

## 에폭시/구상실리카 콤포지트의 전기적 절연파괴 및 인장 강도 특성 연구

이승훈<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 광운전자공업고등학교

### A Study on Electrical Insulation Breakdown and Tensile Strength for Epoxy/Spherical Silica Composites

Seung-Hun Lee<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Kwangwoon Electronics Technical High School, Seoul 139-875, Korea

(Received September 20, 2013; Accepted September 24, 2013)

**Abstract:** In order to develop a high voltage insulation material, spherical silicas with two average particle sizes of 5  $\mu\text{m}$  and 20  $\mu\text{m}$  were mixed in different mixing ratios (1:0, 0.7:0.3, 0.5:0.5, 0.3:0.7, 0:1) and their total filling content was fixed at 65 wt%. In order to observe the dispersion of the spherical silicas and the interfacial morphology between silica and epoxy matrix, field emission scanning electron microscope (FE-SEM) was used. The electrical insulation breakdown strength was estimated in sphere-plate electrodes with different insulation thicknesses of 1, 2, and 3 mm. Electrical insulation breakdown strength decreased with increasing mixing ratio of 5/20  $\mu\text{m}$  and the thickness dependence of the breakdown strength was also observed. The tensile strength of the neat epoxy was 82.8 MPa as average value and its increased with decreasing particles size and that of epoxy/silica (2  $\mu\text{m}$ ) was 107 MPa, which was 130.8% higher value.

**Keywords:** Epoxy-spherical silica composites, Tensile strength, Electrical breakdown strength

#### 1. 서론

에폭시수지는 중전기기의 절연시스템 분야 즉, 물드타입 변압기, 계기용 변류기 (CT), 계기용 변압기 (PT), 또는 MOF (metering out-fit), 가스 스위치 기어 등에 잘 알려진 재료이다 [1-3]. 이유는 우수한 전

기적 절연 특성뿐만 아니라 양호한 기계적 그리고 열적 특성의 우수성이 입증되었기 때문이다. 또한 SF<sub>6</sub> (sulfur hexafluoride)는 고전압 수반 중전기기에 매우 중요한 역할을 하였지만 온실가스의 주요한 매질로 지정되어 졌다. 그런 이유로 많은 연구자들은 새로운 절연시스템 개발을 진행하였다 [4]. 이유는 SF<sub>6</sub> 절연가스 사용중단에 따른 중전기 설비의 소형화에 어려움이 있기 때문이다. 지난 20여 년 동안, 많은 연구자들은 전기응용에 있어 높은 신뢰성을 가지면서 저비용을 갖는 새로운 에폭시 기반 중전기용 절연 소재를 개발하여 왔다. 일반적으로 마이크로실리카의

a. Corresponding author; [aramis71@daum.net](mailto:aramis71@daum.net)

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에폭시수지 충전 함량은 65~80 wt%를 사용하였다. 이는 중전기기의 치수 안정성을 만족시키기 위한 것이다. 그렇지만 무기물 실리카입자의 충전 함량이 너무 높기 때문에 점도가 매우 높게 된다. 그리하여 용이한 몰딩 작업을 위하여 점도를 감소시킬 필요가 있기에 구형 타입의 실리카가 에폭시 매트릭스에 도입하게 된 것이다.

본 연구에서는 평균 입도 크기 5, 20  $\mu\text{m}$ 를 갖는 구상실리카의 함량비에 따라 에폭시/구상실리카 콤포지트를 제조하였다. 그리고 절연 두께의 증가에 따른 전기적 절연파괴 특성을 연구하였다. 그리고 기계적 특성인 인장 강도의 경우도 입자 크기를 0, 2, 10, 20  $\mu\text{m}$ 로 변화시켜 65 wt% 충전된 콤포지트의 인장 강도 실험을 수행하였으며 그 결과, 산술 평균값을 이용하여 특성 평가를 실시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

비스페놀 A형 디그리시딜 에테르 에폭시수지, 상품명 YD-128 (Kukdo Chem. Co., Korea)이 사용되었다. 에폭시 당량 (EEW)은 184~190 g/eq.이었다. 그리고 경화제는 3-or 4-methyl-1, 2, 3, 6-tetrahydrophthalic anhydride (Me-THPA)이었고, 상품명 HN-2200 (Hitachi Chem. Co., Japan)이었다. Tertiary amine 타입 경화 촉진제는 benzyl-dimethyl amine (BDMA, Kukdo Chem. Co., Korea)을 사용하였다. 4종류의 평균입자 크기가 각기 다른 구상실리카를 사용하였고, 이는 시벨코 코리아로부터 구입하였다. 그들 상품명은 SS-30, SS-0200R이며 평균입자 크기는 5  $\mu\text{m}$ , 그리고 20  $\mu\text{m}$ 를 각각 사용하였다.

