

# 고점도형 고상에폭시/실리카와 알루미나 콤포지트의 전기적, 기계적 특성연구

## Study on Electrical and Mechanical Properties of High Viscosity Solid Epoxy / Silica and Alumina Composite

박재준\*  
(Jae-Jun Park)

**Abstract** - In this study, 40, 50, 60, and 70 wt% filler dispersed samples were prepared for the current GIS Spacer or environmentally friendly GIS. In the AC electrical breakdown, EMSC and EMAC decreased with increasing filler content, and EMSC showed better breakdown strength than EMAC. The mechanical properties such as tensile strength and flexural strength of EMSC and EMAC were also increased with increasing filler content. In addition, EMSC results in better mechanical properties than EMAC. The reason for this is considered to be one in which the influence of the interface is important.

**Key Words** : GIS Spacer, Environmentally friendly GIS, EMSC(Epoxy Micro Silica Composites), EMAC(Epoxy Micro Alumina Composites), Electrical insulation breakdown strength, Tensile strength, Flexural strength

### 1. 서론

에폭시수지(ER)는 일반적인 전기 절연 고분자로 고전압 물드 변압기, 케이블 접속제, 회전기 고정자권선 물드, 부상 그리고 GIS Spacer 등에 사용하고 있다[1]. 이와같이 전력기기의 절연물에 무기필러를 과량 사용하는 이유는 전기적, 기계적, 열적특성(열전도)을 향상시키고, 비용절감을 위해 개발되고 상업화되었다.

마이크로 필러의 첨가는 때로는 전기적 특성인 유전율이 증가되고, 절연파괴가 감소합니다[2]~[3]. 그러나 현재 산업계에서는 대부분 마이크로 필러인 알루미나 및 실리카를 사용하고 있다. 그리고 충전함량도 과량인 60~80wt%를 충전시켜 제조하기 때문에 경제성을 고려하여, 낮은 충전함량에서 전기적, 기계적 특성을 고찰할 목적으로 연구하였다.

최근 10여년 정도 에폭시/나노필러를 충전 분산처리된 콤포지트에대한 연구가 많이 진행되어져왔고 그리고 나노필러의 종류, 형상 그리고 나노입자와 수지사이 계면 상호작용[5]에 의존한다. 적용 분야에 따라 에폭시수지 단독으로 해결할 수 없는 특성을 원할 때, 성능을 보강하는 보편적인 방법으로 nanoclay, graphite nanofiber, carbon nanotube, cellulosic fiber, 그리고 nanoalumina를 에폭시수지에 분산시켜 유/무기 조합으로 사용하고 있다[4]~[7].

나노필러 자체만으로는 중전기에 적용하기 어려운 기계적 특성, 열적특성, 전기절연특면을 보완, 강화하고자 하는 연구가 다

시 최근에 마이크로 필러의 대체로서 나노 필러와 마이크로 필러의 조합에 대한 많은 연구가 발표되었습니다. 이는 표면 대 체적 비율이 크기 때문에 고분자수지에 나노 필러가 분산되어있어 많은 양의 계면이 형성됩니다. 이처럼 소량의 나노 필러를 첨가하고 그리고 종래의 마이크로필러를 혼합 충전시켜 연구한 결과, 유전율과 유전 손실 그리고 전기적 절연내력, 기계적 특성향상이 입증되었습니다 [8~12].

그러나 본 연구에서는 향후 GIS용 전력기기로서 SF<sub>6</sub> 절연가스의 사용이 전면 제한되고, 친환경 절연가스로 대체하여야 하는 실정에 있다. 현재까지 SF<sub>6</sub> 절연가스 하에서 알루미나의 충전제를 사용하는 이유가 절연가스와 화학적 반응없이 안정된 물질이기 때문에 사용되어져 왔다. SF<sub>6</sub>하에서 실리카를 사용하지 못한 이유도 SF<sub>6</sub>의 실리카 부식 메커니즘을 볼 때, SF<sub>6</sub> 화합물이 연속적으로 전자 충돌에 의해 분해되어 4개의 불소(F) 라디칼이 생성되어, 실리카(SiO<sub>2</sub>)를 공격하여 실리카 표면이 부식된다. 그리고 SF<sub>6</sub> 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<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, 압축공기 등)를 사용할 때, 현재의 알루미나의 가격이 고가이고 그리고 알루미나는 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 실리카의 사용을 위하여 그리고 원가절감 차원에서 과량의 필러를 반드시 충전해야만 하는지 향후 친환경 GIS용 절연소재 접목을 위해 충전함량 40, 50, 60, 70wt%에 대한 전기적, 기계적 특성 연구를 실시하였다.

