

친환경 GIS Spacer용, 이종 무기물 절연소재의 혼합비 최적화를 위한 부분방전 저항성 특성 연구

A Study on the Partial Discharge Resistance Characteristic for Optimizing the Mixing Ratio of Heterogeneous Inorganic Insulated Materials for Environmentally Friendly GIS Spacer

박 재 준*
(Jae-Jun Park)

Abstract - 7 type composites (40, 45, 50, 55, 60, 65, and 70 wt.%) were prepared for the environmentally friendly GIS Spacer. Five kinds of samples were prepared for optimization of the filler content ratio (MS: MA = 1: 9, 3: 7, 5: 5, 7: 3, 9: 1) of epoxy / microsilica and microalumina. As a result of evaluation of the partial discharge resistance characteristic, surface erosion is generally slowed down as the fill amount of micro silica is increased. Also, partial discharge resistance characteristics for the development of insulating materials with optimal mixing ratios of heterologous showed a higher partial resistance of discharge and a decrease in erosion, as the filler content ratio of micro silica was larger. In the future, various researches such as electrical, mechanical, and thermal studies will be needed to develop insulating materials that can commercialize power devices in environmentally friendly insulating gas.

Key Words : GIS spacer, Partial discharge Resistance, Epoxy/heterogeneous micro composites, Erosion depth

1. 서 론

고분자 물질에 실리카, 알루미늄, TiO_2 그리고 MgO 와 같은 충전제를 사용하면 내화성, 인장강도 그리고 표면방전과 같은 내성을 갖게 되며, 특정 전기 및 다른 특성을 개선하거나, 또는 비용을 제어하기 위한 수단으로 사용되어지고 있습니다. 그러나, 종래의 마이크로 크기 충전제는 일반적으로 고분자 물질의 내전압에 부정적인 영향을 미친다. 그러나 현실적으로 제조공정과정, 원가 절감 그로인한 가격 경쟁력 때문에 15~100 μm 마이크로 필러를 사용하고 있다. 그런 이유로 전기적 성능에 마이크로 필러의 영향에 대한 연구도 광범위하게 수행되었다[1][2]. 최근에도 고분자수지에 나노필러를 사용하여 성능향상에 대한 관심이 매우 높다 [3],[4]. 나노복합체의 경우 전기적 특성으로 낮은 유전손실, 증가된 절연내력, 트래킹 및 표면침식의 강화 그리고 표면의 소수성 [5][6][7][8]과 같은 고전적 마이크로 충전필러와 비교할 때 우수한 성능을 나타내었다. 이러한 연구의 목적은 분명히 전력기기의 소형화 장기신뢰성을 갖는 전력기기를 개발하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 향후 GIS용 전력기로서 SF_6 절연가스의 사용이 전면 제한되고, 친환경 절연가스로 대체 하여야 하는 실정에 있다. 현재까지 SF_6 절연가스 하에서 알루미늄의 충전제를 사용하는 이유가 절연가스와 화학적 반응없이 안정된 물질이기

때문에 사용되어져 왔다. SF_6 하에서 실리카를 사용하지 못한 이유도 SF_6 의 실리카 부식 메커니즘을 볼 때, SF_6 화합물이 연속적으로 전자 충돌에 의해 분해되어 4개의 불소(F) 라디칼이 생성되어, 실리카(SiO_2)를 공격하여 실리카 표면이 부식된다. 그리고 SF_6 가스의 분해산물인 불소(F) 라디칼과 하우징 재료로 사용되는 고분자 화합물인 에폭시의 분해에 의해 기인하는 수소(H) 라디칼이 반응하여 부식성이 매우 큰 불산(HF) 화합물이 생성되게 되어, 이로 인해서 실리카 표면의 부식성은 더 가속되게 된다. 이와 같은 원인 때문에 친환경 절연가스(CO_2 , N_2 , 압축공기 등)을 사용할 때, 현재의 알루미늄의 가격이 고가이고 그리고 알루미늄은 입자표면에 O-H기가 존재하지 않기 때문에 에폭시와 계면의 결합력이 매우 약하여 절연내력, 기계적 강도 및 열적특성이 실리카에 비하여 상대적으로 낮은 물성을 갖고 있다. 그런 이유로 친환경 절연가스에 적합한 절연소재를 개발하기 위하여, 종래로부터 현재까지 사용하여온 에폭시/마이크로알루미늄 나노복합체에서, 마이크로알루미늄과 마이크로실리카를 혼합한 새로운 친환경 GIS 용 절연소재를 개발하고자하는 목적으로 전기적 특성중 하나인 부분방전 저항성을 연구하였다.

본 연구에서는 전체 13종류의 샘플을 제조하였고 그에 대한 부분방전 저항성 평가를 위하여, 5kV/720Hz의 전원을 96시간동안 지속적으로 인가하여 표면방전으로 인한 침식결과를 평가하였다. 부분방전 저항성을 통한 표면침식으로 콤포지트 내의 수지와 무기물 계면과 결합력을 평가할 수 있고 그리고 SF_6 Spacer 중 전기기의 친환경 절연물로 사용할 수 있는 최적의 혼합비를 연구하고자 한다.

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

E-mail: jjpark@joongbu.ac.kr

Received : May 24, 2018; Accepted : August 6, 2018

2. 실험

2.1 재료

사용되는 에폭시 수지는 Araldite B 41로서, 계기용변압기 (instrument transformers), 스위칭기어 (switchgear) 성분과 같은 높은 기계적 열적 그리고 화학적 스트레스에 지배된 장치의 구조적부분과 같은 고전압 중전기의 옥내용 절연물로 이용하는 수지이다.

