

## 절연파괴 특성에 미치는 나노첨가제(SiO<sub>2</sub>)의 영향

김정식, 정인범, 이혁진, 최광진, 류부형\*, 이충호\*\*, 홍진웅  
 광운대학교 전기공학과, 동국대학교\*, 충주대학교\*\*

### Affect of SiO<sub>2</sub> depending on the characteristics of break-down

Jeoung-sik Kim, In-bum Jeong, Hyuk-jin Lee, Kwang-Jin Choi, Boo-Hyung Ryu\*, Choong-ho Lee\*\*, Jin-woong Hong  
 Kwangwoon Univ. Dongguk Univ.\* Chungju Univ.\*\*

**Abstract :** In the study the affect of SiO<sub>2</sub> depending on the characteristics of break-down, we have experimented the break-down for the SiO<sub>2</sub> and variable temperature change after making nano SiO<sub>2</sub> of the diameter 12 [nm] at the epoxy resin. As the experimental results, we have confirmed that the break-down strength is increased at the adding change but the break-down strength is decreased again as the 0.4 [wt%] standard. Also, the break-down voltage is not changed at 25, 50 [°C] as the temperate change. But break-down voltage is largely changed when temperate is rising up.

**Key Words :** brake-down, SiO<sub>2</sub>, epoxy, dielectric strength

### 1. 서론<sup>37</sup>

Epoxy 수지는 경화과정을 통해 3차원 망상구조를 갖는 대표적인 열경화성 수지로 내열성, 내부식성, 절연성 등의 물성이 우수하며 경화 시 수축이 적고 습기가 있는 곳에서도 접착력을 잃지 않아 작업성이 좋다. 그러나 Epoxy 수지 단독으로는 열안정성 및 치수 안정성 등에서 취약한 단점이 있어 이를 보완하기 위해 Epoxy 수지에 각종 충전제, 예를 들어 무기, 유기, 금속분 등과 같은 물질과의 상용성 및 조화성이 우수하여 에폭시 수지 단독으로 얻을 수 없는 다양한 특성을 획득하기가 용이하여 광범위하게 사용되고 있다. 그리고 최근 나노기술의 발전으로 전력기에 사용하는 절연재료에 각종 나노물질 첨가한 많은 나노 복합 재료 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 본 논문에서는 나노 SiO<sub>2</sub>가 절연파괴 특성에 미치는 영향에 대하여 온도의존성과 첨가량 의존성을 통해 소개한다.

### 2. 실험

실험에서는 비스페놀 A형 YD-128 에폭시 수지, HN-2200 경화제, Aerosil200의 12 [nm] 나노 SiO<sub>2</sub>를 배합비에 맞게 혼합하여 진공 가열 교반장치에 넣고 70 [°C]에서 20분 정도 교반한 후 미리 제작해 놓은 금형에 주입, 120 [°C]에서 2시간동안 1차 경화시킨 후 다시 130 [°C]에서 8시간 동안 2차 경화를 시켜 시료를 제작하였다. 크기는 25×25×2.5 [mm]로 입자의 크기 약 12 [nm]인 SiO<sub>2</sub> 첨가량을 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 [wt%]로 변화시켜 제작을 하였고, 시료의 첨가량에 따른 전기적 특성과 온도에 따른 전기적 특성을 보기 위하여 유조에 Silicon 오일을 사용하여 측정 온도를 25, 50, 80, 100 [°C]로 조절을 하였고, 각 온도에서 첨가량을 변화시켜 제작한 시료를 고전압발생장치를 이용, step인가법을 사용하여 초당 1 [kV]를 상승시켜 절연파괴가 일어날 때 자동 종료 되게 하였다.

### 3. 결과 및 검토

일반적으로 절연 파괴 강도(dielectric breakdown strength)는 온도에 무관한 영역과 온도 상승과 더불어 그 강도가 감소하는 영역으로 나뉘어진다. 그림 1과 같이, 고체 유전체의 온도 의존성에 대한 특성은 2개 또는 3개의 영역으로 대별할 수 있으며, 온도 영역에 따라 그 파괴 기구도 달라진다. I 영역은 전자적 파괴, II영역은 자유 체적 파괴 및 순열 파괴, III영역은 순열파괴가 주로 지배한다.