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

E-mail:jjpark@joongbu.ac.kr

Received : July 30, 2018; Accepted : September 27, 2018

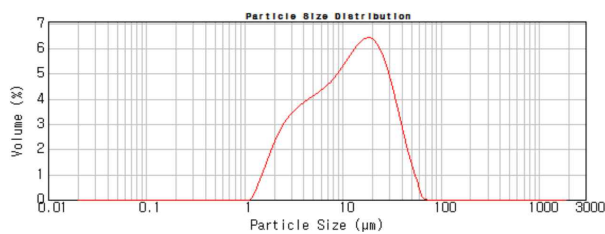
## 2. Experiment

### 2.1 재료

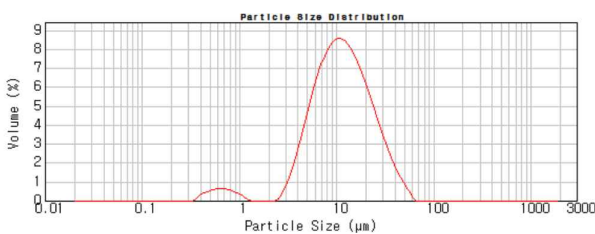
사용되는 에폭시 수지는 고체, 담황색 또는 황색 수지로서, 우수한 전기적 및 기계적 최종 특성을 갖는 주조 생산을 위한 고온 경화 주조 수지 시스템이다. 용도는 계기용변압기(instrument transformers), 스위칭기어(switchgear) 성분과 같은 높은 기계적, 열적 그리고 화학적 스트레스에 지배된 장치의 구조적 부분과 같은 고전압 중전기의 옥내용 절연물로 이용하는 수지이다. 점도는 120°C에서 650~850 (mPa s) [DIN 53019]이며, 에폭시 함량은 2.55~2.70 (equiv./kg) [ISO 3001], 밀도 25°C에서 1.15~1.25 g/cm<sup>3</sup> [ISO 1675]인 에폭시 수지이다. 경화제는 HT 903-1로서, 녹은점 범위는 79~83°C이며, 밀도는 130°C에서 1.22~1.25g/cm<sup>3</sup> [ISO 1675], 실온에서 무취의 고체인 카르복실 산무수물계 경화제이다. 형상은 백색파우더 형태이다.

본 연구에서는 두 종류의 필러 즉, 마이크로 실리카와 마이크로 알루미나를 사용하였다. 마이크로 실리카 입자의 비표면적(specific surface area)은 0.709m<sup>2</sup>/g, 표면가중평균(surface weighted mean)은 8.462 $\mu$ m, 체적가중평균(volume weighted mean)은 11.792 $\mu$ m 그리고 입자크기의 범위는 입도분석을 통하여 1~35 $\mu$ m 크기를 갖으며, 중앙부분의 평균 입자크기는 10.721 $\mu$ m을 갖는 마이크로 실리카를 사용하였다. 입도분석 결과는 그림 1(a)에서 나타내었다.

마이크로 알루미나의 형상은 구상으로 입자의 비표면적(specific surface area)은 0.937m<sup>2</sup>/g, 표면가중평균(surface weighted mean)은 6.405 $\mu$ m, 체적가중평균(volume weighted mean)은 13.98 $\mu$ m 그리고 입자크기의 범위는 입도분석을 통하여 0.35~70 $\mu$ m 크기를 갖으며, 중앙부분의 평균 입자크기는 11.199 $\mu$ m을 갖는 마이크로 알루미나를 사용하였다. 마이크로알루미나의 입도분석 결과는 그림 1(b)에서 나타내었다.



(a) particle size analysis of silica



(b) particle size analysis of alumina

그림 1 실리카와 알루미나의 입자분석

Fig. 1 Particle analysis of silica and alumina

### 2.2 샘플제조

고상의 에폭시수지와 경화제를 80°C 오븐에서 액체상태로 유지하여, 24시간 동안 마이크로실리카와 알루미나를 수지에 담아 충분히 무기물에 수지가 젖을 수 있도록 하였다. 진공시스템을 갖춘 교반장치를 이용하여 600rpm으로 6시간 동안 교반 후 진공탈포 시스템을 이용하여 기포를 제거하였고 그리고 금형에 붓고 다시 일정시간 탈포처리를 실시하였다. 경화조건은 140°C×16시간 동안 경화 후, 오븐상태에서 자연냉각을 실시하였다. 제조된 샘플은 진공데시케이터에 보관 후 필요에 따라 샘플로 사용하였다.

### 2.3 전기적 절연파괴 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 2 mm로 동일하게 적용하였다. 절연 파괴 실험은 고전압(High Voltage)을 발생시키는 전극을 시편과 함께 상온의 절연유 속에서 수행하였다. 시험 시편의 규격은 100mm×100mm×2mm를 사용하였다.

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

### 2.4 기계적 인장강도 및 굴곡강도 측정

인장특성은 기계적 특성 중에서 가장 대표적인 것 중 하나이며, 시험방법은 JIS B7502 규정에 의하여 실험하였다. 본 연구에서 시편의 형상은 JIS B7502에 따라 제조하였다. 인장강도 측정에 사용된 시험 장치는 만능시험기(SHM-C-500, Shamhan Tech)를 이용하였으며, 측정은 시편의 양단을 붙잡고 cross-head speed가 10 mm/min의 일정한 속도로 인장하중을 가하는 시험기를 이용하여 수행하였다. 또한 굴곡강도의 경우 인장강도와 동일한 속도로 3중 점 휨강도 실험법으로 측정하였고, 측정된 모든 기계적 인장 및 굴곡강도 데이터 값은 전기적 절연파괴와 같이 이해하기 쉽게 와이블 플롯을 이용하여 나타내었고 3가지 특성파라미터의 결과를 근거로 해석하였다.

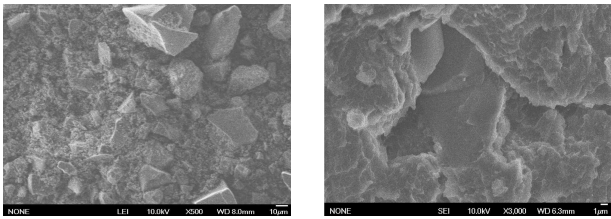
### ■ 용어 정리

Abbreviation	Original Language
MS	Micro Silica
MA	Micro Alumina
EMS	Epoxy Micro Silica
EMA	Epoxy Micro Alumina
EMSC	Epoxy Micro Silica Composites
EMAC	Epoxy Micro Alumina Composites

