

여러 종류의 에폭시/이종무기물 혼합 콤포지트의 전기적 교류 절연과괴 특성

Electrical AC Insulation Breakdown Characteristics of Various Epoxy / Heterogeneous Inorganic Mixed Composite

박 재 준*
(Jae-Jun Park)

Abstract - In this study, 20 types of samples were prepared by mixing different kinds of inorganic materials to develop insulation materials for epoxy - based GIS substation equipment used under high voltage environmentally friendly insulation gas. One of the electrical characteristics, AC insulation breakdown experiment was performed. As mixing ratio of mixed heterogeneous inorganic materials, the dielectric breakdown strength was increased with increasing filler ratio of micro silica , micro silica : micro Alumina, 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1, and decreased as the filling amount of micro alumina increased. The AC insulation breakdown characteristics were the best when the composition ratio was 9:1.

The higher the content of silica, the better the interfacial properties, and the larger the alumina content ratio, the worse the interfacial properties.

Key Words : Environment-friendly insulation gas, Mixed heterogeneous inorganic composite, Epoxy resin, Interfacial property, AC insulation breakdown strength

1. 서 론

1960년대 이래로 SF₆(sulphur hexafluoride)는 고전압 전력설비 즉, 고전압 전송과 변전응용(GIS, GCB, GIL)에 사용된 가장 보편적인 절연가스이다. 전기 절연성과 전류 차단 성능면에서 우수한 특성을 지니고 있음에도 불구하고 과도한 크기, SF₆ 분자의 복사 효과 및 대기 수명은 이 가스를 온실 가스 효과의 악화 요인으로 만듭니다.

주어진 시간(20, 100, 500년 후)의 지구 온난화 잠재력 (GWP)은 CO₂의 경우 1이라면 SF₆의 경우 16300, 22800, 32600정도로 평가하였다[1]. 그래서 교토 회의 (1997-COP3) 이후 SF₆ 양과 가스 누출을 줄이기 위해 가스 절연 개폐 장치 (GIS) 제조업체가 수많은 연구를 수행했습니다.

이는 장치의 크기를 최소화하고 가스 처리 절차를 개선하는 것으로 구성됩니다. SF₆에 상응하는 절연성능을 지닌 새로운 환경 친화적인 후보 물질을 확인하기 위해 천연 가스(N₂, CO₂ [2] 또는 건조 공기 [3]) 또는 천연가스와 함께 CFI [4], 과불 소화 케톤(Perfluorinated Ketones) [5,6], 하이드로 플루오로 올레핀(Hydrofluoroolefins :HFO)과 같은 복잡한 유체의 혼합물이 연구되어왔다[1]. 이와 같은 친환경 절연가스 환경에서 사용할 새

로운 절연물을 개발하기 위해, 본 논문은 고전압기반 중전기기 즉, GIS 변전시스템의 부품소재 및 고전압 절연신소재를 개발하기 위하여 에폭시 기반 마이크로실리카 및 마이크로 알루미늄 나 무기물을 혼합한 새로운 콤포지트를 개발하기 위하여 연구하였다.

현재까지 SF₆ 절연가스 하에서 알루미늄을 사용하는 이유가 SF₆ 화합물이 연속적으로 전자 충돌에 의해 분해되어 4개의 불소(F) 라디칼이 생성되어, 실리카(SiO₂)를 공격하여 실리카 표면이 부식된다. 그리고 SF₆ 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 되는 이유로 실리카를 사용하지 않았다. 그러나 친환경 절연가스에서는 마이크로실리카의 장점이 경제적으로 저가이며, 계면에 OH기가 존재함으로 수지와 무기물과 단층의 계면을 강화시키는 수소결합이 가능하고, 비중이 낮아 같은 중량에서 실리카의 입자가 알루미늄에 비하여 과량이기 때문에 나노와 마이크로를 혼합한 콤포지트와 같은 절연 시스템을 가질 수 있다[7]. 또한 알루미늄은 수지와 계면의 결합력은 매우 미약하지만, 절연물의 열전도 측면에서 우수한 성질을 갖고 있기 때문에 [8~9], 에폭시 매트릭스 하에서 서로 다른 이종의 무기물을 혼합하여 두가지 무기물이 갖는 특성이 상호보완적인 관계를 갖는 최적의 충전함량비를 찾기 위하여, 전기적 특성 중 교류 절연 파괴특성을 연구하였다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kiee University, Korea
E-mail: jjpark@joongbu.ac.kr

Received : July 14, 2012; Accepted : November 28, 2012

2. Experiment

2.1 재료

에폭시 수지의 특성은 표 1에서 나타내었다. 비 개질된 비스페놀 A형 기본 에폭시 수지로서 경화제의 특성을 보완하기 위해 점도와 반응성이 밀접하게 맞춰져 있는 수지이며, 그들은 용매를 함유하지 않으며 실내 온도에서 무취의 고체상태의 에폭시 수지이다.

경화제 HT 903-1는 표 2에서 특성표를 나타내었다. 실온에서는 무색의 고체상태인 카르복실산무수물에 기초한 경화제로서 우수한 전기적 및 기계적 최종 특성을 갖는 주조 생산을 위한 고온 경화 주조 수지 시스템이다.