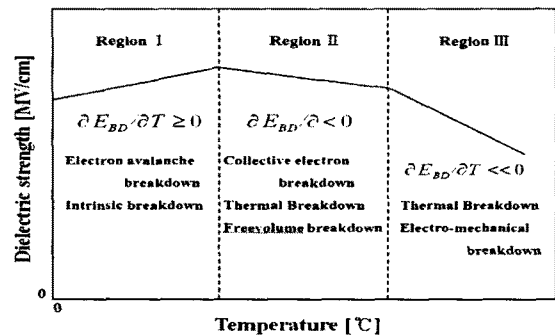


그림 1. 고체 유전체 절연파괴 강도의 온도 의존성

그림 2는 시료의 절연파괴의 온도의존성을 나타낸 것으로 모든 시료가 측정온도가 증가함에 따라 절연파괴강도 E<sub>b</sub>가 감소하는 것을 확인하였다. 그중에서 첨가량 0.4 [wt%] 시료의 절연파괴 강도는 25 [°C]에서 2.90 [MV/cm], 50 [°C]에서 2.78 [MV/cm], 80 [°C]에서 2.41 [MV/cm], 100 [°C]에서 1.82 [MV/cm]로 가장 높은 절연 파괴 강도를 확인하였다. 절연파괴강도 E<sub>b</sub>는 70 [°C] 미만의 저온영역에서는 인가 전계에 의하여 트랩 되어있던 전자가 탈출, 가속되어 일반적으로 저온영역에서는 온도상승에 따라 거의 변화하지 않았다. 그림 2에서는 측정온도가 70 [°C]미만 영역에서는

$\partial E_b / \partial T \approx 0$ 로 거의 변화하지 않았으며, 이 영역은 그림 1을 참고로 하면 전자적 파괴 기구로 생각된다. 이것은 전자적 파괴로 생각되는 저온 영역에서는 전자의 평균 자유행정이 길어지는 시료 내부에 결함이 많아 편차(deviation)가 비교적 크게 나타난다. 또한, 측정온도가 70 [°C]를 초과하면 측정온도의 증가에 따라 절연파괴강도  $E_b$ 는 감소하는 것을 확인하였고 많은 고분자들의 절연파괴 강도는 유리전이온도 부근에서 매우 급격하게 감소하며, 본 시료의 경우 측정온도가 유리 전이온도 부근에서 절연파괴 강도가 급격하게 감소한다. 이때  $\partial E_b / \partial T < 0$ 으로 되고  $E_b$ 가 급격히 저하되므로 자유체적의 증가와 관련이 있다는 Nelson과 Sabuni의 보고를 근거로 하면 이 영역에서는 자유체적파괴이론이 지배적인 것으로 생각된다.

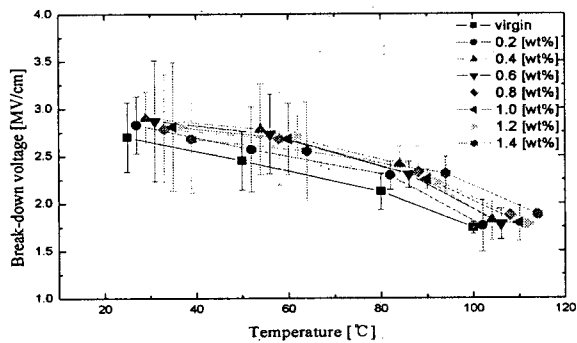


그림 2. 온도변화에 따른 절연파괴 강도

표 1. 첨가량과 온도변화에 대한 파괴강도

unit: [MV/cm]