점도는 120°C에서 390~520(mPa s) [DIN 5319]이며, 에폭시 함량은 2.55~2.70(equiv./kg) [ISO 3001], 밀도 1.15~1.25g/cm³ [ISO 1675], 상태는 고체상태의 에폭시 수지를 이용하였다.

경화제는 HT 903-1로서, 녹은점 범위는 79~83°C이며, 밀도는 130°C에서 1.22~1.25g/cm³ [ISO 1675], 형상은 백색과우더 형태이다. 마이크로 실리카입자(제품명 : SS0090)의 비표면적(specific surface area)은 0.709m²/g, 표면가중평균(surface weighted mean)은 8.462μm, 체적가중평균(volume weighted mean)은 11.792μm 그리고 입자크기의 범위는 입도분석을 통하여 1~35μm 크기를 갖고, 중앙부분의 평균 입자크기는 10.721μm을 갖는 마이크로 실리카를 사용하였다.

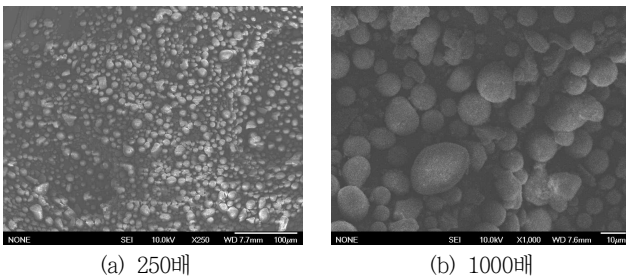


그림 1 사용된 SS0090 마이크로 실리카의 입자 구조 및 배율
Fig. 1 Particle structure and magnification of SS0090 micro silica used

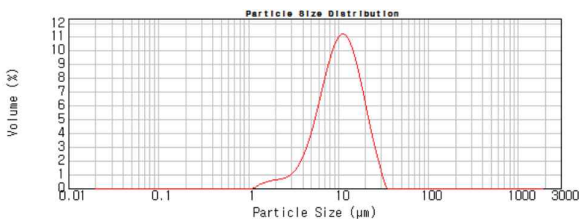


그림 2 마이크로 실리카의 입도 분석
Fig. 2 Particle size analysis of micro silica

친환경 중전기기 절연신소재를 개발하기 위하여 열전도 향상에 도움이 되는 마이크로 알루미나 (제품명:AF2)의 비표면적은 1.1m²/g, 표면가중평균은 5.45μm, 체적가중평균은 18.12 μm 그리고 입자크기의 범위는 입도분석을 통하여 0.35~90μm 크기를 갖고, 중앙부분의 평균 입자크기는 13.49μm을 갖는 마이크로 알루미나를 사용하였다.

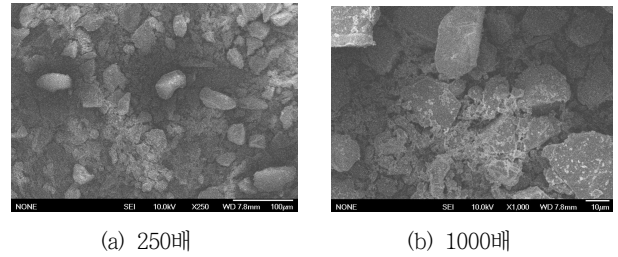


그림 3 사용된 AF2 마이크로 알루미나의 입자 구조 및 배율
Fig. 3 Particle structure and magnification of AF2 micro alumina used

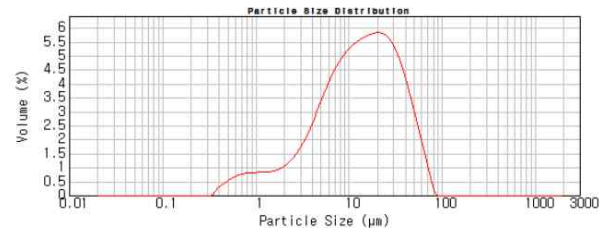


그림 4 마이크로 알루미나의 입도 분석
Fig. 4 Particle size analysis of micro alumina

이와 같이 마이크로 실리카와 마이크로 알루미나를 혼합한 절연신소재를 개발하기 위하여 실리카와 알루미나의 장점을 갖도록 하는 실리카와 알루미나의 최적비율을 부분방전 저항성을 통하여 찾고자 한다.

2.2 에폭시 마이크로 콤포지트 제조

본 연구에 사용한 MS와 MA는 평균입도 크기가 10.721, 13.49 μm을 갖는 마이크로 크기의 입자를 사용하였다. 제조된 마이크로 콤포지트는 GIS Spacer용으로서 향후 친환경절연대체가스의 사용으로 인한 콤포지트의 변화를 추구하기 위한 것으로 종래 SF₆ 절연가스 하에서는 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트만 제조하였다. 그러나 절연매질의 변화에 능동적인 대처를 목적으로 연구된 것이다.

에폭시 수지는 고상에폭시 수지로서 이전에 용융상태 화하게 된다. 마이크로 입자를 충전 후 24시간 후, 온도와 진공상태를 제어할 수 있는 교반시스템에서 200~600RPM의 속도로 5시간 혼합과 진공탈포를 실시한다. 예열된 금형에 주입 후 2차 탈포과정을 걸쳐 140°C×16시간의 경화과정과 이형을 통하여 데시케이터에 보관하여 샘플로 사용하였다.