### 3. 결과 및 검토고찰

#### 3.1 구조적 특성

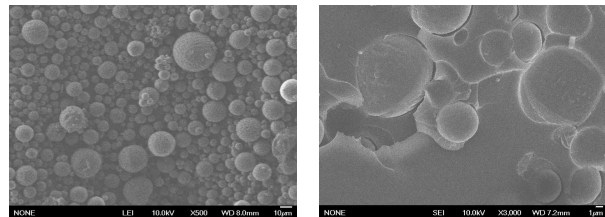
그림 2와 그림 3에서는 MS와 MA 입자의 형상을 그림 2(a), 3(a)에서 나타내었다. 그리고 그림 2(b), 3(b)에서는 에폭시/MS\_60wt%, 에폭시/MA\_60wt% 콤포지트 파단면의 SEM영상을 나타내었다. EMSC\_60wt% SEM영상에서 랜덤형상의 MS입자와 에폭시 수지와와의 계면이 양호한 상태를 나타내었다. 그러나 EMAC\_60wt% 콤포지트 파단면의 SEM영상에서 보여준 바치럽 구상의 MA입자와 에폭시수지와와의 계면이 불량한 상태를 보여주고 있다. 무기물과 에폭시수지와와의 계면결합력이 낮거나 계면이 불량한 경우, 절연파괴 및 기계적 인장과 굴곡강도에 영향을 주어지게 된다. 전기적인 절연파괴 경우 계면이 불량하면 전자의 이동경로 이루어지게 되며, 기계적 인장 및 굴곡강도의 실험에서 결합의 시작점이 되어 특성에 크게 영향을 주어지게 된다.



(a) 입자 형상(랜덤형상) (b) EMSC(60wt%) SEM\_3000배

그림 2 에폭시/랜덤형상 실리카 마이크로 콤포지트 SEM

Fig. 2 Epoxy / random shaped silica microcomposite SEM



(a) 입자 형상(구상) (b) EMAC(60wt%) SEM\_3000배

그림 3 에폭시/구상 알루미나 마이크로 콤포지트 SEM

Fig. 3 Epoxy / spherical alumina microcomposite SEM

#### 3.2 전기적 특성

##### 3.2.1 EMSC 총진함량에따른 전기적 절연강도

그림 4와 표 1에서는 에폭시 수지에 MS 총진함량 40, 50, 60, 70wt% 총진된 콤포지트의 교류 전기적 절연파괴 강도의 결과를 와이불플롯으로 나타내었고 그리고 그 결과에 대한 특성파라미터를 표 1에서 나타내었다.

와이불 플롯의 3가지 특성파라미터로서 형상파라미터는 기울기를 의미하는 것으로, 측정결과 자료의 균질성을 나타낸 파라미

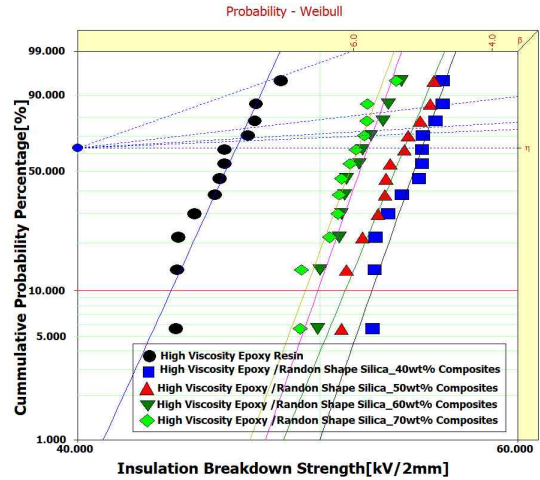


그림 4 EMSC 총진함량에따른 전기적 절연파괴강도

Fig. 4 Electrical Insulation Breakdown Strength According to EMSC Content

표 1 Fig. 4의 와이불 플롯의 특성파라미터

Table 1 Characteristics of the Weibull Plot in Fig. 4

Types of samples	Shape parameter	Scale parameter [kV/2mm]	B10 [kV/2mm]
High viscosity epoxy resin	37.54	46.29	43.59
EMSC_40wt%	48.90	54.93	52.46
EMSC_50wt%	41.25	54.05	51.17
EMSC_60wt%	48.78	52.26	49.91
EMSC_70wt%	46.09	51.80	49.35

터이다. 기울기가 낮으면, 균질성이 낮고 반대로 기울기가 크면 균질성이 큰 결과를 의미하는 것이다. 형상파라미터 결과와 B10 수명과는 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 기울기가 낮으면, B10 수명의 경우 누적확률(%) 최하위 10%교점의 값을 의미하는 바로서, 그 결과 값이 낮게 나타나게 된다. 균질성이 낮으면 고전압 기반 전력설비에서는 약점파괴가 일어나기 때문에 취약한 부분으로 절연파괴가 발생되어 전력기기의 불능을 가져오게 된다. 아무리 90%가 훌륭한 절연을 갖고 있다 할지라도 10%정도가 취약한 경우라면 쉽게 전력기기는 위험에 노출된 결과를 가져오게 된다. 또한 스케일파라미터는 63.2%교점의 절연파괴 결과를 의미하는 것이다.

그림 4의 실험결과에서 볼 수 있듯이, 원형에폭시 수지의 절연 파괴강도의 스케일파라미터는 46.29kV/2mm를 나타내었고, 에폭시수지에 MS의 총진함량 40, 50, 60, 70wt% 함량이 증가할수록 절연파괴 강도는 감소하였다. 원형에폭시 수지에 대한 총진함량 별 EMSC의 절연성능을 비교하여 볼 때 40wt%에서 18.66%, 50wt%에서는 16.76%, 60wt%에서는 12.89% 그리고 70wt%에서는 11.9%의 절연파괴 성능이 향상되었다. 그리고 형상파라미터의

경우 매우 높은 기율기를 얻게 되었고 그 결과에 대한 신뢰도는 매우 높은 결과를 의미한 것이다. 또한 B10 수명의 결과도 매우 높은 특성을 나타내어 스케일파라미터와 거의 근사한 결과를 나타내었다.