Classification	25 [°C]	50 [°C]	80 [°C]	100 [°C]
Virgin[wt%]	2.70	2.45	2.12	1.74
0.2	2.83	2.57	2.29	1.76
0.4	2.90	2.78	2.41	1.82
0.6	2.87	2.73	2.30	1.78
0.8	2.79	2.68	2.33	1.87
1.0	2.81	2.68	2.25	1.79
1.2	2.81	2.72	2.22	1.78
1.4	2.68	2.55	2.31	1.88

그림 3은 첨가량이 증가함에 따라 절연파괴 강도가 증가하는 부분과 일정하게 유지되는 부분, 그리고 감소하는 부분으로 나눌 수 있다. 첨가량이 원시료에서 0.4 [wt%]로 증가함에 따라 절연파괴강도는 점차 증가함을 확인했으며, 그 이후 1.2 [wt%]까지 거의 일정한 절연파괴 강도를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 1.2 [wt%]이후 절연파괴강도는 감소하는 것을 확인했다. 첨가량이 증가함에 따라 0.4 [wt%]에서는 무기질인 나노 SiO<sub>2</sub>가 다른 시료들에 비하여 에폭시 수지 내부에 균일하게 분포를 하고 나노 입자간 거리가 좁아지면서 입자들 사이에 쿨롱 장벽 효과(Coulomb blockade effects)에 의하여 장벽으로 작용을 하게 되고, 전자가 나노 입자에 의하여 산란됨으로서 절연파괴강도가 증가하지만

첨가량이 증가를 하게 되면, 나노 입자가 서로 뭉치고 수지 내부에서 계면을 증가시켜 절연파괴강도가 감소함을 확인하였다. 표 1은 첨가량과 온도 변화에 따른 절연파괴강도를 정리한 것으로 첨가량이 증가함에 따라 0.4 [wt%]까지는 절연파괴강도가 증가하고, 그 이상 첨가하게 되면 절연파괴강도가 감소됨을 확인하였다.

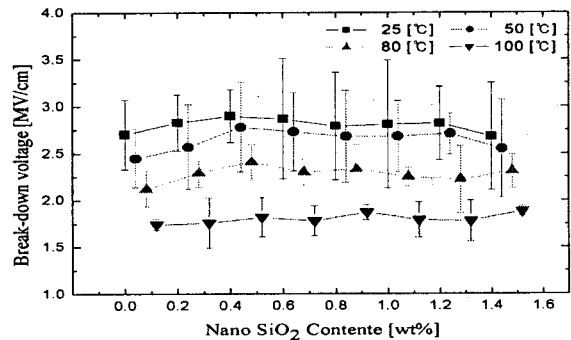


그림 3. 첨가량 변화에 따른 절연파괴 강도

#### 4. 결론

나노 SiO<sub>2</sub>-Epoxy 복합재료를 이용 절연파괴 실험을 통하여 나노첨가제가 절연파괴 특성에 미치는 영향을 실험한 결과 모든 시료가 측정온도가 증가함에 따라 절연파괴강도가 감소를 확인하였으며, 70 [°C] 이하의 저온영역에서는 전자적 파괴기여로 절연파괴강도가 완만하고, 70 [°C] 이상의 고온영역에서는 유리전이온도 부근으로 절연파괴강도가 매우 급격하게 감소함을 확인하였다. 또한 첨가량이 증가하면 나노 입자간 거리가 좁아져 절연파괴 강도가 높지만 0.4 [wt%]를 초과하면 입자간 응집으로 도전성이 증가하여 절연파괴 강도가 감소함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 과제 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

#### 참고 문헌

- [1] T. Tanaka, G. C. Montanari and R. Mulhaupt, "Polymer Nano-composites as Dielectrics and Electrical Insulation Perspectives for Processing Technologies, Material Characterization and Future Applications", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 11, pp. 763-784, 2004.
- [2] Chenggang Chen, Mohammad Khobaib, David Curliss, "Epoxy layered-silicate nanocomposites, Progress in Organic Coatings", Vol. 47, pp. 376-383, 2003.
- [3] T. J. Lewis, "Interfaces and Nanodielectrics are Synonymous", IEEE-CEIDP, pp. 406-409, 2004.