표 1 사용한 에폭시 수지의 특성표

Table 1 Properties of Epoxy Resins Use

Properties	International standard	Unit	Properties value
Viscosity (120°C)	DIN 53019	mPa s	390-520
Melting range		°C	35-50
Epoxy contents	ISO 3001	equiv./kg	2.55-2.70
Flash point	DIN51758	°C	>200
Volatile content		%	0.0-0.2
Vapour pressure (150°C)		Pa	1
Density (25°C)	ISO 1675	g/cm ³	1.15-1.25
Aspect	Solid, pale yellow or yellow resin		

표 2 사용한 경화제의 특성표

Table 2 Properties of the curing agent use

Properties	International standard	Unit	Properties value
Melting range		°C	128-132
Flash point	DIN51758	°C	140
Volatile content		%	0.0-0.2
Vapour pressure (130°C)		Pa	800
Density	ISO 1675	g/cm ³	1.22-1.25
Acid content		%	≤3
Aspect	white powder		

Araldite Casting Resin System 으로서, 에폭시 수지 100g / 경화제 30~40g/ 무기물 함량 200~250g의 조성비를 갖는 경화시스템이다. 경화조건은 140°C 계기용변압기(potential transformers), 스위칭기어(switchgear) 성분과 같은 높은 기계적, 열적 그리고 화학적 스트레스에 지배된 장치의 구조적 부분과 같은 고전압 중 전기기의 육내용 절연물로 이용하는 절연시스템이다.

고전압 중전기 산업계에서는 향후 2021 이후 SF6 절연가스

를 친환경 절연가스(CO2 ,g3, N2, Dry Air, Novec 4710)로 대체해야하는 상황에 있다. 이에 발맞추어 최적의 친환경 절연소재개발을 위해 다양한 각도도 연구를 진행하고 있으며, 국가적 차원에서 연구개발을 실시하고 있다. SF6 환경 하에서는 μ Silica를 사용하지 않았다. 이유는 SF6 하에서 실리카를 포함한 절연물의 경우 부식으로 인하여 절연물의 약화 및 결함을 가져올 수 있다. 그러나 친환경 절연가스 하에서는 μ Silica와 μ Alumina의 특 장점을 이용하여, 이종의 무기물을 혼합한 콤포지트를 개발하였다.

본 연구에 사용되는 μ Silica 2종류와 μ Alumina 2종류 무기물 입자의 특성을 표 3에서 나타내었다. 각각의 입자종류에 대해서, 입자의 비표면적, 입자의 분포, 평균입자 크기 그리고 입자의 형상 등 실제적으로 절연물의 특성에 영향을 주는 요소이다.

2.2 Epoxy/ μ (Silica+Alumina) Composites 제조

본 연구에 사용한 μ Silica와 μ Alumina는 표 3에서 무기물 입자의 입도분석 결과를 나타내었다. 제조된 이종의 마이크로 콤포지트는 GIS Spacer용으로 향후 친환경 절연 대체가스의 사용으로 인한 고전압 절연물을 개발하기 위하여 구하기 연구 개발하였다. 제조과정은 그림 1과 같다.

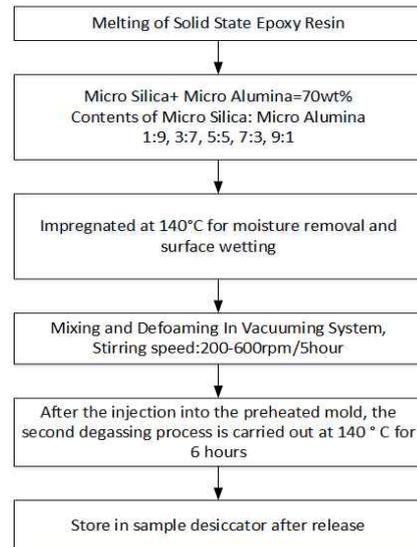


그림 1 샘플제조과정

Fig. 1 Sample manufacturing process

표 3 4 종류의 마이크로 크기 무기물의 입자 특성

Table 3 Particle properties of 4 types of micro-sized mineral

입자종류	입자특성	비표면적 (m ² /g)	입자분포 (μm)	평균입자 크기(μm)	입자 형상
μ A_1(μ Alumina_1)		1.02	0.35~90	16.95	랜덤
μ A_2(μ Alumina_2)		1.1	0.35~90	13.49	랜덤
μ S_1(μ Silica_1)		0.709	1~35	10.72	구형
μ S_2(μ Silica_2)		0.871	1~70	11.53	랜덤

표 4 사용된 샘플의 종류

Table 4 Type of sample use

Number	Type of Mixed Samples	Note
1	ER	Epoxy Resin
2	μ S_1: μ A_1	μ S_1(μ S_1): μ A_1(μ A_1) = 1::9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1
3	μ S_2: μ A_1	μ S_2(μ S_2): μ A_1(μ A_1) = 1::9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1
4	μ S_1: μ A_2	μ S_1(μ S_1): μ A_2(μ A_2) =1::9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1
5	μ S_2: μ A_2	μ S_2(μ S_2): μ A_2(μ A_2) =1::9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1

표 5 용어 정리

Table 5 Glossary of terms

Abbreviation	Original Language
ER	Epoxy Resin
MS	μ Silica
MA	μ Alumina
EMSC	Epoxy Micro Silica Composites
EMAC	Epoxy Micro Alumina Composites
EMSAC_19	Epoxy/ μ S/ μ A Mixed Ratio 1:9 Composites
EMSAC_37	Epoxy/ μ S/ μ A Mixed Ratio 3:7 Composites
EMSAC_55	Epoxy/ μ S/ μ A Mixed Ratio 5:5 Composites
EMSAC_73	Epoxy/ μ S/ μ A Mixed Ratio 7:3 Composites
EMSAC_91	Epoxy/ μ S/ μ A Mixed Ratio 9:1 Composites

전체 충전함량은 70wt%

제조된 샘플은 μ Silica 2 종류 그리고 μ Alumina 2 종류의 조합인 4 종류이다. 그리고 각각의 종류에 대해 충전함량비 5 종류로서 전체 샘플의 종류는 20가지 종류의 샘플을 제조하였다.