충진함량별 EMSC 절연파괴결과에서 MS의 형상은 랜덤형태이지만 충진함량이 증가할수록 절연파괴 강도는 대체로 감소하는 결과를 나타내었다. 그러나 전체 충진함량에 대해서는 전반적으로 우수한 절연파괴 강도의 결과를 얻게 되었다.

### 3.2.2 EMAC 충진함량에 따른 전기적 절연강도

그림 5와 표 2에서는 에폭시 수지에 구상의 MA를 충진함량별 40, 50, 60, 70wt% 충진시켜 제조된 콤포지트의 절연파괴 강도의 측정결과를 와이بل 플롯으로 나타내었다. 원형에폭시 수지의 절연파괴강도 스케일파라미터는 46.29kV/2mm를 나타내었고, EMAC 함량별 결과를 원형 에폭시수지와 비교하여 보면 다음과 같다. 40wt%에서는 7.7%, 50wt%에서는 3.2%, 60wt%에서는 -0.45%, 70wt%에서는 0.5%로서 다소 미약한 절연파괴 강도의 성능향상과 감소를 나타내었다.

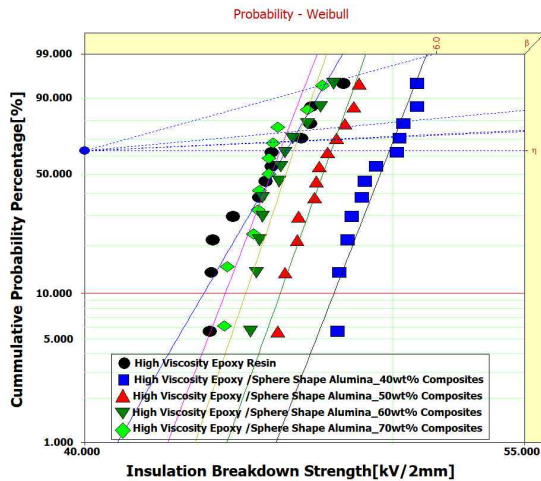


그림 5 EMAC 충진함량에 따른 전기적 절연파괴 강도

Fig. 5 Electrical Insulation Breakdown Strength According to EMAC Content

표 2 Fig. 5의 와이블 플롯의 특성파라미터

Table 2 Characteristics of the Weibull Plot in Fig. 5

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [kV]	B10
High Viscosity Epoxy Resin	37.54	46.29	43.59
EMAC_40wt%	56.03	49.87	47.92
EMAC_50wt%	60.88	47.81	46.09
EMAC_60wt%	56.57	46.08	44.95
EMAC_70wt%	64.30	46.54	44.28

이처럼, 에폭시 수지에 MA가 충진된 EMAC콤포지트의 절연파괴강도의 결과 역시 EMSC의 경우처럼 충진함량이 증가할수록 감소되는 결과를 얻게 되었다. 그러나 절연파괴강도의 성능 면에서 매우 큰 차이를 나타내고 있다.

이상의 결과로서 에폭시수지에 MS와 MA가 일정한 비율의 충진함량 즉, 40, 50, 60, 70wt%로 증가할 때,

첫째로, MS, MA의 충진함량이 증가할수록 절연파괴 강도가 낮아지는 이유

둘째로, MS는 충진함량이 증가할수록 낮은 전기적 절연파괴 결과를 나타내었지만 대체로 절연성능이 매우 크게 낮아진 결과가 아니었다. 그러나 MA의 경우는 MS와는 전혀 다른 전기적 절연파괴성능의 저하가 매우 큰 결과로 나타난 것이다.

이와같은 원인은 다음과 같다.

MS의 형상은 랜덤이지만, 표면에는 OH기가 존재하게 된다. 또한 에폭시수지에서도 OH가 존재하게 되므로 유기물인 에폭시와 무기물인 MS사이 계면의 결합력이 수소결합(공유결합)으로 인하여 계면의 강화를 가져오게 되는 것으로 사료된다. 유/무기 복합체에서는 계면이 매우 중요한 부분으로 절연성능에 큰 영향을 주어진다는 점, 고전압이 인가되어 복합절연물의 두께는 2mm로 일정하게 유지되었고, 절연유 내에 담겨진 상태로 초당 1kV/s의 승압이 이루어질 때, 에폭시 수지에 MS, MA 입자의 혼합은 불순물을 주입하는 것과 같다. 그리고 교번적으로 고전압이 인가되어 승압될 때, 전자에게 강력한 에너지를 주입하게 되는 결과이다. 이러한 큰 에너지를 갖는 전자가 순수한 에폭시수지와 무기물과의 계면에 충돌할 때 계면이 강하게 결합된 상태라면 순수한 에폭시수지로 충돌하여 에폭시의 가교밀도가 낮은 곳으로 이동하게 될 수 있다. 그러나 무기물로 전자는 통과하지 못하기 때문에 원형 수지 쪽으로 절연파괴가 일어나게 된다. 이처럼 계면이 약하면 전자의 충돌로 인하여 쉽게 이동경로가 형성되어지게 된다. 그러나 MA의 경우 입자 표면에는 OH기가 존재하지 않기 때문에 대체로 계면에 매우 취약한 상태이다. 그런 이유로 EMAC의 경우 절연파괴강도가 원형에폭시수지와 거의 같은 수준의 결과를 얻게 된 것이다.

