

## 에폭시/나노 층상 복합재료의 유전특성

박재준\*, 안준호, 황병준, 장추문  
중부대학교\*, 홍익대학교

### Dielectric Properties of Epoxy/Layered Nanocomposites

Jae-Jun Park, Joon Ho Ahn, Byung-Joon Hwang, Choo-Moon Jang  
Joongbu Univ. Hognik Univ.

**Abstract :** 에폭시/마이카는 높은 절연성과 강도, 열 안정성 등으로 인하여 고전압 회전기 고정자 권선의 절연재료로 사용되고 있다. 그러나 최근 첨단기기의 등장과 냉난방 부하의 증가로 첨두 부하가 크게 증가하여 발전기 부하변동과 자동 정지횟수가 빈번해지고 있다. 이에 따라 기존에 사용되고 있는 절연재료를 획기적으로 발전시킨 새로운 소재의 개발이 필요하게 되었다. 최근 나노기술은 이러한 기술적 한계를 극복할 수 있는 좋은 대안으로 떠오르고 있다. 그리고 나노 크기의 층상화합물은 기존의 재료에 비해 월등한 전기적, 기계적, 열적 특성을 지닌 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 에폭시 기지에 층상 마이카와 점토를 혼합한 나노복합재료를 제조하여 주파수별, 온도별 유전특성을 살펴보았다.

**Key Words :** Dielectric properties, layered nanocomposites, high voltage generator

### 1. 서 론

마이카는 오래 전부터 고압 회전기의 고정자 권선 절연재료로 사용되어왔다. 하지만 1973년 높은 아스펙비를 갖는 마이카를 고분자의 충전제로 사용할 수 있음을 시사한 이후 [1], 저렴하고 절연성이 높은 마이카가 공급되어 현재까지 주요 절연재료로 사용되고 있다. 또 점토는 자연계에서 풍부히 얻을 수 있는 물질로 열경화성인 에폭시와 결합하면 기존의 에폭시보다 월등한 특성을 가지 복합재료를 만들 수 있다.

하지만 최근 각종 기기의 성능향상과 기후변화, 생활수준의 향상 등으로 발전설비의 부하가 급격한 상승을 보이고 있는 상황에서 기존의 설비들의 가동 정지나 부하변동을 가져오고 있다.

이러한 문제의 해결을 위해 최근 발전하고 있는 나노기술을 활용한 주절연재료의 개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 에폭시 기지에 두께가 100nm이하인 층상 마이카 및 점토를 이용하여 나노복합재료를 제조하였다. 층상 복합재료의 두께가 100nm이하의 나노 크기가 되면 길이에 비해 높은 아스펙비를 가지게 된다. 이러한 높은 아스펙비는 절연성능의 향상과 함께 인장 및 굴곡강도와 같은 기계적 강도 향상과 열적 특성 향상을 가져다 주는 것으로 알려져 있다. 이러한 판상 구조의 충전제는 복합재료 제작 시 내부 보이드의 발생을 줄이는 효과와 전기적으로 관측 절연파괴 강도를 높일 수 있는 장점이 있다. 또 고분자를 2차원적으로 보강하여 탄성율, 강도, 열팽창계수, 성형 수축율 등이 향상을 기대할 수 있다.

기존의 마이크로 크기의 충전제가 혼합된 복합재료에 비해 높은 아스펙비와 나노크기의 두께를 가진 충전제를 혼합한 나노복합재료의 경우, 전기적, 기계적, 열적 특성의 향상을 기대할 수 있다. 최근에는 전기전도도 [2], 절

연파괴강도 [3] 등에서 향상을 보이는 나노복합재료가 발표되고 있다.

본 연구에서는 에폭시/층상 복합재의 유전특성을 중심으로 살펴보았다. 유전특성은 복합재료의 기본 물성을 파악하는데 중요한 특성으로 각각 주파수별, 온도별 유전분산과 완화 특성에 대해 살펴보았다. 또 기존의 무충진 시료와의 비교를 통하여 나노 크기의 층상 충전제가 복합재료에 혼합되어 나타나는 특성을 살펴보았다.

### 2. 실험

실험에 사용된 에폭시는 (주)정도이엔피에서 구입한 Bisphenol-A형의 EXR225로 낮은 점도(6000~8500)와 분자량이 182~186인 변성 에폭시 수지를 사용하였고, 산무수물계 경화제를 사용하였다. 그리고 충전제는 마이카와 점토를 혼합하여 실험하였다. 두 충전제 모두 일본 Co-op화학(주)에서 구입하였고, 마이카(MPE)와 점토(SPN) 모두 Methylene Chloride를 용매로 사용하였다.

시료의 제작은 유기용매(Methylene Chloride)에 충전제를 넣고, 믹서(Kotobuki사의 원심분리방식이 채택된 Ultra Apex Mill 분산기)에 넣고 2000 rpm으로 10분간 혼합, 탈포를 진행하였다. 이후 에폭시를 무게비에 따라 넣고, 진공에서 1시간 30분동안 유기용매를 제거하였다. 유기용매를 제거한 에폭시/충진제 혼합액을 경화제와 혼합(에폭시 10:8 경화제)하고 150℃에서 4시간동안 경화시켜 사용하였다.