2.3 교류절연파괴 측정

절연파괴 실험에 사용된 시험 장치는 100 kV, 주파수 60 Hz/0.1 A인 고전압 발생이 가능한 내전압 시험 장치를 이용하였다. 직경 7.4 mm 스테인레스 재질의 구 대 구 전극에서 수행하였고, 모든 측정 시편의 두께는 2mm로 동일하게 적용하였다. 절연 파괴 실험은 고전압 (High Voltage)을 발생시키는 전극을 시편과 함께 상온의 절연유 속에서 수행하였다. 시험 시편의 규격은 100×100×2mm를 사용하였다.

인가전압의 속도는 교류 1 kV/s의 승압 속도로 시편이 관통 파괴에 이를 때까지 실시하였고, 측정된 모든 절연 파괴 데이터 값은 와이블플롯을 통하여 나타내었다. 그리고 와이블플롯의 3가지 파라미터인 형상파라미터, 스케일파라미터, B10수명을 구하여 나타내었고 그리고 절연파괴 특성에 대한 해석을 실시하였다.

여러 종류의 에폭시/이종무기물 혼합 복합체의 전기적 교류 절연파괴 특성

3. 결과 및 검토 고찰

3.1 이종 무기물 혼합 복합체의 구조적 특성(SEM)

그림 2~5에서는 ER/이종무기물 혼합 복합체로서, μ Silica+ μ Alumina을 혼합한 복합체의 계면을 확인하기 위하여 SEM의 측정결과를 나타내었다. 그림 1에서는 2000배, 5000배의 배율로

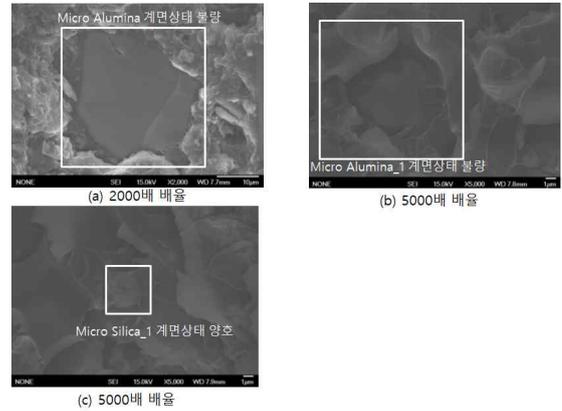


그림 2 Epoxy/ μ Silica_1+ μ Alumina_1 혼합 복합체 SEM

Fig. 2 Epoxy/ μ Silica_1 + μ Alumina_1 Mixed Composite SEM

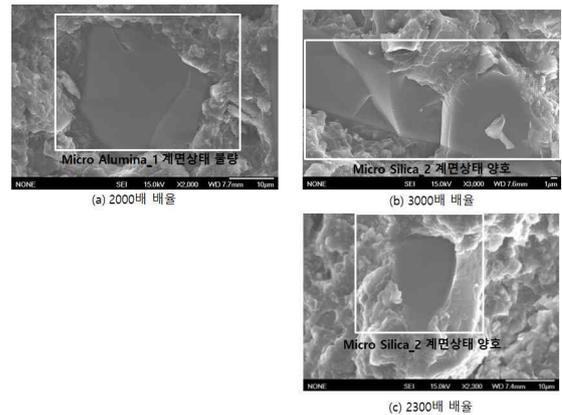


그림 3 Epoxy/ μ Silica_2+ μ Alumina_1 혼합 복합체 SEM

Fig. 3 Epoxy/ μ Silica_2 + μ Alumina_1 Mixed Composite SEM

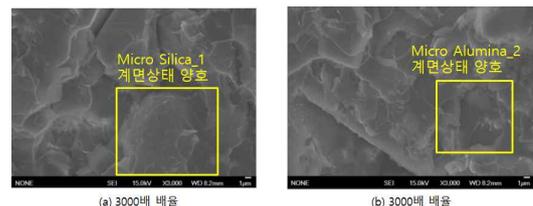


그림 4 Epoxy/ μ Silica_1+ μ Alumina_2 혼합 복합체 SEM

Fig. 4 Epoxy/ μ Silica_1 + μ Alumina_2 mixed composite SEM

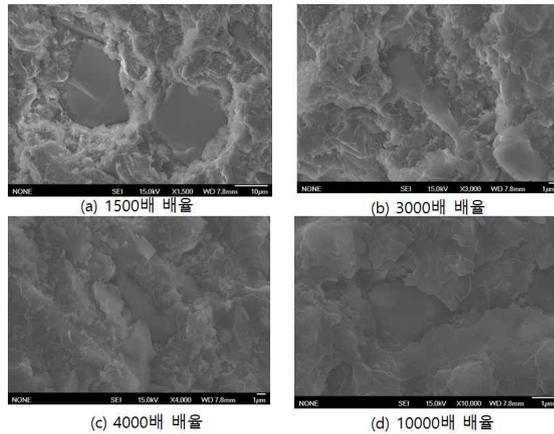


그림 5 Epoxy/μSilica_2+μAlumina_2 혼합 콤포지트 SEM
 Fig. 5 Epoxy/μSilica_2 + μAlumina_2 Mixed Composite SEM

측정한 SEM으로서, μS_1 + μA_1 콤포지트의 경우 μS_1계면은 양호한 상태를 그리고 μA_1의 계면은 불량한 상태를 나타내었다. 그림 2에서는 2000배, 2300배 그리고 3000배의 배율로 측정 한 SEM을 나타내었다. μS_2 + μA_1 콤포지트로서, μS_2의 계면은 양호하였고, μA_1계면상태는 불량한 상태이었다.

그림 4의 경우는 μS_1 + μA_2 콤포지트로서 μS_1과 μA_2의 무기물 모두 양호한 계면을 나타내고 있다. 그림 5에서는 μS_2 + μA_2의 콤포지트로서 μS_2 계면은 양호하였고 그리고 μA_2의 계면은 불량한 결과를 나타내었다. 계면은 절연파괴에 있어 전자의 이동통로서 계면이 양호하면 절연파괴 강도가 높고, 낮은 절연성능에 큰 영향을 주게 된다.