2.3 부분방전 저항성 샘플 및 측정 시스템

부분방전 저항성 (Partial Discharge Resistance, 이하 PDR이라 한다.) 측정시스템은 그림 5에서 나타내었다. 부분방전시 발생된 광은 저항성 평가를 위하여 Rod 대 평판전극 시스템의 공기

갭으로부터 방출된 것이다. PDR의 광방출의 일시적 변화를 그림 10에서 나타내었다. 측정은 8개의 샘플을 동시에 측정할 수 있는 전극 장치를 개발하여 측정하였고, 부분방전시 발생된 광은 Toshikatsu Tanaka[9]의 연구에서와 같이 열화시간에 의존하지 않음을 본 연구에서 확인할 수 있었다. 사용된 고전압 시스템은 10kV/100mA 주파수 50~1000Hz가 변할 수 있는 시스템을 사용하였고 그리고 실험에 사용된 전압은 5kV/720Hz 인가 후, 96동안(4일) 연속적으로 인가하였다. 그림 11에서는 측정샘플(50×50×1mm)과 전극과의 관계의 그림으로, 정극성에 PDR 전극(팅스팅 재질, 0.5mm 곡률반경)에 연결하고 1mm 두께의 샘플하부에 평판형 전극이 접지로 연결되었다. 그리고 상부 전극과 샘플사이 간격은 0.2mm로 하였다. 실험 후, 표면 침식된 깊이는 Optical Surface Profiler를 이용하여 침식 깊이를 측정하였다.

5kV/720Hz에서 96시간(4일) 후 전극의 침식단 부위에는 까맣게 변색이 되어있었다. 이는 공기 중 방전으로 인한 산화와 에폭시로 부터 증발된 에폭시분자가 표면에 부착되어진 것으로 보이며, 오히려 이러한 전극표면을 덮고 있는 금속산화물과 절연재료의 부착이 부분방전의 저항성을 억누르게 할 수 있는 것

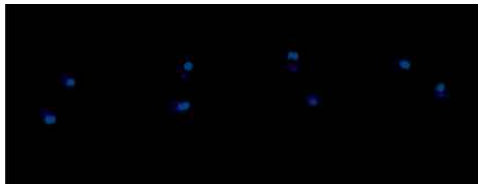


그림 5 부분방전 광방출
Fig. 5 Partial Discharge Light Emission

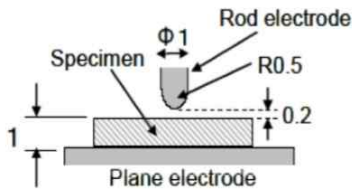


그림 6 부분방전 저항성의 전극 구성
Fig. 6 Electrode configuration of partial discharge resistance



그림 7 부분방전저항성 실험시스템
Fig. 7 Partial discharge resistance test system

이다[9].

주파수를 720Hz로 선택하는 이유는 인가전압과 주파수를 고려하여 전압을 높게 하면, 주파수를 약간 낮은 주파수로 선택하고 그리고 전압이 낮으면, 주파수를 높게 하여 부분방전 저항성을 통한 절연물 표면의 침식 정도를 연구하는 것이다.

3. 실험결과 및 검토고찰

3.1 에폭시/마이크로 실리카 콤포지트 충전함량과 부분방전 저항성

그림 5와 표 1에서는 원형 에폭시 수지 (B41:고상)와 SS0090 마이크로 실리카의 충전량을 40~70wt%의 범위에서 5wt%씩 증가시켜 7종류의 에폭시 마이크로 실리카 콤포지트를 제조하였고

표 1 사용된 샘플의 종류

Table 1 Type of sample used

Number	Type of Samples	Note
1	Epoxy (B41)	epoxy original
2	EMS_40wt%	epoxy/micro silica_40wt%
3	EMS_45wt%	epoxy/micro silica_45wt%
4	EMS_50wt%	epoxy/micro silica_50wt%
5	EMS_55wt%	epoxy/micro silica_55wt%
6	EMS_60wt%	epoxy/micro silica_60wt%
7	EMS_65wt%	epoxy/micro silica_65wt%
8	EMS_70wt%	epoxy/micro silica_70wt%
9	MS:MA=1:9	content ratio=1:9
10	MS:MA=3:7	content ratio=3:7
11	MS:MA=5:5	content ratio=5:5
12	MS:MA=7:3	content ratio=7:3
13	MS:MA=9:1	content ratio=9:1

원어정리로서 Epoxy Resin: Araldite(B41), Hardener:HT 903-1으로 B41(주제)와 경화제 혼합 비는 1:0.4로 함.

EMS:Epoxy Micro Silica(SS0090)

MS: Micro Silica(SS0090), MA: Micro Alumina(AF2)

이중 혼합 콤포지트의 경우 MS:MA의 비율 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 그리고 9:1의 함량비(단, 전체 함량은 70wt%)

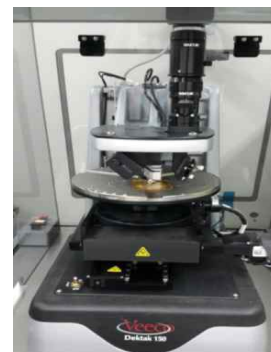
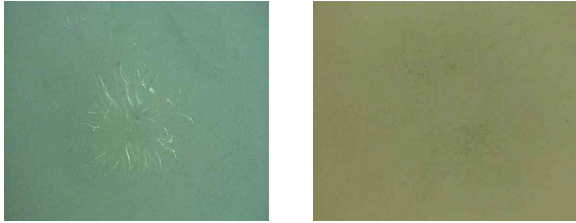