유전율의 측정을 위해 Solartron SI1260 임피던스 분석기와 Novocontrol Quatro Cryosystem의 저온시스템으로 이루어진 Broadband Dielectric Spectroscopy System을 이용하여 유전율과 유전손실계수를 측정하였다. 측정 주파수 범위는  $10^{-2}$ ~ $10^6$ Hz이고, 온도 범위는 30~170℃ 범위에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 검토

잘 알려져 있는 것처럼 교류전계에서의 복합 유전율은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (1)$$

여기서  $\epsilon'$ 는 실수부 유전상수,  $\epsilon''$ 는 허수부 유전상수를 가리킨다. 유전율의 실수부는 외부 전계로부터 에너지가 얼마나 축적되었는가를 나타내주고, 대부분 1보다 크다. 또 허수부는 손실계수(loss factor)로 불리고, 물질이 에너지를 얼마나 손실하는가를 나타내주고 있다.

그림 1은 에폭시/나노점토(SPN) 시료의 유전 분산을 살펴본 그림이다. 그림1에서 무충진 시료와 비교하여 보았을 때, Tg값(130°C) 전후로 크게 변화를 나타내는 모습은 무충진 시료와 크게 다르지 않았다. 하지만 Tg 이하의 낮은 온도 영역에서 시료의 유전율은 10<sup>-2</sup>Hz에서 3.12~5.16으로 크게 변화하는 것을 볼 수 있었다. 이는 충상 나노복합재가 충상구조를 이룸으로써 유전율이 낮아질 것이라는 기대에 미치지 못하였다.

이는 유기용매 제거 과정에서 충분히 유기용매가 제거되지 못한 결과로 사료되며, 이는 대부분의 경우, 유기용매를 완벽하게 제거하기는 힘든 것으로 판단된다. 하지만 유전특성에서는, 특히 낮은 온도영역에서는 그 특성에 제한을 주는 결과를 보여주었다. 또 Tg 이상의 온도(130°C 이상)에서는 무충진 시료와 비슷한 결과를 보여주었는데, 한가지 다른 점은 유전분산이 상당히 넓은 범위에서 일어나는 것을 보여주고 있다. 이는 재료 내부에서 유전분산에 기여하는 재료가 충상 점토와 함께 제거되지 못한 유기용매가 함께 기여하기 때문으로 생각된다.

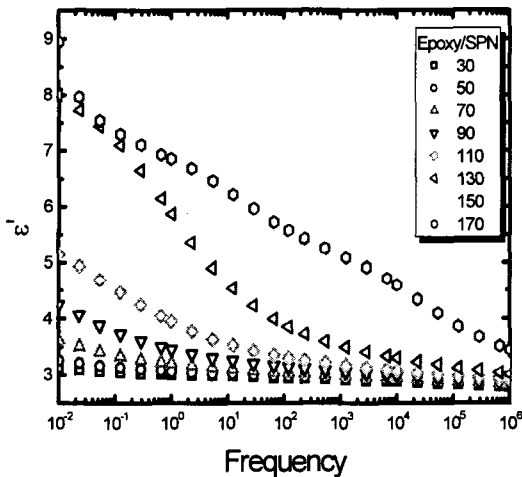


그림 1. 에폭시/SPN(충상 나노점토) 나노복합재료의 온도 별 주파수 변화에 따른 유전 분산 특성.

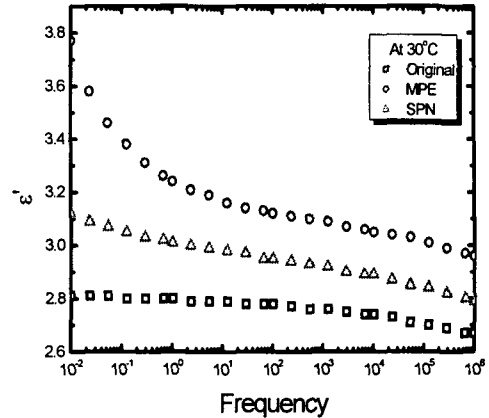


그림 2. 30°C에서 주파수 변화에 따른 에폭시/충상 복합재료(무충진, 나노점토-SPN, 나노마이카-MPE)의 유전 분산 특성.

그림 2는 무충진, 나노 점토, 나노 마이카일 때 유전 분산과 완화 특성을 나타낸 그림이다. 무충진 < 나노 점토 < 나노 마이카 순으로 유전율의 차이가 나타났으며, 유전 완화 특성은 10<sup>2</sup>Hz 이상에서는 유사한 값을 보이고 있으나, 10<sup>2</sup>Hz이하에서는 큰 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다.

### 4. 결론

지금까지 나노 마이카와 점토를 혼합한 에폭시/충상 복합재료의 유전특성에 대해 살펴보았다. 무충진 시료보다 충상 복합재료를 혼합한 시료에서 더 높은 유전율을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 유전손실 역시 낮은 주파수 영역에서 무충진 시료가 가장 낮고, 나노 점토, 나노 마이카 순으로 유전손실을 보여주었다.

### 참고 문헌

- [1] J. Lulis et. al. "The effect of flake aspect ratio on the biaxial properties of mica reinforced plastics", Polymer Engineering Science, Vol. 13, pp., 1973.
- [2] J. C. Fothergill, J. K. Nelson and M. Fu, "Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites Containing TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO Fillers", Annual Report IEEE-CEIDP, No. 5A, 17, pp. 406-409, 2004.
- [3] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Nakan, T. Shimizu, and Y. Yoshimitsu, "Preparation and Insulation Properties of Epoxy-Layered Silicate Nanocomposite", IEEJ Transaction A, Vol. A-124, No. 11, pp. 1064-1072, 2004. Cailiao Xuebao, J. Inorg. Mater. Vol 12, p. 231, 1997.