3.2 Epoxy/이종무기물 혼합 콤포지트의 전기적 특성

3.2.1 Epoxy/μS_1+μA_1의 혼합비에 따른 전기적 절연파괴

그림 6~7, 표 6에서는 에폭시/μS + μA 이종무기물 혼합 콤포지트의 교류절연파괴 강도 와이블플롯을 나타내었다. 와이블플롯의 형상파라미터는 측정값의 결과에 대한 기울기를 의미하는 것으로, 기울기가 크면 결과 값의 신뢰도가 높은 결과가 집중된 경우를 의미하고, 기울기가 낮으면 결과 값의 분포가 넓게 분포된 경우로 신뢰도가 낮은 경우이다. 그리고 스케일파라미터는 63.2% 교점의 결과 값으로 누적확률분포를 의미한 것이다. 또한 B10 수명의 파라미터는 누적확률분포의 최하위 10% 지점의 교점 값을 의미한 것으로, 이는 형상파라미터와 B10의 결과와는 밀접한 관계로, 기울기가 낮으면 B10 수명은 더욱더 낮은 결과를, 반대로 기울기가 높으면 B10 수명의 결과는 높은 결과를 나타내게 된다. 이는 절연물의 경우 약점파괴로 이행하기 때문에 대부분 절연성능이 좋다고 하지만 결정적인 결함에 의하여 절연파괴 되는 것처럼 하위 10% 누적확률의 의미를 갖게 된 것이다.

그림 6~7에서는 μS_1(μ Silica_1)의 입도분석에서 비표면적이 0.709m²/g, 입자의 분포는 1~35μm, 평균입자 크기는 10.72μm을 갖는 구형상의 실리카와 μA_1(μAlumina_1)는 비표면적이

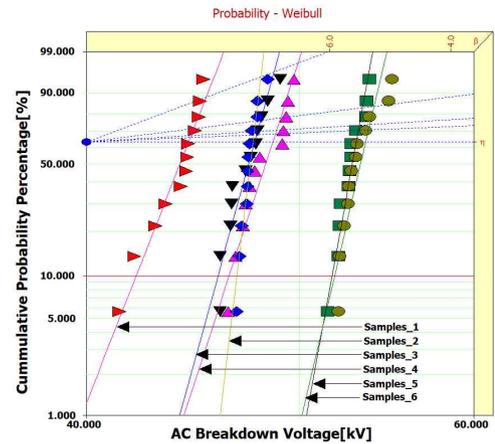


그림 6 Epoxy/μS_1:μA 혼합 콤포지트의 전기적 절연파괴강도의 와이블플롯

Fig. 6 Weibull plot of electrical insulation breakdown strength of Epoxy/μS_1: μA_1 mixed composites

표 6 그림 6 와이블플롯의 특성 값

Table 6 Properties values of the weibull plot of Fig 6

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [kV]	B10
Samples_1(0:0)	41.07	44.50	42.14
Samples_2(1:9)	134.43	47.62	46.81
Samples_3(3:7)	58.62	47.70	45.46
Samples_4(5:5)	49.53	48.60	46.46
Samples_5(7:3)	88.23	53.06	51.72
Samples_6(9:1)	68.93	53.59	51.88

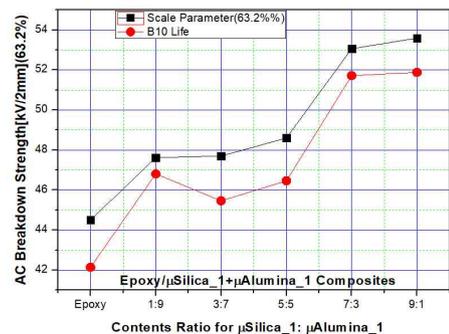


그림 7 그림 6의 충전함량비에 대한 와이블플롯 특성값

Fig. 7 Weibull plot characteristic values for the fill ratio of Figure 6

1.02m²/g, 입자의 분포는 0.35~90μm, 평균입자크기는 16.95μm을 갖는 irregular shape을 갖는 마이크로 알루미늄입자, 두 종류의 무기물 μSilica : μAlumina의 충전함량비 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1로 혼합한 콤포지트의 교류 절연파괴강도를 측정하였다. 표 6에서 6가지 종류의 측정결과 형상파라미터 기울기가 매우 높은 결과를

나타내었다. 그리고 그림 7에서는 스케일파라미터(63.2%)와 B10 수명에 대한, 충전함량비 1 : 9, 3 : 7, 5 : 5, 7 : 3, 9 : 1의 결과를 나타내었고, 그 결과 μSilica_1 함량이 증가할 때, 역으로 $\mu\text{Alumina}_1$ 의 함량이 감소할 때 절연파괴 결과는 증가하였다.

성능 향상을 볼 때, 원형 ER을 기준으로 충전함량비 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1의 경우 7.01, 7.19, 9.21, 19.23, 20.42%의 절연성능의 향상을 가져왔다. μS_1 의 충전함량이 증가할수록 이종무기물 혼합 콤포지트의 교류절연파괴 강도의 향상을 가져왔다. 그리고 μS 의 과량충진시(9:1)과 μA 의 과량 충전시(1:9)의 경우, 절연성능을 비교하며 볼 때, μS 의 과량 충전시 12.53% 절연파괴 성능이 향상된 결과를 나타내었다.

