

Al₂O₃가 충전된 DGEBA/MDA/SN 계의 절연열화 특성

조영신^o · 심미자^{*} · 김상욱
서울시립대학교 화학공학과, ^{*}생명과학과

Dielectric Breakdown Characteristics of Al₂O₃ Filled DGEBA/MDA/SN System

Young-Shin Cho · Mi-Ja Shim^{*} · Sang-Wook Kim
Dept. of Chem. Eng. · Dept. of Life Sci., Seoul City Univ.

Abstract: The dielectric breakdown characteristics of DGEBA/MDA/SN system filled with Al₂O₃ under AC high electric field were investigated. As the filler content increased, the dielectric breakdown strength increased, but decreased at higher filler content than 5 phr. The probability of defects such as air bubbles, peel between filler and epoxy resin insulator, etc. increase proportionally to filler contents. Fillers blockade the treeing growth and relax the electric field at the tip of electrical tree and the treeing propagation rate decreases so that the strength showed higher strength at lower filler content than 5 phr.

에 거의 연구가 진행되어 있지 않으며, 불평등 전계하에서 충전제가 혼입된 에폭시 수지의 절연파괴특성을 교류 고전계를 사용하여 연구한 사례는 적고 불명확한 점이 많다. 본 연구에서는 반응성 첨가제를 도입하여 내충격성을 크게 개선시킨 DGEBA/MDA/SN 수지 계 [4,5]에 Al₂O₃를 충전시키고 충전함량을 달리하여 트링에 의한 절연파괴특성을 연구하였다. 교류고전압을 이용하여 Al₂O₃ 충전된 에폭시 수지의 절연파괴특성에 대하여 조사하고 충전함량이 다른 경우에 절연파괴 전압에 미치는 충전제의 영향에 대하여 연구하였다. 무충전 에폭시 수지 시료 및 충전된 에폭시 수지시료의 두 종류에 대해서 과전열화실험을 실시하고, 절연파괴의 주 요인인 전기트리 현상특성에 대하여 측정하여 고찰하였다.

1. 서 론

최근, 전력수요의 급증에 의한 전력 기기의 고전압화에 따라 고체고분자 절연재료가 더욱 가혹한 환경에서 작동되고 있다. 따라서 전기적, 기계적 성질이 우수한 에폭시 수지가 옥내용 애자, 부상, 계기용 변성기, 개폐기, 몰드 배전용 변압기, 회전기의 절연, 옥외 절연 기기 등 충전기 기기의 절연재료로 광범위하게 사용되고 있다 [1].

에폭시 수지를 절연재료로 사용하는 일반 전기·전자 기기에서 충전제가 혼입된 에폭시 수지 계의 전기절연 특성을 연구하는 것은 제반특성이 우수한 복합재료계 에폭시 수지 전기절연재료를 설계하는 데 있어서 매우 중요하다 [2].

절연체로 사용되는 수지는 수지단독으로 사용하기 보다, 요구하는 특성과 사용목적에 따라 무기분말 충전제를 혼합 사용함으로써 경화수축과 열팽창계수 감소, 기계적 강도, 열전도성, 난연성 및 내아크성 향상, 공업적 재료비 절감 그리고 내트링성 및 내트래킹성 등을 개선시키고 있다 [3]. 그러나 복합절연재료에 있어서 절연파괴의 주요인인 트링현상에 대한 연구는 형상관찰이 어렵기 때문

2. 실험

본 연구에 사용한 시료는 Epon 828 grade의 액상수지 DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol A)를 MDA(4,4'-methylene dianiline)로 경화시킨 것으로 내충격성을 개선시키기 위하여 SN(succinonitrile)을 도입하였으며, 무기물 충전제로 평균입경 45~57 μm, 비유전율 7.0인 Al₂O₃(SG: 3.99)를 사용하였다. 에폭시수지 중합체는 DGEBA:MDA:SN:Al₂O₃의 비율을 중량비(phr)로 100:30:15:x로 하여 x를 0.0, 2.5, 5, 7.5, 10.0 phr로 변화시켜 첨가하였다. 결합과 이물질 주위에서 강화되는 불평등 고전계에 의한 파괴현상을 모의해석하기 위하여 선단곡률반경이 3 μm인 침전극을 삽입하여 성형하였다. 경화시 비중이 큰 충전제의 침강을 막기 위하여 교반하였으며, 기포 유입을 막기 위하여 진공탈포한 뒤 점도가 약 20,000 cps 일 때 주형하였으며, 침-평판전극간 거리는 2 mm로 하였다. 절연유내에서 절연파괴에 이르기까지 교류전계 과전열화를 실시하였으며, 고전계를 인가한 뒤, 얇게 연마하여 침전극 선단에서 발생하는 트링현상을 광학현미경