그림 8 표면침식 깊이 측정장치
Fig. 8 Surface Profiler (Dektak-150) by Veeco

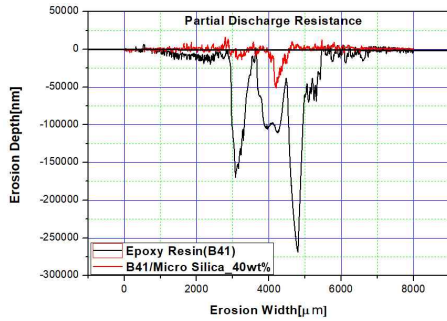
그리고 0.2mm 극간거리에서 발생된 5kV/720Hz를 인가한 전기적 스트레스 결과로서 표면이 침식되는 결과를 가져왔다. 침식된 형상 및 깊이는 Optical Surface Profiler를 이용하여 측정하였고



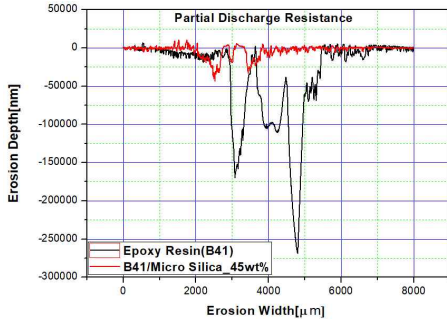
(a) 원형에폭시 수지(B41) (b) 에폭시/MS_70wt%

그림 9 마이크로 콤포지트 광학현미경 사진(40배 배율)

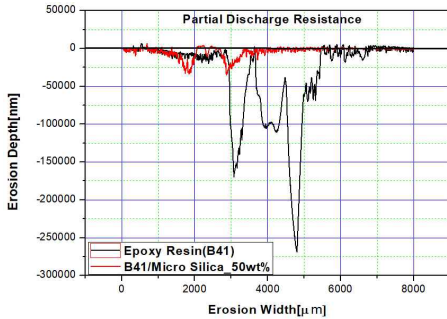
Fig. 9 Microcomposite optical microscope photograph (40x magnification)



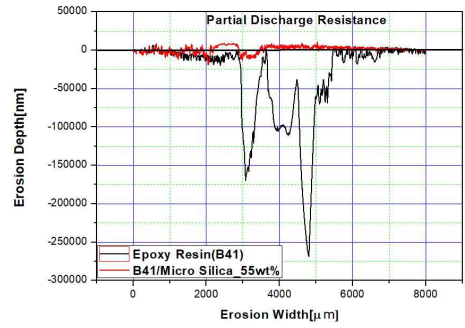
(a) B41/MS_40wt% composites surface erosion depth



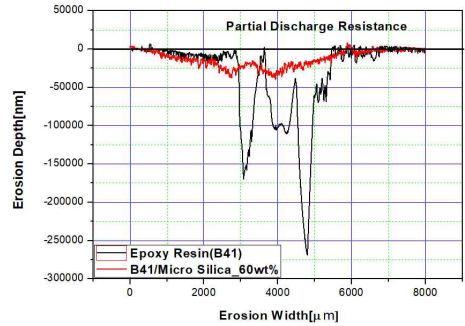
(b) B41/MS_45wt% composites surface erosion depth



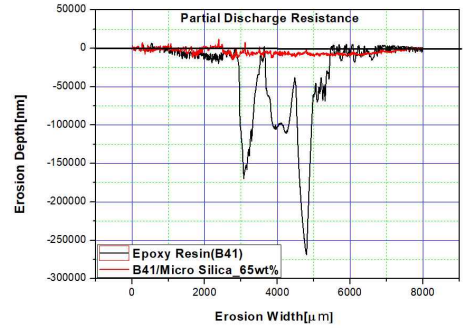
(c) B41/MS_50wt% composites surface erosion depth



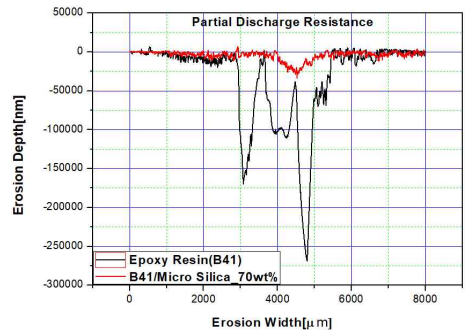
(d) B41/MS_55wt% composites surface erosion depth



(e) B41/MS_60wt% composites surface erosion depth



(f) B41/MS_65wt% composites surface erosion depth



(g) B41/MS_70wt% composites surface erosion depth

그림 10 B41/MS 충전함량별 콤포지트의 부분방전 저항성

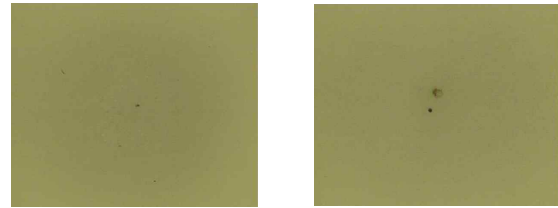
Fig. 10 Partial discharge Resistance of composite by filling amount of B41/MS (a) 40wt%, (b) 45wt%, (c) 50wt%, (d) 55wt%, (e) 60wt%, (f) 65wt%, (g) 70wt%

그 결과 B41의 원형에폭시 수지의 경우 264 μm 의 침식을 가져왔다. 침식 폭은 8000 μm 로서 40배 광학현미경 촬영된 자료가 그림 9에 나타내었다.