그에 대한 결과는 그림 2와 그림 3에서 보여주듯이 EMSC\_60wt%와 EMAC\_60wt%의 3000배 배율로 측정된 SEM영상에서 볼 수 있듯이, MA의 경우는 구상이지만 계면이 매우 불량한 상태를 알 수가 있고 이와는 반대로 MS의 계면은 매우 양호한 상태를 볼 수 있다.

또한 MS와 MA 입자의 비중의 차이를 볼 수가 있다. MS의 경우 비중은 일반적으로 경우에 차이는 존재하지만 약 0.15~0.2 정도를 나타내며, MA의 경우도 여러 가지 상에 따라 차이는 존재하지만 일반적으로 3.12~3.96 정도를 갖는다. 같은 충진함량 일지라도 MS와 MA의 경우 비중차이는 19.8~21.4배의 차이를 나타내고 있다. 이처럼 입자수가 MS의 경우 MA에 비하여 상대적으로 많은 수가 수지내로 혼합됨을 알 수가 있다. 입자수가 많으면 많을수록 분산의 경우 어려움이 있겠지만 균질분산이 이루어지면 입자수가 많은 실리카의 경우 전자의 이동을 억제하는 효과가 크게 될 수가 있다[13], 반면 알루미늄의 경우 상대적으로 입자수가 적게 혼합되어 절연내력에 큰 영향을 주지 못한 결과를 초래



한 것으로 사료된다.

나노입자의 특징은 비중이 매우 작고 비표면적이 매우 크기 때문에 같은 중량에 대해서 입자수가 많기 때문에 적은 양의 혼입으로 큰 절연의 효과를 가져 올 수가 있는 것이다. 그러나 균질한 분산 즉, 뭉침 현상이 존재하면 오히려 절연의 효과는 미약하게 된다[14]. 마이크로실리카와 나노실리카의 혼합은 저항율의 향상과 절연파괴강도를 개선하는 큰 효과를 얻을 수 있다[11~12].

### 3.3 기계적 특성

#### 3.2.1 인장강도

##### 3.2.1.1 EMSC 충전함량에따른 인장강도 특성

그림 6과 표 3에서는 에폭시 수지에 랜덤형상을 갖는 MS 충전함량별 40, 50, 60, 70wt% 기계적 인장강도의 평가결과 와이블 플롯으로 나타내었다. 그리고 표 3에서는 와이블플롯의 특성 파라미터의 결과를 나타낸 것이다. 원형에폭시수지 인장강도의 스케일파라미터의 결과는 71.83MPa를 나타내었고 그리고 원형에폭

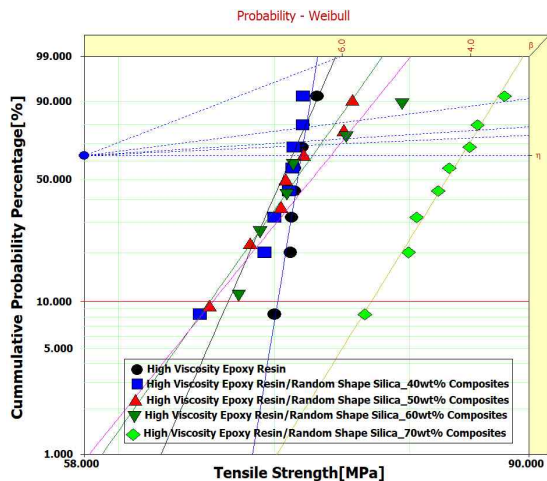


그림 6 EMSC 충전함량에따른 인장강도 특성

Fig. 6 Tensile strength characteristics according to EMSC contents

표 3 Fig. 6의 와이블 플롯의 특성파라미터

Table 3 Characteristics of the Weibull Plot in Fig. 6

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [MPa]	B10 [MPa]
High Viscosity Epoxy Resin	95.69	71.88	70.20
EMSC_40wt%	35.49	71.23	66.86
EMSC_50wt%	22.11	72.68	65.64
EMSC_60wt%	19.28	73.99	65.83
EMSC_70wt%	25.18	84.20	76.98

시수지를 기준으로 EMSC 충전함량별 기계적 특성결과를 비교한 결과로서, 40wt%에서는 -0.9%, 50wt%에서는 1.1%, 60wt%에서는 2.93% 그리고 70wt%에서는 17.13%의 원형에폭시수지의 인장강도에 비하여 EMSC의 경우 충전함량이 증가할수록 기계적 인장강도 성능이 향상되었다. MS 충전함량이 증가할수록 40~60wt%에서는 소폭 성능향상을 나타내었지만 과도한 충전함량의 경우(70wt%) 17.13%로서 매우 높은 기계적 인장강도의 특성이 향상된 결과를 얻게 되었다.

##### 3.2.1.2 EMAC 충전함량에따른 인장강도 특성

그림 7과 표 4에서는 에폭시수지에 MA 충전함량별 40, 50, 60, 70wt%에 대한 기계적 인장강도 결과를 와이블플롯으로 나타내었다. 원형 에폭시수지의 인장강도 스케일파라미터의 결과는 71.88MPa로서, MA 충전함량별 EMAC의 인장강도 스케일파라미터와의 경우와 비교한 결과, 40wt%에서는 -25.27%, 50wt%에서는 -64.84%, 60wt%에서는 -22.98% 그리고 70wt%에서는 -19.11%로 MA 충전함량이 증가할수록 기계적 인장강도의 성능이 약간은 증가하는 결과를 얻었다. 반대로 MA의 충전함량이 작