으로 관찰하였다. 과전열화시키기 위한 인가전압은 AC 60 Hz, 10-20 kV에서 선택하였다. 단 트리형상관찰을 위한 시료는 모두 AC 60 Hz, 15 kV로 하였으며, 모든 파괴전계는 Mason 공식으로부터 구할 수 있는 침전단에서의 강화 최고 전계강도로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 충전제의 함량에 따른 절연파괴 강도를 나타내었다. 충전함량이 증가함에 따라 절연파괴 강도가 증가하였으며, 5.0 phr 이상에서는 오히려 감소하였다. 무충전 에폭시 수지보다 Al_2O_3 충전된 에폭시 수지의 절연파괴 강도가 증가한 것은 무충전 에폭시 수지의 파괴가 트리상이 되는 것으로부터 이 경우 트리의 성장이 충전제에 의해 억제되기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 5 phr 이상 첨가되었을 경우에는 에폭시 수지와 충전제의 유전율의 차이로부터 생기는 충전제 계면에서의 집중전계나 그 계면에서의 약점의 존재에 의해 충전량의 증가와 함께 절연파괴강도가 저하된 것으로 사료된다. 그리고 충전량이 증가함에 따라 충전제의 간격이 상당히 가까워지기 때문에 전압 인가시에 발달된 트리는 곧 다음 입자 계면으로 신장해가고 그리고 차차 트리가 상대전극 방향으로 쉽게 진전하기 때문에 저하하는 것으로 사료된다. 즉, 입자계면에서 집중전계 혹은 입자계면이 약점으로 작용하여, 전파사태가 성장하기 쉽고, 전극간에 존재하는 충전제 입자 계면에서의 전계의 집중효과에 의한 것으로 생각된다. 전계집중효과 외에도 충전제-수지 계면의 화학적 및 물리적 부정(접착 및 밀착 불량, 기공의 존재)에 의한 것으로 고려된다. 그러나 알루미나 충전 에폭시 수지의 절연파괴 강도가 무충전 에폭시 수지보다 높은 것으로부

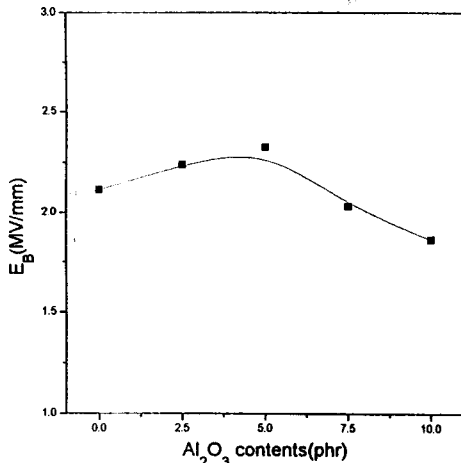


Fig. 1 Effects of Al_2O_3 filler content on dielectric breakdown strength of DGEBA/MDA/SN system

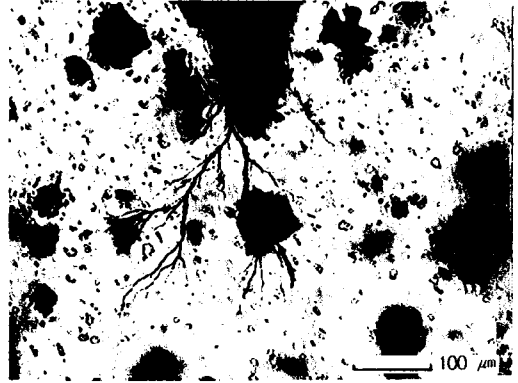


Fig. 2 Electrical treeing phenomena in DGEBA/MDA/SN/ Al_2O_3 (5 phr) composite system under the applied electric stress of 15 kV at 25°C.

터 충전량이 상당히 높아져도 트리가 충전제에 의해 복잡하게 휘면서 진전하기 때문에 어느 정도의 억제 효과가 있는 것으로 사료된다.