원형에폭시 수지와는 다르게 에폭시/마이크로실리카 충전함량의 증가에 따라 대체로 침식깊이가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 그러나 MS_60과 MS_70wt%에서는 순차적으로 감소하는 경향에 역행된 결과이다. 이유는 과량의 MS의 충전시 미분산된 입자의 존재와 그로 인한 계면의 약화로 인한 결과로 사료된다. 확증적인 자료는 유리전이온도의 결과로 볼 수 있다. 원형에폭시수지의 경우 Tg가 107.9 $^{\circ}\text{C}$ 이고, 40wt%의 경우 110.4 $^{\circ}\text{C}$, 50wt%의 경우 114 $^{\circ}\text{C}$, 60wt%의 경우 108.9 $^{\circ}\text{C}$ 그리고 70wt%에서는 102 $^{\circ}\text{C}$ 의 결과를 얻게 되었다. 유리전이온도가 낮아지는 이유는 마이크로실리카와 에폭시수지와와의 계면 결합력이 약화되거나, 미반응기의 존재가 많아져서 결국 가교밀도 약화의 원인으로 사료된다[10].

이처럼 충전함량이 증가하면 전반적인 경향으로 볼 때, 원형에폭시수지에 비하여 침식의 저항성이 크게 강화됨을 알 수 있다. 원형(264 μm)에 비하여 침식깊이는 40wt%(516%), 45wt%(617%), 50wt%(770%), 55wt%(1438%), 60wt%(680%), 65wt%(1785%) 그리고 70wt%(800%)의 침식이 둔화되는 즉 저항성이 강화되는 결과이다.

이유는 원형에폭시에서는 표면침식의 요철이 거의 없이 매끄럽게 침식되었고 그리고 전극 직하부분의 침식이 가장 크고 중심에서 벗어날수록 조금은 적은 침식을 나타내었다. 부분방전에 의해 마이크로실리카 콤포지트의 경우 침식은 마이크로필러가 없는 수지로부터 침식이 시작되고 그리고 필러를 관통하지 못한다. 고 에너지가 집중적으로 콤포지트에 주입되어질 때 원뿔모양으로 침식이 진행되어지고, 필러가 열전도도가 양호하면 열 방출을 하기 때문에 침식이 둔화된다. 필러의 함량이 높을수록 열전도도가 높고 그리고 균질성을 가질 확률이 높기 때문에 침식이 더욱더 약할 수 있다[11][12]. 일반적으로 충전기 전문 제조업체에서는 60~70wt% 충진을 하고 있으며, 본 연구에서도 그런 연유로 40~70wt%를 충전하게 된 것이다. 나노필러의 경우와 현재 연구된 마이크로 필러의 경우 비교 검토하여 볼 때, 사용된 마이크로실리카(SS0090)의 평균입도크기는 10.721 μm 이고 비표면적은 0.709 m^2/g 이다. 가상적으로 층상실리케이트의 두께가 1nm이고 길이가 50~100nm인 입자의 비표면적은 완전한 박리가 이루어질 때 850 m^2/g 으로 마이크로와 나노의 비표면적의 비는 1075배의 비표면적의 차이를 볼 수 가 있을 것이다. 그런 이유로 나노입자의 분산이 완벽하게 이루어질 때, 입자와 입자간 간격이 매우 좁아지기 때문에 침식이 둔화될 수가 있을 것이다. 잘 분산되고 그리고 박리가 완벽하게 이루어질 때 나노입자는 장벽으로 작용하게 되어 부분방전 저항성으로 더욱더 크게 작용할 것이다. 또한 입자와 수지계면사이 결합력이 강하게 이루어질 때, 침식에 강하게 작용되고 반대로 계면 결합력이 약할 때 즉, 응집과 같은 경우에서는 침식에 매우 취약한 면을 보일 수 있을 것이다. 최근에는 그런 이유로 나노와 마이크로의 혼합에 의한 콤포지트개발이 이루어지고 있으며[18], 원인은 마이크로와 나노와 혼합에 의해 조직의 치밀성을 갖기 때문에 부분방전의 침식저항성이 강한 경우로 볼 수가 있다[13].



(a) MS:MA=1:9 함량비 (b) MS:MA=7:3 함량비

그림 11 B41/이종혼합 콤포지트 광학현미경사진(40배 배율)

Fig. 11 B41/Heterogeneous mixed composite optical microscope photograph (40x magnification)

표 2 B41/MS 충전함량별 콤포지트의 침식깊이

Table 2 Depth of erosion of composite by filling amount of B41/MS

number	Type of samples	Erosion Depth [μm]	Note
B41(Epoxy Resin)		264.24	reference
(4a)	Epoxy/MS_40wt%	51.18	516.29% ↓
(4b)	Epoxy/MS_45wt%	42.78	617.67% ↓
(4c)	Epoxy/MS_50wt%	34.28	770.82% ↓
(4d)	Epoxy/MS_55wt%	18.37	1438% ↓
(4e)	Epoxy/MS_60wt%	38.82	680.68% ↓
(4f)	Epoxy/MS_65wt%	14.80	1785% ↓
(4g)	Epoxy/MS_70wt%	32.99	800% ↓