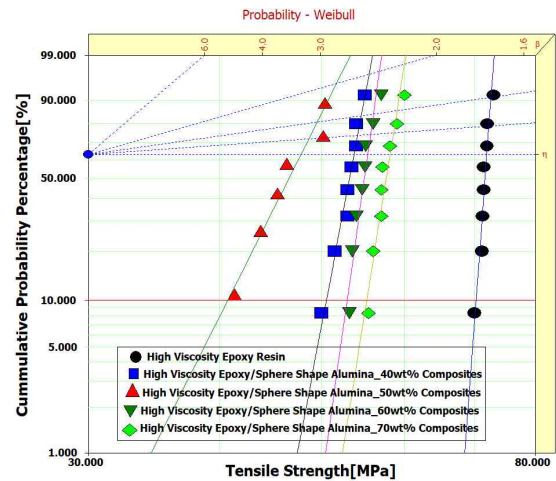


그림 7 EMAC 충전함량에 따른 인장강도 특성

Fig. 7 Tensile strength characteristics according to EMAC contents

표 4 Fig. 7의 와이블 플롯의 특성파라미터

Table 4 Characteristics of the Weibull Plot in Fig. 7

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [MPa]	B10 [MPa]
High Viscosity Epoxy Resin	95.69	71.88	70.18
EMAC_40wt%	37.16	53.71	50.58
EMAC_50wt%	14.00	47.81	40.74
EMAC_60wt%	49.74	55.36	52.88
EMAC_70wt%	43.98	58.14	55.20

을수록 인장강도는 낮은 결과이다. 그러나 형상과라미터의 경우 50wt%에서는 전체적인 경우에 비하여 낮은 기울기를 갖고 있으며, 이는 특정함량에만 국한되어 나쁜 결과는 아닐 것으로 사료되며, 제조공정과정의 문제점일 것으로 사료된다.

### 3.2.2 굴곡강도

#### 3.2.2.1 EMSC 충전함량에따른 굴곡강도 특성

그림 8과 표 5에서는 에폭시수지에 충전 함량별 40, 50, 60, 70wt% MS 콤포지트의 굴곡강도 측정결과를 와이블 플롯으로 나타낸 것이다. 원형에폭시 수지의 휨강도(굴곡강도)의 스케일파라미터는 126.62MPa를 나타내었다. 휨강도의 경우, 원형에폭시수지는 유연성이 다소존재하기 때문에 파단 되지 않고 임계점을 넘어서는 경우가 존재하게 된다. 그런 이유로 파단 되는 기계적 굴곡강도의 결과 전적으로 확신할 수는 없다. 그러나 비교의 척도로 원형에폭시수지에 대한 MS 충전함량별 EMSC와의 기계적 성능을 비교 평가하여볼 때, 40wt% 충전 시의 경우 -18.05%, 50wt% 충전 시의 경우 -15.76%, 60wt% 충전 시의 경우 +9.36% 그리고 70wt%의 경우 +12.26% 로서, 원형에폭시수지에

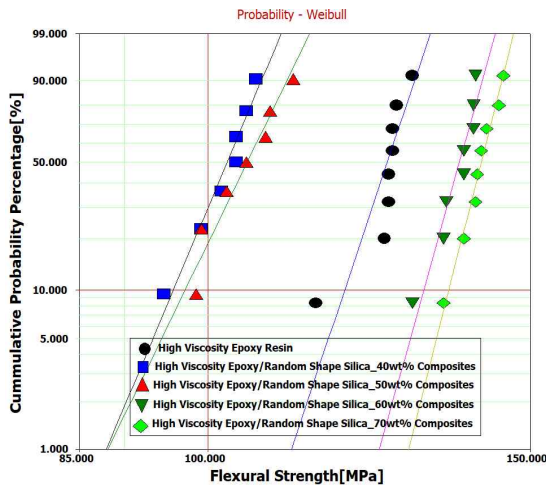


그림 8 EMSC 충전함량에 따른 굴곡강도 특성  
 Fig. 8 Flexural strength characteristics according to EMSC contents

표 5 Fig. 8의 와이블 플롯의 특성파라미터  
 Table 5 Characteristics of the Weibull Plot in Fig. 8

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [MPa]	B10 [MPa]
High Viscosity Epoxy Resin	35.10	126.62	118.77
EMSC_40wt%	27.87	103.76	95.77
EMSC_50wt%	24.15	106.66	97.18
EMSC_60wt%	42.04	138.41	131.16
EMSC_70wt%	46.24	142.15	135.44

비하여 충전함량이 증가할수록 기계적 인장강도 성능이 향상되었다. 충전함량이 높은 60, 70wt%에서 특히 굴곡강도의 향상이 큰 결과를 얻게 되었다.

#### 3.2.2.2 EMAC 충전함량에따른 굴곡강도 특성

그림 9와 표 6에서는 에폭시수지에 MA입자를 충전함량별 40, 50, 60, 70wt% 충전시켜 제조된 콤포지트의 기계적 굴곡강도 측정결과를 와이블플롯으로 나타내었고 그리고 표 6에서 와이블 플롯된 특성파라미터를 나타내었다. 원형 에폭시수지의 굴곡강도는 126.62MPa를 기록하였으며, 원형에폭시수지를 기준으로 충전함량별 여러종류 EMAC와 비교할 때, 40wt%에서는 원형에 비하여 -21.43%, 50wt%에서는 -13.24%, 60wt%에서는 -5.25% 그리고 70wt%에서는 -1.31%로서 MA 충전함량이 증가할수록 굴곡강도는 증가하였다. 그러나 원형 에폭시수지에 비하여 모든 함량별 콤포지트에서는 낮은 기계적 굴곡강도의 결과를 나타내었다.

이상의 결과로서 기계적 인장강도 및 굴곡강도에서 충전함량별 40, 50, 60, 70wt%로 증가할수록 기계적 인장강도의 경우 MS, MA의 경우 비교하여 볼 때, 모두 충전함량 증가에 따라 인장강도의 성능이 증가하는 결과를 나타내었다.