이유는 μS 의 표면은 OH기가 존재하고, ER의 경우 OH기가 존재 함으로 수소결합(공유결합)과 같은 강한 계면의 결합력을 갖고 있다. 반대로 μA 는 표면에 OH기를 갖고 있지 못하다. 그런 이유로 에폭시수지와 μA 사이 계면이 약한 결합력을 갖게 된다. 이와 같은 이종의 무기물이 혼합될 때, μS 의 비중은 작고 반대로 μA 의 비중은 상대적으로 크기 때문에 입자의 수가 많은 차이를 가져온다. 비표면적이 μA 입자들이 작지만 상대적으로 μS 의 입자 수가 많기 때문에 계면이 클 수가 있다. 그리고 입자의 입도분석의 경우 평균입자의 크기가 μS 의 경우 작고 많은 양의 입자들이 충전되게 된다. 또한 수지와 μS 무기물과의 계면의 결합력이 양호하다. 그러나 μA 의 경우 계면의 결합이 불량하여 절연파괴시 전자의 이동경로로 작용할 수가 있다. 상대적으로 μS 가 많으면 계면이 강하여 계면을 타고 전자의 이동을 억제하게 된다. 그런 이유로 μS 의 충전함량비가 높을 때 절연파괴 강도가 높아지는 것으로 사료된다. 또한 나노와 마이크로가 혼합될 때, 절연파괴 강도가 향상되는 경우는 조직의 치밀함과 나노입자의 비표면적이 매우커서 계면의 결합력이 양호한 결과와 유사한 경향으로 사료된다[8,10,11].

3.2.2 Epoxy/ $\mu\text{S}_2+\mu\text{A}_1$ 의 혼합비에 따른 전기적 절연파괴

그림 8, 표 7에서는 μSilica_2 비표면적이 $0.87\text{m}^2/\text{g}$, 입자분포는 $1\sim 70\mu\text{m}$, 평균입자크기 $11.53\mu\text{m}$ 을 갖는 irregular shape을 갖는 μSilica_2 와 $\mu\text{A}_1(\mu\text{Alumina}_1)$ 는 비표면적이 $1.02\text{m}^2/\text{g}$, 입자의 분포는 $0.35\sim 90\mu\text{m}$, 평균입자크기는 $16.95\mu\text{m}$ 을 갖는 irregular shape을 갖는 마이크로 알루미늄입자이다. 두 종류의 이종 무기물을 혼합한 콤포지트, 교류 절연파괴강도 측정결과를 나타내었다.

μSilica_2 와 $\mu\text{Alumina}_1$ 의 혼합 충전함량비 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1에 대한 μSilica 충전 함량비가 증가할수록 절연파괴강도는 증가하였다. 이종무기물의 충전 함량비에 따른 성능향상은, 원형 ER을 기준으로 할 때, 6.4, 10.5, 9.3, 20.85, 21.88%의 절연파괴강도 성능이 향상되었다.

이유는 μSilica 의 비중과 $\mu\text{Alumina}$ 비중관계를 볼 때, 같은 중량비에서는 μS 입자의 충전입자 수가 상대적으로 많아 입자간 거리를 감소시킬 수 있다. 입자간 거리가 감소하면 입자간 상호 작용하는 힘이 강하게 된다. 더불어 μSilica 는 나노에 비하여 높은 비표면적을 갖고 있지 못하다. 그러나 에폭시 수지와 수소결

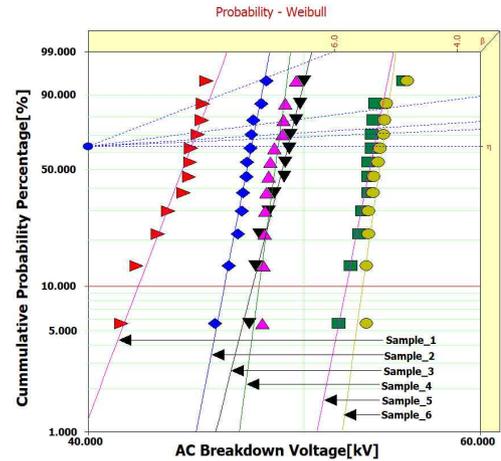


그림 8 Epoxy/ $\mu\text{S}_2+\mu\text{A}_1$ 혼합 콤포지트의 전기적 절연파괴강도의 와이블플롯

Fig. 8 Weibull plot of electrical insulation breakdown strength of Epoxy/ $\mu\text{S}_2 : \mu\text{A}_1$ mixed composites

표 7 그림 8 와이블플롯의 특성 값

Table 7 Properties values of the weibull plot of Fig 8

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [kV]	B10
Samples_1(0:0)	41.07	44.50	42.14
Samples_2(1:9)	80.22	47.36	46.05
Samples_3(3:7)	61.60	49.18	47.41
Samples_4(5:5)	115.21	48.67	47.72
Samples_5(7:3)	77.48	53.78	52.23
Samples_6(9:1)	109.77	54.24	53.13

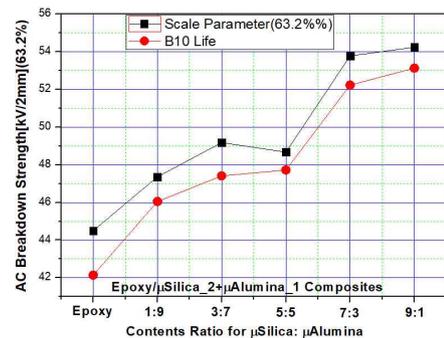


그림 9 그림 8의 충전함량비에 대한 와이블플롯 특성값

Fig. 9 Weibull plot characteristic values for the fill ratio of Figure 8

합을 하는 단일층 구조로 μS 표면의 OH기와 에폭시 내 존재하는 OH기의 결합인 화학적인 수소결합(공유결합)층이 단단하게 결합되어질 수가 있다. 이와같이 μS 입자가 많으면 많을수록 전체적인 결합의 분포가 넓게 이루어질 수 있다.그 결과 전자의 이동을 억제하는 역할로 작용하게 된다.