표 3 B41/MS:MA 이종 혼합비에따른 콤포지트의 침식깊이

Table 3 Depth of erosion of composite depending heterogeneous mixture ratio of B41/MS:MA

number	Type of samples	Erosion Depth [μm]	Note
B41(Epoxy Resin)		264.24	
EMS(70wt%)		32.99	reference
(5a)	MS:MA=1:9(70wt%)	55.40	+167%
(5b)	MS:MA=3:7(70wt%)	60.02	+181%
(5c)	MS:MA=5:5(70wt%)	29.56	-10.4%
(5d)	MS:MA=7:3(70wt%)	26.28	-20.34%
(5e)	MS:MA=9:1(70wt%)	8.65	-73.78%

3.2 에폭시/ 이종 혼합 콤포지트의 부분방전 저항성

그림 11에서는 에폭시/ MS:MA의 충전 혼합비를 1:9로 한 경우와 7:3으로 혼합한 경우의 콤포지트의 표면 침식을 96시간동안, 5kV/720Hz 부분방전 저항성 결과 표면침식상태를 광학현미경 촬영(40배)된 경우를 나타낸 것이다.

표면상태의 침식이 매우 미약하여 요철부분이 광학현미경에서는 명확하게 나타나지 않았다.

그림 7(a)~7(e)에서는 에폭시/마이크로실리카(SS0090) 70wt% 충전된 콤포지트와 마이크로실리카(SS0090): 마이크로알루미나

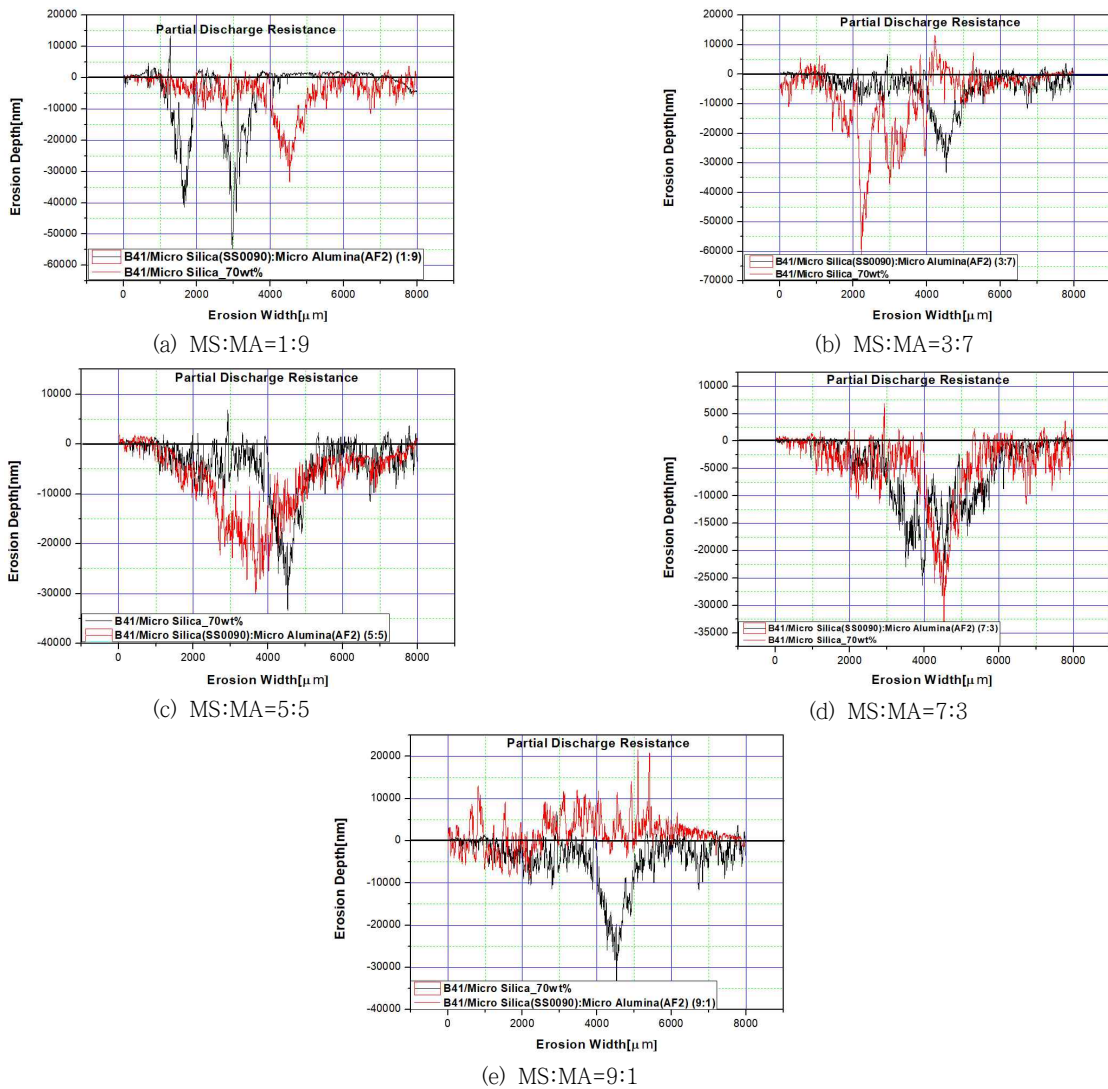


그림 12 B41/이종혼합비(MS:MA)복합체의 부분방전 저항성

Fig. 12 Partial discharge resistance of B41/heterogeneous mixture (MS: MA) composite (a) 1:9, (b) 3:7, (c) 5:5, (d) 7:3, (e) 9:1

(AF2)혼합에 의한 충전함량비를 70wt%로 하였다. 혼합된 충전함량비는 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 그리고 9:1, 5종류의 혼합 복합체와 마이크로 실리카 70wt%와 비교평가하기 위하여 표면침식결과를 나타내었다. 그리고 표 2에서는 그림 12(a)~12(e) 그리고 마이크로 실리카(SS0090) 70wt%된 복합체의 침식깊이 결과를 나타낸 것이다. 그리고 비교의 기준을 마이크로실리카 70wt%를 기준으로 하여 성능의 정도를 표시하였다.