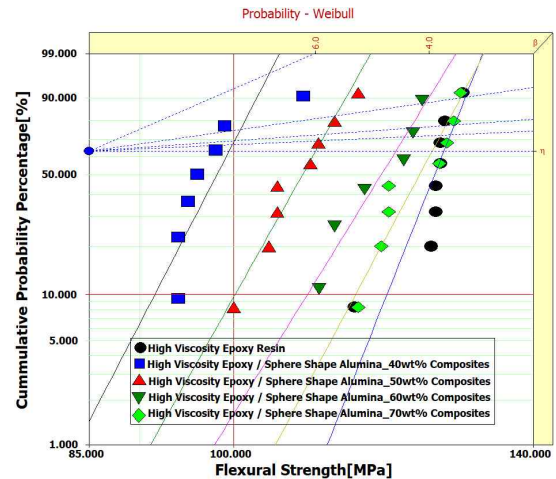


그림 9 EMAC 충전함량에따른 굴곡강도 특성  
 Fig. 9 Flexural strength characteristics according to EMAC contents

표 6 Fig. 9의 와이블 플롯의 특성파라미터  
 Table 6 Characteristics of the Weibull Plot in Fig. 9

Types of Samples	Shape Parameter	Scale Parameter [MPa]	B10 [MPa]
High Viscosity Epoxy Resin	35.10	126.62	118.77
EMAC_40wt%	26.91	99.48	91.48
EMAC_50wt%	24.79	109.65	100.06
EMAC_60wt%	22.60	119.96	108.66
EMAC_70wt%	26.14	124.95	114.63

그러나 EMSC가 EMAC에 비하여, 성능면에서 EMSC가 EMAC보다 높은 성능의 결과를 나타내었다.

그리고 충전함량별 EMSC와 EMAC의 굴곡강도 특성에서, 충전함량 증가에 따라 증가되는 경향을 얻었지만 역시 기계적 굴곡강도의 성능면에서 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, EMSC가 EMAC보다 상대적으로 높은 기계적 굴곡강도의 결과를 얻게 된 것이다. 이와 같은 원인에 대해서 검토하여 볼 때

**1. 기계적 특성인 인장강도 및 굴곡강도의 경우, 충전함량 증가에 따라 EMSC, EMAC 모두 증가하는 이유.**

일반적으로 기계적 파괴강도 특성에서 충전함량이 증가하면 오히려 인장 및 굴곡강도가 저하되는 특성을 나타내고 있다. MA의 경우 낮은 충전 함량(10~40wt%)에서는 원형에폭시 수지의 강도 보다 증가하였지만, 그 이상의(50~70wt%) 경우 충전함량이 증가할수록 감소하였다. 이유는 에폭시 수지와 경화제간의 경화 촉진에 의해 가교가 이루어져 망상구조로 경화가 진행되어 그 결과 단단한 물질로 변화하게 된다. 그리고 알루미늄과 같이 단단한 필러가 충전함량이 증가되면 에폭시의 유동성과 입자의 강성으로 증가되는 경우를 설명하고 있다[19]. 또한 가교밀도(crosslink density)가 크고 작용에 따라 굴곡 및 인장강도에 크게 영향을 주게 된다. 그런 이유로 충전 함량이 적은 경우 가교밀도가 높고, 충전 함량이 높은 경우 오히려 가교밀도가 낮은 이유로, “MA 입자가 오히려 경화반응인 에폭시 관능기가 이동하는 것을 방해하는 효과로 감소하게 된다.” 이 또한 EMSC에서 MS를 충전한 경우 수지와 실리카입자 간 공유결합 및 수소결합으로 인하여 anchor 되어 에폭시체인의 이동도를 방해하게 되어 결국 굴곡강도가 증가하는 원인이기도 한다.

그러나 충전함량이 증가할수록 기계적 특성이 증가하는 이유는 소량의 마이크로 필러를 충전할 때, 입자수가 상대적으로 적기 때문에, 입자간의 거리가 대단히 멀리 떨어져있게 된다. 그런 입자의 분포상태에서는 오히려 마이크로필러가 불순물로 작용하는 경향을 갖게 된다. 다시 표현하면, 기계적 결합의 시작점이 되어 진다는 것이다. 그런 이유로 충전 함량이 증가할수록 마이크로 필러 입자 간 간격이 좁아지고 그리고 계면이 상대적으로 증가하게 되어, 입자 간격이 좁아지면서 수지의 영역이 감소하게 된다. 즉, 기계적 특성 향상을 가져올 수 있는 무기물의 영역이 증가되어 인장강도 및 굴곡강도의 특성향상을 가져올 수가 있을 것으로 사료된다.

**2. 기계적 인장강도 및 굴곡강도 특성으로, EMSC가 EMAC보다 우수한 이유**

전기적인 절연파괴특성에서도 EMSC가 EMAC보다 우수한 절연성능을 나타내었다. 역시 문제는 계면에 있다 할 것이다. MS의 경우 표면에 OH기가 존재하고 에폭시수지에서도 OH기가 존재하기 때문에 두 개의 계면사이에는 수소결합이 강하게 작용하여 계면 결합력이 크게 강화된 것으로 사료된다.

이는 앞서 나타난 그림 2와 그림 3에서 SEM의 관찰로 확인할 수 가있다. 구상의 MA 경우 계면이 불량한 상태를 나타내었고, 반면 랜덤형상인 MS의 경우 계면이 매우 양호한 상태를 나타내

었다. 그런 이유로 EMSC가 우수한 기계적 특성을 나타낸 것으로 사료된다.