### 2.2 제조

비스페놀 A형 디그리시딜 에테르 에폭시수지 (DGEBA) 12 g, 그리고 THPA 18 g을 5분 동안 기계적 교반기로 20분 동안 혼합하였고, 구상실리카 입자 60 g을 두 개의 각기 다른 비율로 혼합하여 첨가하였다. 그 혼합물은 고속 교반기 (5,000 rpm)에 40분 동안 잘 혼합하였으며, 마지막 BDMA 1 g을 주입 후 3분 동안 혼합하였다. 그 최종적인 혼합액을 금형에 주입하였다. 절연파괴 시편은 두께가 1, 2, 3 mm 두

께를 갖는 지름 100 mm 원판형 시편으로 제조하였다. 시편은 120°C에서 2시간, 150°C에서 24시간의, 2차 경화를 거친 후 서냉하였다.

## 2.3 전기적 교류절연 파괴 및 기계적 인장 강도 특성

교류 절연파괴 강도의 측정은 전극의 형상은 구대 평판형으로 전극의 배치를 이루었다. 교류절연파괴 강도를 측정하기 위하여 절연 두께는 1, 2, 3 mm로 하여 파괴 강도를 구하였다. 시편과 전극을 절연유 30°C 상태에 담아 잠시 후 고전압 (스카이이노텍(주), 한국) 측정 장치에 1 kV/s 승압 속도로서 파괴에 이를 때까지 인가하였다. 고전압 주파수는 60 Hz로서 100 kVA를 갖는 절연파괴용 변압기이다. 모든 자료는 산술 평균하여 나타난 값으로 평가되어 졌다. 인장 강도는 universal testing machine (SHM- C-500, 삼한텍, 한국), 인장 강도 시편은 JIS 7502의 규정에 맞추어 설계된 금형을 이용하였고 근거한 치수에 맞추어 제조되었다. 측정된 콤포지트의 파단면의 측정은 emission scanning electron microscopy (FE-SEM, S-500 HITACHI SYSTEM, Japan)를 사용하여 10 kV 가속 전압에서 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 FE-SEM

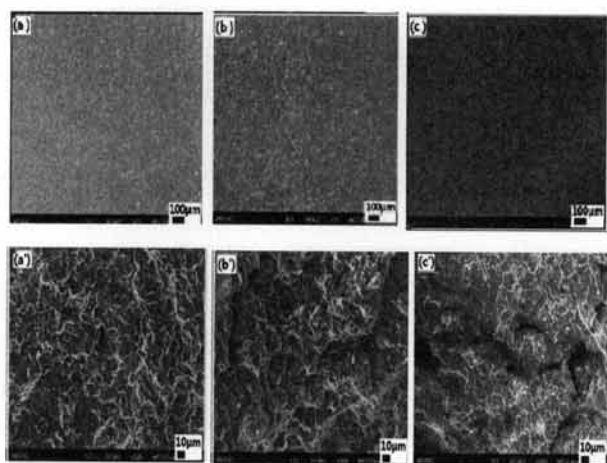


Fig. 1. FE-SEM images for epoxy/spherical silica (65 wt%) composites with various mixing ratio of 5  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  silicas: (a) 1 : 0 polished, (b) 0.5 : 0.5 polished, and (c) 0 : 1 polished. prime (') was done from the fractured surface after tensile test.

구상실리카 입자의 분산 정도를 검사하기 위하여 에폭시/구상실리카 콤포지트를 연마하였고, FE-SEM의 관찰이 이루어졌다. 그림 1에서 보여준 바처럼 구상실리카 입자는 5  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$  실리카 입자들의 혼합 비율을 (a) 1:0, (b) 0.5:0.5, (c) 0:1의 비율로 몰드화된 에폭시 시스템의 연마된 표면으로 부터 포착하였다. 그리고 (a)' (b)' (c)'는 인장 강도의 측정 시 파단된 단면의 측정된 영상을 나타낸 결과이다.