그 결과 MS:MA 혼합된 충전함량비의 경우 마이크로실리카의 충전 함량비가 높을수록 반대로 마이크로 알루미늄의 충전 함량비가 낮을수록 표면의 부분방전 저항성 측정결과 표면침식이 낮음을 알 수 있었다. 침식된 정도를 비교하여 볼 때, 1:9인 경우 55.40 μm , 3:7인 경우 60.02 μm , 5:5인 경우 29.56 μm , 7:3인 경우 26.28 μm 그리고 9:1인 경우 8.65 μm 로서 혼합된 충전함량을 70wt%로 하였다. 마이크로실리카 단독 충전된 복합체와 비

교하여 볼 때, MS:MA의 비가 1:9에서는 (+)167%, 3:7에서는 (+)181%, 5:5에서는 (-)10.4%, 7:3에서는 (-)20.34% 그리고 9:1에서는 (-) 73.78%의 성능향상을 나타내었다. 여기서 (+) 심벌은 침식의 증가를 의미하였고 그리고 (-)는 침식의 감소됨을 의미한 것이다.

MS:MA의 충전 함량비가 1:9~9:1의 변화 결과 마이크로 실리카의 충전함량이 증가되고 역으로 마이크로 알루미늄 충전함량이 감소할수록 부분방전 저항성이 강한 결과이다.

이유는 충전된 두 종류의 마이크로 입자인 실리카의 경우 비표면적이 0.709 m^2/g 이고 그리고 알루미늄의 경우 1.1 m^2/g 을 나타내었다. 그러나 입도분포를 볼 때, 실리카의 경우 입자의 분포가 1~35 μm 범위를 그리고 알루미늄은 0.35 μm ~90 μm 범위로서 각각의 가장 많은 부분의 입자크기는 실리카의 평균입자크기 10.721 μm 그리고 알루미늄의 평균입자크기 13.49 μm 이었다.

첫째, 마이크로 실리카와 마이크로알루미나 이종의 무기물이 혼합되어 있는 콤포지트는 3종류의 각기 다른 유전율을 갖는 복합체이다. 유전율의 차이는 에폭시 수지(마이크로 실리카/마이크로 알루미나 순으로 유전율의 차이를 갖게 된다. 물론 마이크로 입자의 분산에 의한 차이는 존재하지만, 이런 순서의 차이를 갖게 된다. Tanaka T의 연구에서도 이와같이 유전율의 차이로 인하여 침식을 설명하고 있고[14] 유전율이 큰 쪽의 무기물에 부분방전에 영향이 크게 되어 침식이 자유로워지고 그런 이유로 알루미나 충전함량이 많을수록 부분방전 저항성이 크게 되고 반대로 실리카의 함량이 많아지면 오히려 부분방전 저항성이 강한 이유로 사료된다.

둘째로, 전극적하의 표면에 에폭시수의 피트가 형성하기 시작하여 계면이 약한 경우 침식이 쉽게 이루어지고 계면이 강한 경우 침식이 둔화하게 된다. 실란 커플링제를 사용하여 나노입자의 표면처리결과 결합력이 강한 경우 상대적으로 침식이 둔화되는 경우이다. 마이크로 알루미나의 경우 입도분포에서 보여준바 대로 표면의 요철이 심하게 된 상태이다. 그런 표면의 상태에서는 에폭시수지가 채워지지 못한 나노 보이드 및 계면의 약함을 나타낼 수 가있다. 그러나 마이크로 실리카는 구상에 가까운 상태로 마이크로 알루미나보다 평균 입자크기가 작고 그리고 수지와 실리카 표면의 결합력이 알루미나보다 상대적으로 강할 수 있게 될 수 있다[16]. 입자가 작은 나노의 경우 마이크로보다 침식이 둔화되고[15] 부분방전의 저항성이 강함을 보고하고 있고 그리고 계면의 두께가 두터울수록 부분방전성에 강함을 알 수 있다. 이는 나노입자의 경우 수지와 계면의 멀티 코어모델[17]에서 볼 수 있듯이 입자와 입자상호 작용하는 영역이 좁을수록 계면이 강하고 멀어지면 멀어질수록 상호작용이 약하게 되어 침식의 결합이 쉽게 발생된다고 사료된다. 그런 이유로 실리카의 함량이 많을수록 부분방전 저항성이 강하여 침식이 약화됨으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는, GIS에 적용하는 SF₆ 절연가스가 범세계적으로 규제 대상이 되었다. 그런 이유로 친환경절연가스에 적합한 신절연 소재를 개발하기 위하여, 마이크로 실리카와 마이크로 알루미나의 장점을 살리어 두 종류 이종 무기물을 혼합하여 제조된 콤포지트의 최적화된 충전함량비를 얻기 위하여 전기적 특성 중 부분방전 저항성에 관한 연구를 실시하였다. 실험은 교류 5kV/720Hz, 96시간 동안 13종류 샘플의 부분방전 저항성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 에폭시/마이크로 실리카(SS0090) 콤포지트의 충전함량 변화(0, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70wt%)에 따른 부분방전저항성 측정결과 SS0090 마이크로 실리카는 구상에 가까운 입자로서 충전함량이 증가할수록 부분방전 저항성이 강함을 알 수 있었다. 이는 실리카 입자의 O-H기와 에폭시 수지의 O-H가 존재하기 때문에 수지와 입자간 계면의 강화와 알루미나에 비하여 비중이 상대적으로 작아서 입자수가 많은 결과 크고 작은 입자의 조밀한

조직이 강력한 에너지의 주입에도 부분방전 저항성에 강한 효과로 침식이 둔화됨을 알 수 있었다.