Fig. 2는 Al_2O_3 (5 phr)가 충전된 DGEBA/MDA/SN 계에 15 kV 고전계를 인가하였을 때 발생한 절연파괴의 앞 단계인 전기트리 형상을 나타내었다. 절연파괴 직전의 트리 진전현상에 관하여 나타내는 것으로, 전기트리는 고전계가 인가되어 있는 절연재료 내부에 혼입된 도전성 이물질이나 내부적인 결함 그리고 도체 표면의 처리가 불량하여 발생하는 돌출부 등에 전계가 집중하여 발생하는 방전현상이 나뭇가지 모양으로 나타나며, 이렇게 발생한 트리가 성장하여 상대전극에 이르렀을 때 절연파괴가 일어나 전기적인 사고가 발생한다. 그런데 무기물 충전제가 혼입되면 충전제에 의해 성장하는 트리의 진행을 방해하게 되고 충전제에서 전계강도는 완화되어 트리가 성장하지 못하게 된다. 따라서 충전제가 혼입되면 내트링성이 증가하게 되며 절연파괴 강도는 증가하게 된다. 그러나 충전제와 수지의 접촉불량 및 내부에 혼입된 기포의 양이 증가하게 되면 오히려 전계가 집중되어 트리가 발생할 확률이 증가하게 되며, 따라서 절연파괴 강도는 감소하게 된다. 그러나 충전시 기포혼입을 최소화하고 충전제의 표면처리를 통하여 계면 접착력을 개선시키면 높은 충전함량일때도 절연파괴 강도는 높은 값을 유지할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3은 성장된 트리가 상대전극에 이르렀을 때 급격한 방전현상으로 인해 발생한 전로파괴 현상이다. 충전제의 트리진전 억제 효과의 효과도 수명연장이라는 관점에서부터 트리진전 억제효과가 수명연장에 기여하는 것이라고 기대할 수 있는 것은 금속성 무기분말 때문에 트리의 생성 및 절연파괴 특성에 영향을 미칠 수 있다는 것이다. 이러한 절연파괴 형상을 관찰하기가 용이하지 않지만 이

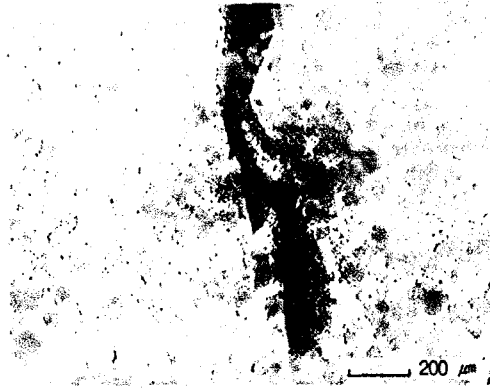


Fig. 3 Fig. Dielectric breakdown phenomena in DGEBA/MDA/SN/Al₂O₃(30 phr) system under 20 kV for 60 secs at 25°C.

와 같은 실험조건에서는 충격파에 의한 부채꼴 파괴로는 관찰되지 않는다. 침전극으로부터 개시된 트리가 상대전극으로 진전하다가 충전제에 의해 저지되면서 트리선단의 곡률반경이 충전제의 반경과 동일하게 되어 전계가 완화되면서 트리의 진전속도가 감소하게 된다. 그러나 불충분한 접착은 오히려 전계를 집중시키거나 방전에 의해 생성된 라디칼이 내부에 존재하는 기체성분과 결합하여 트리의 진전속도를 증가시킬 수 있다. 따라서 복합절연재료 설계시에는 충전제와 수지의 계면상황이 반드시 고려되어야 한다. 전극간에 존재하는 충전제 입자 계면에서 전계집중 및 충전제와 수지 계면에서 접착 또는 밀착이 양호하지 않고 기포가 존재하면 절연파괴강도가 대폭 감소하는 것으로 보고되어져 있다. 따라서 결합제를 도입하여 계면접착력을 개선시킬 수 있는 방안도 함께 모색되어야 한다. 그리고 진전되는 트리 및 절연파괴 형상에 대한 연구가 계속 진행되어야 한다.

4. 결 론

Al₂O₃ 충전된 DGEBA/MDA/SN 계의 교류 고전계 하에서의 절연파괴 특성에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al₂O₃의 함량이 증가함에 따라 절연파괴 강도는 증가하다가 5 phr 이상에서는 감소하였다.
2. 충전제는 전기트리 선단에서의 전계를 완화시키는 역할을 하여 평판전극 방향으로 성장하는 전기트리의 성장속도를 둔화시켰다.
3. 충전제의 함량이 증가함에 따라 결합과 기포 및 충전제와 수지 계면에서 박리현상이 증가할 확률이 증가하므로, 트리의 발생이 용이해지고 절연파괴 강도는 감소되었다.
4. 기포 유입을 막고, 계면 박리현상을 억제하기 위하여 충전제 표면을 화학적 결합제나 물리화학적 처리에 의해 절연파괴강도를 증가시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. H. Fujii and E. Hirasawa, *T. IEE Japan*, 107-A, 531(1987)
2. Y. Kitamura and S. Hirabayashi, *ibid.*, 106-A, 506 (1986)
3. S. Fujita and F. Noto, *ibid.*, 108-A, 223(1988)
4. Y.S. Cho, M.J. Shim, and S.W. Kim, *J. Korean Ind. and Eng. Chem.*, 6, 1156(1995)
5. Y.S. Cho, M.J. Shim, and S.W. Kim, *IUMRS-ICA-95 Seoul*, 453(1995)