그 결과 모든 입자들은 균질하게 분산되어졌고, 혼합 비율에 관계없이 기계적, 전기적 절연과괴 감소의 원인이 되는 어떤 응집 현상도 발견되지 않았다. 순수한 에폭시수지에서 시스템 파단은 빠른 균열 영역에 의하여 에워싸여진 거울 영역으로부터 개시되었고 그때 거칠은 영역이 이어졌다 [5]. 그러나 에폭시/구상실리카 콤포지트에서 내부 스트레스는 에폭시 매트릭스와 실리카 사이 계면에서 집중되어졌고 그로인해 균열이 쉽게 계면으로부터 발생하게 된 것이다.

### 3.2 전기적 특성

5  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$  실리카의 각기 다른 혼합 비율을 갖는 에폭시/구상실리카 (65 wt%)의 교류 절연과괴 강도 측정 결과에 대한 평균값을 나타내었다. 전기적 특성의 측정값은 8회 샘플의 측정 결과를 평균한 값을 취하였고, 평균값보다 월등히 높거나 또는 낮은 측정 자료는 평균값에서 제외된 결과이다.

그림 2는 절연두께 1 mm 두께 의존성에 대한 교류절연과괴 강도 측정 결과로서 1:0 (구상실리카 5  $\mu\text{m}$ 만 충전)의 결과는 47 kV, 그리고 0:1 (구상실리카 20  $\mu\text{m}$ 만 충전)의 경우는 55 kV의 결과를 얻었다.

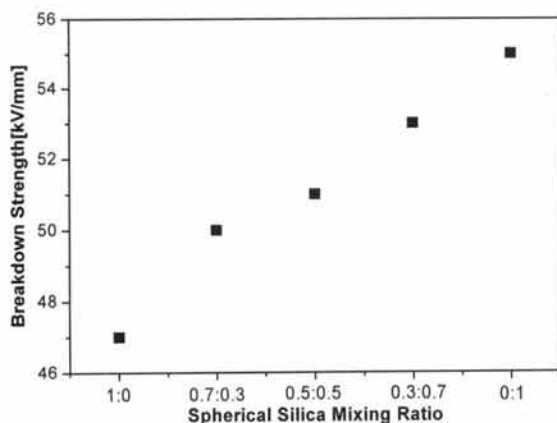


Fig. 2. Insulation breakdown strength in epoxy/spherical silica (65 wt%) systems with different mixing ratio of 5  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  silicas. Insulation thick was 1 mm.

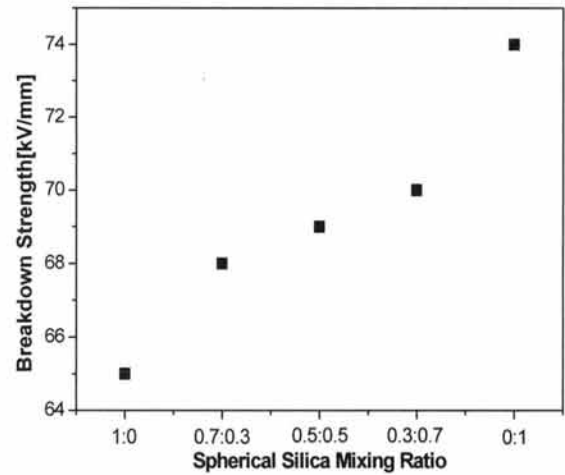


Fig. 3. Insulation breakdown strength in epoxy/spherical silica (65 wt%) systems with different mixing ratio of 5  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  silicas. Insulation thick was 2 mm.

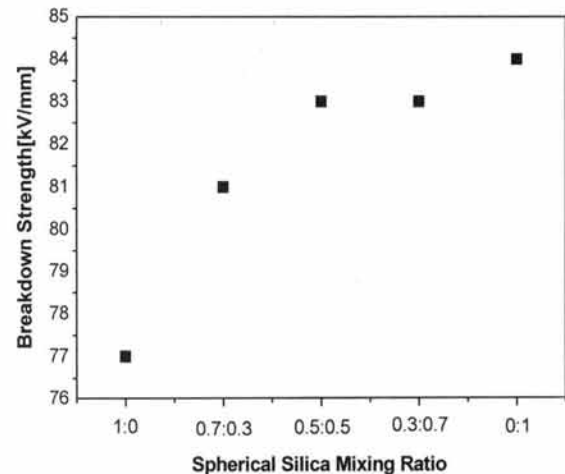


Fig. 4. Insulation breakdown strength in epoxy/spherical silica (65 wt%) systems with different mixing ratio of 5  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  silicas. Insulation thick was 3 mm.