둘째, 에폭시/이종혼합(MS:MA=1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1)콤포지트의 부분방전 저항성의 결과로서 충전함량은 70 wt%이었다. 이종 혼합 콤포지트에서 마이크로실리카의 충전함량이 증가할수록(역으로 마이크로알루미나의 충전함량이 감소할수록) 부분방전 저항성이 강함을 알 수 있었다. 이는 마이크로알루미나의 충전함량이 적고, 실리카의 함량이 과량으로 주입되어, 알루미나의 열전도도와 실리카의 계면결합의 강화로 부분방전 저항성이 크게 강화된 결과로 사료된다. 또한 친환경 절연가스는 실리카와 화학적으로 안정된 상태를 유지하기 때문에 신절연소재로 적절할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 중부대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, Vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [2] L. H. Meyer, E. A. Cherney and S. H. Jayaram, "The role of inorganic fillers in silicone rubber for outdoor insulation-alumina tri-hydrate or silica", *IEEE Electr. Insul. Mag*, Vol. 20, No. 4, pp. 13-21, 2004.
- [3] T. J. Lewis, "Nanometric Dielectrics", *Phil. Trans. Roy. Soc. London, UK*, Vol. A247, pp. 529-551, 1994.
- [4] C. Green and A. Vaughan, "Nanodielectrics- How much do we really understand?", *IEEE Electr. Insul. Mag*, Vol. 24, No. 4, pp. 6-16, 2008.
- [5] B. Venkatasulu and M. J. Thomas, "Erosion resistance of silicone rubber nanocomposites at lower filler loadings", *Intern. Symp. High. Volt. Eng. (ISH)*, pp. 1-6, 2009,
- [6] B. Venkatasulu and M. J. Thomas, "Studies on the tracking and erosion resistance of RTV silicone rubber nanocomposites", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, pp. 204-207, 2008.
- [7] I. Ramirez, E.A. Cherney, S. Jayaram and M. Gauthier, "Silicone rubber nanocomposites for outdoor insulation applications", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, pp. 384-387, 2007
- [8] G. Iyer, R. S. Gorur, A. Krivda, "Corona resistance of epoxy nanocomposites: experimental results and modeling", *IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION*, Vol. 19, No. 1, 2012

- [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 Solybilization Methods", *IEEE Intern. Conf. Solid Dielectrics (ICSD), Winchester, UK*, pp. 337-340, 2007.
- [10] Jae-jun Park, "Partial Discharge Resistance According to Frequency Acceleration Deterioration of Epoxy/Layered Silicate Nanocomposites", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 62, No. 12, pp. 1694-1699, 2013.
- [11] R. S. Gorur, E. A. Cherney, R. Hackam, "Performance of polymeric insulating materials in salt fog", *IEEE Trans. Power. Del.*, Vol. PWRD-2, No. 2, pp. 486-492, April 1987.
- A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, "Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits", *ACM/IEE Design Automation Conf.*, pp. 253-259, 1992.
- [12] G. Iyer, R. S. Gorur, A. Krivda, "Corona resistance of epoxy nanocomposites: experimental results and modeling", *IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION*, Vol. 19, No. 1, 2012.
- [13] C.H. Lee and J. J. Park, "The partial discharge resistances of epoxy nano- and micro-composites", *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 89-91, April 25, 2010.
- [14] Tanaka T, Iizuka T, Meichsner C, Groppel P, Heini D, Weidner J.R, "Dielectric Properties and PD Resistance of Epoxy/Fumed and Precipitated Silica and Alumina Nanocomposites", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, pp. 279-282, 2012.
- [15] J. R. Weidner, F. Pohlmann, P. Gröppel and T. Hildinger, "Nanotechnology in High Voltage Insulation Systems for Turbine Generators - First Results", *Proc. ISH Hannover, No. E-088*, pp. 6, 2011.
- [16] Toshikatsu Tanaka, Tomonori Iizuka, "Generic PD Resistance Characteristics of Polymer Nanocomposites", *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE*, pp. 1-4, 2010.
- [17] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse and Y. Ohki, "Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics - Verification from Partial Discharge Resistance Study -", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 12, No. 4, pp. 669-681, 2005.
- [18] Jae-jun Park, "A Study on the Partial Discharge Resistance Properties of Epoxy/Micro/Nano Alumina Composites", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* Vol. 65, No. 6, pp. 1026-1031, 2016.

저 자 소 개



박재준 (Park Jae-Jun)

1985년 광운대학교 전기공학과 학사
1987년 광운대학교 전기공학과 석사
1993년 광운대학교 전기공학과 박사
1997년~현재 중부대학교 전기전자공학과 교수

E-mail: jjpark@joongbu.ac.kr