그러나 그 사이에 μ Alumina가 존재할 때 그들의 경우는 물리적인 결합으로 극히 미약한 상태로 존재하기 때문에 μ Alumina가 과량으로 혼입될 때면, 이물질이 혼입된 것과 같은 계면의 약화로 작용할 수 있다고 사료된다. 그 결과 μ S+ μ A 혼합 콤포지트에서 μ A의 계면으로 전자의 이동통로서 역할을 할 수 있다. 그런 이유로 μ A의 과량 충전시(1:9)와 μ S과량충진시 (9:1)의 경우 절연파괴강도의 차이는 14.5% μ S의 충전함량이 과량충진될 때 크게 향상된 결과를 얻게 되었다.

3.2.3 Epoxy/ μ S_1+ μ A_2의 혼합비에 따른 전기적 절연파괴

그림 10~그림 11, 표 8에서는 μ S_1 (μ Silica_2)의 입도분석에서 비표면적이 0.709m²/g, 입자의 분포는 1~35 μ m, 평균입자크기는 10.72 μ m을 갖는 구형상의 실리카와 μ A_2(μ Alumina_2)는 비표면적이 1.1m²/g, 입자의 분포는 0.35~90, 평균입자크기는 13.49 μ m을 갖는 irregular shape을 갖는 마이크로 알루미늄입자

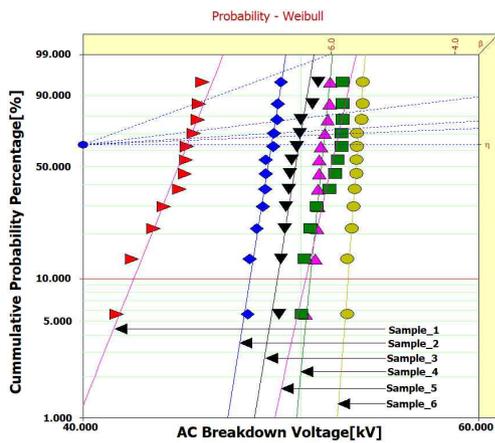


그림 10 Epoxy/ μ S_1+ μ A_2 혼합 콤포지트의 전기적 절연파괴강도의 와이블플롯

Fig. 10 Weibull plot of electrical insulation breakdown strength of Epoxy/ μ S_1+ μ A_2 mixed composites

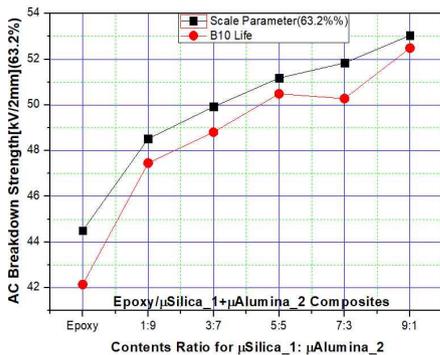


그림 11 그림 10의 충전함량비에 대한 와이블플롯 특성값

Fig. 11 Weibull plot characteristic values for the fill ratio of Figure 10

표 8 그림 10 와이블플롯의 특성 값

Table 8 Properties values of the weibull plot of Fig 10

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [kV]	B10
Samples_1(0:0)	41.07	44.50	42.14
Samples_2(1:9)	103.50	48.52	47.46
Samples_3(3:7)	100.34	49.92	48.81
Samples_4(5:5)	166.17	51.18	50.49
Samples_5(7:3)	72.93	51.84	50.28
Samples_6(9:1)	213.93	53.04	52.49

이다. 두 종류의 이종무기물을 혼합한 콤포지트, 교류 절연파괴강도 측정결과를 나타내었다.

μ Silica_1와 μ Alumina_2의 혼합 충전함량비 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1에 대한 μ Silica_1 충전 함량비가 증가할수록 절연파괴강도는 증가하였다. 이종무기물의 충전 함량비에 따른 성능향상은, 원형 ER을 기준으로 할 때, 9.03, 12.20, 15.01, 16.49, 19.19%의 절연파괴강도 성능이 향상되었다.

μ A의 과량 충전(1:9)과 μ S의 과량 충전(9:1) 경우를 비교하여 볼 때, μ S가 과량 충전된 경우 μ A과량 충전된 경우 비하여 9.31% 성능이 우수함을 알 수 있었다.

일반적으로, ER에 마이크로 필러를 주입하면 절연파괴전압이 낮아진다. 그러나 마이크로 충전제의 증가에 따라 합성물의 절연 파괴 전압은 고전적 관점과 반대되는 즉, 더욱더 높은 절연파괴 특성을 얻게 된 것이다[8]. 나노필러의 비표면적은 매우 크기 때문에, 더욱더 큰 입자크기를 갖는 경우와 비교하여 전기적 결합을 제거할 수 있는 강력한 결합력이 형성될 수 있다. 또한 나노 필러는 파괴전압을 향상시키고 그리고 개시전하의 이동을 억제시키는 단단한 구조를 형성한 고분자체인과 거대분자사이 강한 결합을 형성할 수 있다. 그렇지만, 마이크로 필러의 충전은 비교적 ER와 함께 손실의 결합을 형성할 수 있다. 반면에 마이크로필러와 ER사이 손실결합은 쉽게 개시전하를 통과시키고 그리고 개시전하를 이동시키는 것을 마이크로 필러 도입으로 결합을 보상할 수 없다. 오히려 많은 전하가 만들어지고 그리고 절연파괴 강도를 낮게 한다[8].