그림 3은 두께가 2 mm의 경우 교류절연과괴 강도 측정 결과로 1:0 (5  $\mu\text{m}$ 만 충전)의 경우 65 kV, 0:1 (20  $\mu\text{m}$ 만 충전)의 경우 74 kV이었고, 그림 4는 두께가 3 mm의 경우 교류절연과괴 강도 측정 결과로 1:0 (5  $\mu\text{m}$ 만 충전)의 경우 77 kV, 0:1 (20  $\mu\text{m}$ 만 충전)의 경우 84 kV의 결과를 얻었다. 이로서 5  $\mu\text{m}$  실리카에 비하여 20  $\mu\text{m}$ 의 경우, 절연 두께 1 mm의 경우 17%, 두께 2 mm의 경우 13.8%, 두께 3 mm의 경우 9%의 성능이 향상되었다.

측정 결과로부터 실리카 혼합 효과는 혼합 규칙에 의하여 추정할 수 있다 [4]. 20  $\mu\text{m}$  크기의 실리카 충전 함량이 증가할수록 점차로 증가되는 경향이다. 이는 5  $\mu\text{m}$ 인 경우 가장 취약한 절연파괴 강도의 의존성을 나타낸 이유이다. 그리고 에폭시/구상실리카 콤포지트 (65 wt%), 두께 의존성에서 절연 두께가 증가할수록 절연파괴 강도는 증가하였고, 그렇지만 두께에 비례하여 증가하지 않았다. 두께의 의존성은 순수하게 경험적이며, 그리고 각기 다른 유전체의 서로 다른 전원 AC, DC, 임펄스 조건 하 많은 실험 결과 얻어진 결과와 유사한 경향을 나타낸 것이다.

### 3.3 기계적 특성

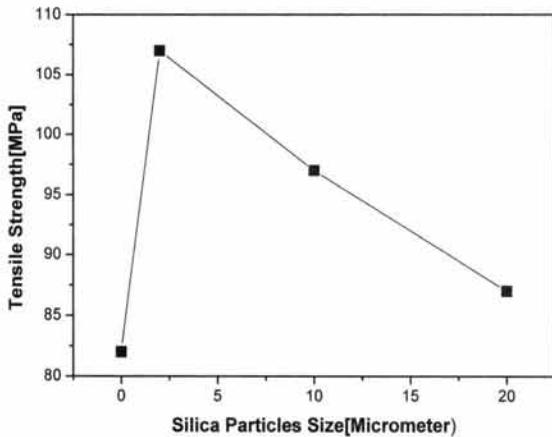


Fig. 5. Tensile strength in epoxy/silica composites (65 wt%) systems with different silica particles size (0, 2, 10, 20  $\mu\text{m}$ ).

그림 5는 에폭시/실리카 콤포지트 (65 wt%) 각각의 입자크기 즉, 0, 2, 10, 20  $\mu\text{m}$  4종류에 대한 인장 강도의 기계적 특성을 측정된 결과를 나타내었다.

그림 5에 나타난 기계적 인장 강도의 특성 평가 자료는 산술 평균값을 취한 결과를 분석하였고, 평균값에 크게 벗어난 자료는 포함시키지 아니하였다. 원형 에폭시수지의 평균 인장 강도는 82 MPa를 나타내었고, 2  $\mu\text{m}$ 의 경우 107 MPa, 10  $\mu\text{m}$ 의 경우 97 MPa, 그리고 20  $\mu\text{m}$  충전된 콤포지트의 인장 강도는 87 MPa의 결과를 얻었다. 입자 크기가 작을수록 인장 강도는 증가하였고, 역으로 입자가 큰 경우 감소하는 결과이다. 원형 에폭시수지에 비하여 2  $\mu\text{m}$  실리카 입자 충전 에폭시 콤포지트는 성능이 30.48%로 크게 향상되었고, 20  $\mu\text{m}$  경우, 원형에폭시에 비하여 약 6%

