollertz, "Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics", 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Pages: 1~4, 2010
- [7] J. Castellon; S. Agnel; A. Toureille; M. F. Fréchette; S. Savoie; A. Krivda; L. E. Schmidt, "Space charge behaviour on epoxy based dielectrics filled with micro and nano silica", 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Pages: 1~4, 2010
- [8] Zhe Li; Kenji Okamoto; Yoshimichi Ohki; Toshikatsu Tanaka, "Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of Micro-Al₂O₃Epoxy composite", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 17, Issue: 3, Pages: 653~661, 2010
- [9] Jae-Jun Park, "A Study on the Thermal Properties of Epoxy/Micro-Nano Alumina Composites, as Mixture of Surface Modified Nano Alumina", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, A review currently being considered
- [10] Xingyi Huang; Yun Zheng; Pingkai Jiang; Yi Yin, "Influence of nanoparticle surface treatment on the electrical properties of cycloaliphatic epoxy nanocomposites", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 17, Issue: 2, Pages: 635~643, 2010
- [11] G. Tsagaropoulos and A. Eisenberg, "Dynamic mechanical study of the factors affecting the two glass transition behavior of filled polymers: Similarities and differences with random ionomers", Macromolecules, Vol. 28, No. 18, pp. 6067-6077, 1995.
- [12] Jae-Jun Park, "The Influence of Surface Modified Nano Alumina for Electrical Treeing in Epoxy Insulation", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 2, pp. 2016
- [13] Yuta Okazaki; Masahiro Kozako; Masayuki Hikita; Toshikatsu Tanaka, "Effects of addition of nano-scale alumina and silica fillers on thermal conductivity and dielectric strength of epoxy / alumina microcomposites", 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Pages: 1~4, 2010
- [14] Zhe Li; Kenji Okamoto; Yoshimichi Ohki; Toshikatsu Tanaka, "Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of Micro-Al₂O₃ Epoxy composite", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 17, Issue: 3, Pages: 653~661, 2010
- [15] A. Krivda; T. Tanaka; M. Frechette; J. Castellon; D. Fabiani; G. C. Montanari; R. Gorur; P. Morshuis; S. Gubanski; J. Kindersberger; A. Vaughn; S. Pelissou; Y. Tanaka; L. E. Schmidt; G. Iyer; T. Andritsch; J. Seiler; M. Anglhuber, "Characterization of epoxy microcomposite and nanocomposite materials for power engineering applications", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 28, Issue: 2, Pages: 38~51, 2012
- [16] T. Pham Hong; O. Lesaint; P. Gonon, "Water absorption in a glass-mica-epoxy composite-[I: Influence on Electrical Properties]", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 16, Issue: 1, Pages: 1~10, 2009 Year: 2009,
- [17] Suvi Virtanen; Timothy M. Krentz; J. Keith Nelson; Linda S. Schadler; Michael Bell; Brian Benicewicz; Henrik Hillborg; Su Zhao, "Dielectric breakdown strength of epoxy bimodal-polymer-brush-grafted core functionalized silica nanocomposites", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 21, Issue: 2, Pages: 563~570, 2014
- [18] I. A. Tsekmes; P. H. F. Morshuis; J. J. Smit; R. Kochetov, "Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 31, Issue: 3, Pages: 32~42, 2015

저 자 소 개

박 재 준 (Jae-Jun Park)

전기학회 논문지 62권 12호 참조