반면에 마이크로필러 자체에 의해 도입된 결합은 많은 개시전하를 도입하는 것과 같다. 더욱이 마이크로 필러와 ER사이 계면은 마이크로필러와 ER사이 전기적 결합조건을 열화시키는 전계 강도를 더욱더 높게 하고 그리고 기본적인 ER지의 절연파괴강도를 낮게 하는 개시전하를 더욱더 많이 생산하는 확률을 높게 된다. 마이크로 필러의 충전함량이 높으면 높을수록 마이크로필러와 ER사이 관계를 강하게 할 수 있고 그리고 절연파괴강도의 향상의 결과와 절연파괴 강도를 낮게 하는 결합을 제거 할 수 있다 사료된다.

3.2.4 Epoxy/ μ S_2: μ A_2의 혼합비에 따른 전기적 절연파괴

그림 12~13, 표 9에서는 μ Silica_2 비표면적이 0.87m²/g, 입자 분포는 1~70 μ m, 평균입자크기 11.53 μ m을 갖는 irregular shape

을 갖는 μSilica_2 와 μA_2 ($\mu\text{Alumina}_2$)는 비표면적이 1.1 m^2/g , 입자의 분포는 0.35~90, 평균입자크기는 13.49 μm 을 갖는 irregular shape을 갖는 마이크로 알루미늄입자이다. 두 종류의 이종무기물을 혼합한 콤포지트, 교류 절연파괴강도 측정결과를

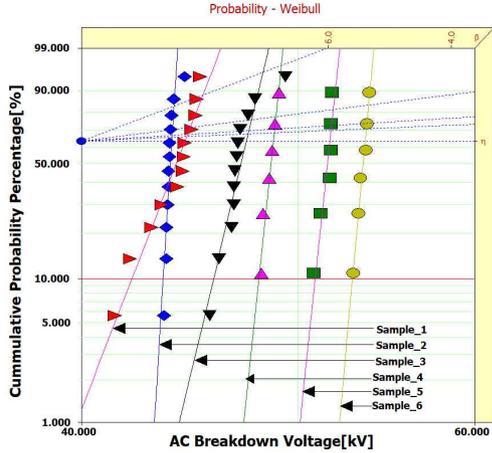


그림 12 Epoxy/ μS_2 + μA_2 혼합 콤포지트의 전기적 절연파괴강도의 와이블플롯

Fig. 12 Weibull plot of electrical insulation breakdown strength of Epoxy/ μS_2 + μA_2 mixed composites

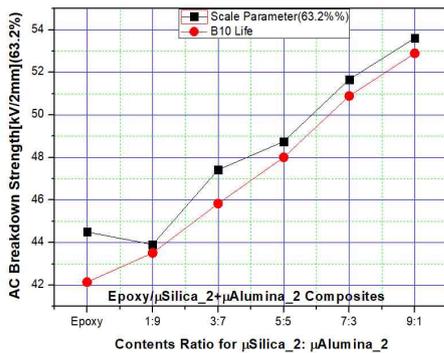


그림 13 그림 12의 충전함량비에 대한 와이블플롯 특성값

Fig. 13 Weibull plot characteristic values for the fill ratio of Figure 12

표 9 그림 12 와이블플롯의 특성 값

Table 9 Properties values of the weibull plot of Fig 12

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [kV]	B10
Samples_1(0:0)	41.07	44.50	42.14
Samples_2(1:9)	252.45	43.91	43.51
Samples_3(3:7)	66.32	47.42	45.83
Samples_4(5:5)	151.93	48.75	48.01
Samples_5(7:3)	149.77	51.67	50.89
Samples_6(9:1)	171.14	53.61	52.90

나타내었다.

μSilica_2 와 $\mu\text{Alumina}_2$ 의 혼합 충전함량비 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1에 대한 μSilica_2 충전 함량비가 증가할수록 절연파괴강도는 증가하였다. 이종무기물의 충전 함량비에 따른 성능향상은, 원형 ER을 기준으로 할 때, -1.32, 6.56, 9.55, 16.11, 20.47%의 절연파괴강도 성능이 향상되었다. 결과를 토대로 볼 때, μA 충전함량비가 가장 큰 1:9의 경우 원형 ER수지에 비하여 오히려 감소되는 결과를 나타내었다. 그러나 μS_2 의 충전함량비가 최대로 충전된 1:9의 경우와 비교 하면 22.09% μS_2 과량 충전시 절연 파괴 강도가 크게 향상되었다.

나노알루미나와 마이크로알루미나가 혼합된 절연시스템 구조에서, 절연파괴 강도가 증가하게 된다. 이유는 인가된 가속전계에 의하여 전자들로부터 에너지를 포획하고 그리고 분산시키는 역할을 하기 때문에 나노알루미나의 첨가에 기인하여 절연파괴 강도의 향상을 가져온다[12]. 그러므로, 나노입자의 충전함량이 높으면 높을수록 전자사태의 파괴 지연을 가져오게 된다[13]. 그러나 μA_2 의 충전함량이 과량인 상태 (1:9)의 경우 입자의 평균크기는 13.49 μm 로서 계면의 상태에 따라 절연파괴강도는 크게 다르게 된다. 과량의 μA_2 입자 충전으로, ER/ μA_2 콤포지트 계면과의 결합력이 매우 약한 상태이다. 그런 이유에서 상대적으로 μS_2 의 충전함량은 적고 과량 μA_2 충전으로 결함을 갖는 무기물을 혼합하는 경우와 같다. 그 결과 μA_2 의 입자와 수지사이 계면결합이 약하기 때문에 가속된 전계 하에서 전자의 에너지를 억제할 수 있는 경우가 없기 때문에 가장 쉽게 전자가 이동할 수 있는 통로인 계면으로 이동하여 절연파괴가 발생하는 것으로 사료된다. 그런 이유로 절연파괴강도가 낮게 되는 이유로 사료된다. 그러나 μS_2 가 고함량 충전될 때, 이와는 크게 다른 결과를 나타낸 것이다. 즉, μS_2 의 충전함량이 과량 충전된 (9:1)인 콤포지트 경우 22.09%의 절연파괴 강도가 향상되었다. 이유는 μA_2 의 충전함량비가 낮기 때문에 결함은 상대적으로 낮은 상태이며, μS_2 의 과량의 충전으로 계면이 강화된 분포가 매우 넓게 분포하여 가속된 전계 하에서 가속된 전자의 억제를 μS_2 가 역할을 하게 되어 절연파괴 강도가 향상된 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 GIS용 변전기에 사용된 친환경 절연소재를 개발하기 위하여, 이종무기물 4종류를 선정하였다. 2종류의 실리카(μSilica_1 , μSilica_2), 또 다른 2종류의 알루미늄($\mu\text{Alumina}_1$, $\mu\text{Alumina}_2$)를 4가지 이종무기물을 혼합하였으며, $\mu\text{Silica} : \mu\text{Alumina}$ 혼합비로서 5단계 즉, 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1의 조성된 비를 통하여 전체 20가지 ER/이종무기물 혼합 콤포지트를 제조하였다. 제조된 샘플을 이용하여 전기적 특성 중 교류절연파괴 강도를 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