기계적 특성 향상의 핵심은 마이크로필러가 에폭시수지에 균질한 상태로 분산이 이루어져야만 한다. 또한 구조적인 상태에 존재하는 마이크로필러 입자가 수지와 계면의 결합력을 크게 가질 때, 특성향상을 가져오는 것이다. 그러나 문제는 계면이 작기 때문에 장시간 하중의 스트레스를 지속적으로 받게 되면 마이크로 필러 입자와 수지의 계면과 결합력의 약화로 결합이 발생되곤 한다. 그런 이유로 현재 상용화하여 제조된 전력기기의 경우 장시간 신뢰성에 노출되어 수명을 짧게 하는 원인이 된다.

**4. 결 론**

본 연구에서는, 현재 변전시스템인 GIS Spacer, 향후 친화경 변전시스템의 절연물을 개발하고자하는 연구로서, 고점도형 에폭시수지에 MS, MA 두 종류 필러를 충전함량별 40, 50, 60, 70wt% 충전 분산시켜 제조된 EMSC, EMAC의 전기적 교류절연 파괴 강도, 기계적 인장 및 굴곡강도를 평가하였다. 평가결과를 와이블플롯으로 나타내었다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

**1. 전기적 교류 절연파괴 강도**

- 고상 에폭시수지에 MS, MA의 충전함량이 증가할수록 절연 파괴 강도가 감소하는 결과를 나타내었고, 그리고 MS는 충전함량이 증가할수록 낮은 전기적 절연파괴 결과를 나타내었지만 대체로 절연성능이 매우 높은 결과를 얻게 되었다. 그러나 MA의 경우는 MS와는 전혀 다른 결과로, 거의 원형 에폭시수지 정도의 전기적 절연파괴 성능의 결과를 얻게 되었다.

원인은 MS, MA의 경우 계면특성에 큰 영향을 가져오는 것으로 사료됨.

**2. 기계적 인장강도 및 굴곡강도**

기계적 인장강도의 경우 MS, MA의 경우 비교하여 볼 때, 모두 충전함량 증가에 따라 인장강도의 성능이 증가하는 결과를 나타내었다. 그러나 EMSC가 EMAC에 비하여 성능면에서 EMSC가 EMAC보다 높은 성능의 결과를 나타내었다. 특히 고함량(60,70wt%)에서 크게 향상된 결과를 얻게 되었다.

그리고 충전함량별 EMSC와 EMAC의 굴곡강도 특성에서, 충전함량 증가에 따라 증가되는 경향을 얻었지만 역시 기계적 굴곡강도의 성능면에서 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, EMSC가 EMAC보다 상대적으로 높은 기계적 굴곡강도의 결과를 얻게 된 것이다. 역시 원인으로 볼 때 계면의 효과가 크게 좌우 되는 것으로 사료됨.

**감사의 글**

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

## References

- [1] T. Shimizu, S. Kinoshita, S. Makishima, J. Sato, O. Sakaguchi, "Material and Simulation Technology for Solid Insulated Switchgear", *IEEE 7th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials (ICPADM), S22-5*, pp. 1194-1197, 2003.
- [2] J. Keith Nelson, J. C. Fothergill, "Internal charge behaviour of nanocomposites," *Nanotechnology*, Vol. 15, 2004.
- [3] X. Huang, P. Jiang, and T. Tanaka, "A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 27, no. 4, pp. 8-16, 2011.
- [4] Jae-Jun Park and Jae-Young Lee, "A New Dispersion Method for the Preparation of Polymer/Organoclay Nanocomposite in the Electric Fields", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 17, No. 5; pp. 1516-1522, October, 2010.
- [5] A. A. Cooper, R. J. Young, and M. Halsall, "Investigation in to the deformation of carbon nano tubes and their composites through the use of Raman spectroscopy," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 32, pp. 401-411, 2001.
- [6] N. Shanid, R. G. Villate, and A. R. Barron, "Chemically functionalized alumina nanoparticle effect on carbon fiber/epoxy composites," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 65, pp. 2250-2258, Nov. 2005.
- [7] Z. Ahmad, M. P. Ansell, and D. Smedley, "Thermal properties of epoxy based adhesive reinforced with nano and micro particles for in-situ timber bonding," *Int. J. Eng. Technol.*, Vol. 10, no. 2, pp. 32-38, Mar. 2010.
- [8] 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.
- [9] T. Andritsch, R. Kochetov, P. H. F. Morshuis, and J. J. Smitt, "Dielectric properties and space charge behaviour of MgO-epoxy nanocomposites," *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 2010.
- [10] R. Kochetov, T. Andritsch, U. Lafont, P. H. F. Morshuis, S. J. Picken, and J. J. Smit, "Preparation and dielectric properties of epoxy-BN and epoxy-AlN nanocomposites," *IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009.
- [11] Jae-jun Park; Chang-hoon Lee; Jae-young Lee; Hee-dong Kim, "Preparation of epoxy/micro- and nanocomposites by electric field dispersion process and its mechanical and electrical properties", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 18, Issue: 3, pp.667-674, 2011.
- [12] Jae-Jun Park and Jae-Young Lee, "Effect of epoxy-modified silicone-treated micro-/nano-silicas on the electrical breakdown strength of epoxy/silica composites", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 24, Issue: 6, pp. 3794-3800, Dec. 2017.
- [13] Guevara Morales, A., Taylor, A. C., Fu, M., Hyde, A., Perrot, F. "Nanoclay-filled epoxy composites for electrical insulation application", *The Proceedings of 9th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Harbin, China*, July 2009, pp. 868-871.
- [14] Wang Qi, Li Zhe, Wu Jiandong and 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 23-27 September 2012, Bali, Indonesia*, pp. 1110-1113, 2012.

## 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