의 향상이 이루어졌다. 마이크로실리카가 에폭시 매트릭스에 첨가될 때 마이크로실리카는 실리카 표면상 실라놀기와 에폭시 매트릭스 내 수소기 사이 수소결합에 의한 에폭시체인을 든든하게 정박할 수 있게 한 경우가 된 것이다. 그리하여 에폭시 체인의 이동도를 방해하게 된 결과를 가져온 것이며, 입자의 크기와 계면과의 관계에서 마이크로 입자가 에폭시 매트릭스에 연하는 계면이 나노 입자에 비하여 상대적으로 약함을 알 수 있었고, 그 결과에 비추어 볼 때 2  $\mu\text{m}$ 에 비하여 20  $\mu\text{m}$ 는 입자 평균 크기가 10배 정도의 크기를 갖게 된 것이다. 이로 인하여 입자크기가 작은 경우 계면의 약화보다 오히려 입자가 큰 경우 계면의 약화가 오히려 기계적 인장 특성을 약화된 것으로 사료된다.

### 4. 결론

평균 입도가 5  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$  구상실리카 입자의 여러 종류 혼합이 중전기기의 절연재료로 이용하기 위하여 에폭시 매트릭스에 도입하게 되었다. 전기적 특성은 구대 평판 전극을 이용하여 지름 100 mm의 원판형 샘플을 이용하여 측정하였다. FE-SEM의 관찰은 연마한 표면과 급하게 인장 강도의 측정 후 빠른 크랙이 발생한 파단면의 영역을 보여주고 있다. 역시 에폭시 매트릭스에 5  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$  사이에 미소한 보이드를 발견할 수 없었고, 계면이 강화된 영상을 볼 수 있었다. 절연파괴 및 기계적 특성으로 인장 강도 특성의 평가 시 자료는 일반화된 산술적인 평균값을 이용하여 나타내었으며, 그 결과 5  $\mu\text{m}$  실리카의 콤포지트의 경우와 20  $\mu\text{m}$  실리카 절연파괴 강도의 두께 의존성을 평가한 결과 5  $\mu\text{m}$ 의 경우 절연파괴 강도가 20  $\mu\text{m}$ 의 경우 보다 1 mm, 2 mm, 3 mm 각각 17%, 13.8%, 9%의 향상을 가져왔다. 기계적 인장 강도의 특성은 에폭시/실리카 콤포지트 (65 wt%)의 경우 0, 2, 10, 20  $\mu\text{m}$  4종류에 대한 인장 강도의 기계적 특성을 측정된 결과 전기적 특성과 반대적인 양상을 나타내었다.

즉, 입자가 큰 실리카가 충전된 에폭시 콤포지트보다 입자가 작은 실리카가 충전된 경우 콤포지트가 높은 인장 특성을 갖고 있었다. 수치상 나타내면 2  $\mu\text{m}$ 의 입자의 경우 원형에폭시보다 30.48%, 그리고 20  $\mu\text{m}$ 의 경우 원형 에폭시수지 보다 6%의 미소한 향상을 나타내었다.

## REFERENCES

- [1] R. Sarathi, R. K. Sahu, and P. Rajeshkumar, *Mater. Sci. Eng.: A*, 445, 567 (2007).
- [2] N. Hayakawa, H. Maeda, S. Chigusa, and H. Okubo, *Cryogenics*, 40, 167 (2000).
- [3] G. Iyer, R. S. Gorur, R. Richert, A. Krivda, and L. E. Schmidt, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18, 659 (2011).
- [4] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, S. Kuge, M. Kozako, and T. Tanaka, *IEEJ Trans. FM*, 126, 1136 (2006).
- [5] R. J. Morgan, L. T. Mones, and W. J. Steele, *Polymer*, 23, 295 (1982).
- [6] J. J. Park, C. H. Lee, J. Y. Lee, and H. D. Kim, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18, 667 (2011).
- [7] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. Kido, M. Kozako, and T. Tanaka, *Proc. of International Symposium on Electrical Insulating Materials* (Kitakyushu, Japan, 2005) p. 239.
- [8] P. Gonon, A. Sylvestre, J. Teyssyre, and C. Prior, *J. Mater. Sci.: Mater. in Electro.*, 12, 81 (2001).
- [9] G. Chen, J. Zhao, S. Li, and L. Zhong, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 222904 (2012).