$\mu\text{Silica} : \mu\text{Alumina}$ 이종무기물 충전 혼합비에 따른 절연파괴 특성으로, 충전혼합비 1:9, 3:7, 5:5, 7:3, 9:1 일 때 μSilica 의 충전 혼합비가 클수록 절연파괴강도는 증가하였고, 최대 충전혼합비 (9:1)에서 최대 절연파괴 강도를 나타내었다. 역으로 $\mu\text{Alumina}$ 의 충전 혼합비가 증가할수록 절연파괴강도는 감소하였

고, 최대 충전혼합비(1:9)에서는 최소절연과괴강도를 얻게 되었다. 이는 μ Silica는 비중이 μ Alumina에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 같은 중량비에서 입자수가 매우 많은 상태이다. 그리고 μ Silica은 표면에 OH가 존재하고 있어 ER과 수소결합(공유결합)을 통한 계면의 강화를 가져오게 된다. 그러나 μ Alumina은 입자표면에 OH와 같은 것이 존재하지 못하여 ER과 무기물과의 사이의 계면이 매우 취약한 상태이다. 그런 이유로 친환경 절연소재의 경우 단일한 μ Alumina만의 사용은 가격이 고가이며, SF₆환경에서 적용하지 못하였던 이유가 부식성이 매우 큰 불산(HF) 화합물이 생성되게 되어, 이로 인해서 실리카 표면의 부식성은 더 가속되게 되는 이유로 실리카를 사용하지 않았다. 그러나 절연가스 환경이 친환경적인 상태로 될 때 μ Silica와 μ Alumina 이중혼합된 절연물에 열전도의 신뢰성을 고려하면 향후 친환경 절연소재 개발에 크게 영향을 줄 것으로 사료 된다.

감사의 글

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

References

- [1] H. E. Nechmi, A. Beroual, A. Girodet, P. Vinson, "Fluoronitriles/CO₂ gas mixture as promising substitute to SF₆ for insulation in high voltage applications," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 23, Issue: 5, Pages: 2587-2593, 2016
- [2] K. Juhre and E. Kynast, "High pressure N₂, N₂/CO₂ and CO₂ gas insulation in comparison to SF₆ in GIS applications," *14th Int'l. Sympos. High Voltage Eng. (ISH), Beijing, China*, Paper C-01, 2005.
- [3] A. Hopf, M. Rossner, F. Berger and U. Prucker, "Dielectric strength of alternative insulation gases at high pressure in the homogeneous electric field," *IEEE Electr. Insul. Conf. (EIC), Seattle, USA*, pp. 131-136, 2015
- [4] L. Chen, P. Widger, C. Tateyama, A. Kumada, H. Griffiths, K. Hidaka and A. Haddad, "Breakdown Characteristics of CF₃I/CO₂ gas mixtures under fast impulse in rod-plane and GIS geometries," *19th Int'l. Sympos. High Voltage Eng., Pilsen, Czech Republic*, paper 547, 2015.
- [5] P. Simk and N. Ranjan, "Dielectric strength of C5 Perfluoroketone, 19th International Symposium on High Voltage Engineering," *Pilsen, Czech Republic*, 23-28 August, 2015.
- [6] J. D. Mantilla, N. Gariboldi, S. Grob and M. Claessens, "Investigation of the Insulation Performance of a New Gas Mixture with Extremely Low GWP," *IEEE Electr. Insul. Conf. (EIC), Philadelphia, Pennsylvania, USA*, pp. 469-473, 2014.
- [7] 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.
- [8] Wang Qi ; Li Zhe ; Wu Jiandong ; Yin Yi, "The thermal conductivity and electrical strength of epoxy resin with different filler content of micro and nano alumina", *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Pages: 1110~1113, 2012
- [9] Roman Kochetov, Thomas Andritsch, Peter H.F. Morshuis, Johan J. Smit, "Thermal and Electrical Behaviour of Epoxy-based Microcomposites Filled with Al₂O₃ and SiO₂ Particles", *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Pages: 1-5, 2010
- [10] Jae-Jun Park etal 3, "Preparation of Epoxy/Micro-and-Nano-Composites by Electric Field Dispersion Process and Its Mechanical and Electrical Properties", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18. No. 3 pp 667~674, 2011
- [11] 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
- [12] C. C. Ku and R. Liepins, "Electrical Properties of Polymers. New York: Hanser Publishers", 1987.
- [13] Z. Farhadinejad, M. Ehsani, S. Moemenbellah, S. M. B. Alavi, M. M. Saei-Shirazi, H. Borsi, "An Investigation of Thermal, Physical, and Electrical Properties and Morphological Behavior on Nanoepoxy Composite Insulation", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Volume: 11, Issue: 5, Pages: 957~963, 2012

저자 소개



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