

A Study on the Insulation Characteristics of Epoxy Composites Using Electric Field Simulation

Deok-Jin Lee*

*Professor, Dept. of Aviation and IT Convergence, Far East University, Chungcheongbuk-do, Korea

[Abstract]

In this paper, we aimed to identify the insulation characteristics and reliability of Epoxy composites, which are widely used as insulation material for electrical & electronic components and electric appliance. To this end, it was necessary to predict variations of electric field due to the distribution of fillers that must be added by economic and mechanical factors. So, we verified the result using an electric field analysis Simulator. Furthermore, under the condition of DC voltage application, an dielectirc breakdown test was performed according to ambient temperature changes and the distribution of fillers, and the changes were observed. Three types of specimens were manufactured by adding 0, 50 and 100[phr] filling to Epoxy resin. In all specimens, as temperature was increased, the strength of the dielectric strength was decreased. When comparing the simulation results with the actual dielectric breakdown test results, we was able to confirm the technical applicability required for Insulation design of electric appliance.

▶ **Key words:** Epoxy composites, Insulation characteristics, Dielectirc breakdown test, Filler, Electric field analysis

[요 약]

본 논문에서는 전기 전자부품 및 기구의 절연재료로 널리 적용되고 있는 에폭시 복합재료의 절연 특성 및 신뢰도를 파악하고자 한다. 이를 위해 경제적, 기계적 요인에 의해 필수적으로 첨가되어야 하는 충전재의 분포에 따른 전계 변화를 예측하기 위하여 전계해석 시뮬레이터를 이용하여 그 결과를 확인하였다. 또한 직류 전압 인가 조건하에서 주변 온도 변화 및 충전재 분포에 따른 절연파괴시험을 수행하였고 그 변화를 관찰하였다. 시편은 에폭시 수지에 충전재를 0, 50, 100[phr] 첨가하여 3종류가 제작되었으며 모든 시편의 경우에서 온도가 증가함에 따라 절연파괴강도가 저하됨을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 및 실제 절연강도시험 결과를 비교 고찰하여 전기 기구의 절연설계에 필요한 기술적 적용 가능성을 확인하였다.

▶ **주제어:** 에폭시 복합체, 절연특성, 절연파괴시험, 충전재, 전계해석

-
- First Author: Deok-Jin Lee, Corresponding Author: Deok-Jin Lee
 - *Deok-Jin Lee (djlee@kdu.ac.kr), Dept. of Aviation and IT Convergence, Far East University
 - Received: 2021. 01. 14, Revised: 2021. 02. 22, Accepted: 2021. 02. 22.

I. Introduction

에폭시 수지, 실리콘 고무, 폴리에틸렌 등과 같은 고분자 복합재료는 매우 오래 전부터 전력설비용 절연재료로서 널리 개발 적용되어오고 있으며, 이 중 에폭시수지는 상온 또는 가열에 의해 수지 전체가 100[%] 반응 고화하는 열 경화성수지로서 내전압특성, 내마모성 등의 기계적 특성이 우수하며 경화시의 수축이 적고 습기가 있는 곳에서도 접착력을 잃지 않아 작업성이 좋아 옥내·외용 전력기기의 합침 절연, 선간 절연 및 케이블류의 접속부 절연재료로서 그 성능을 인정받고 있다[1-5]. 또한, 전기·전자기기의 소형화, 경량화 추세에 수반한 운전 온도의 상승 및 유효 절연 두께의 박막화가 이루어지고 있는데 이에 대응하기 위해서는 절연 재료의 온도 특성, 특히 고온에서의 절연 성능 향상이 필수적인 과제라고 할 수 있다[6-8]. 이와 더불어 에폭시수지 자체의 부서짐(brittleness) 성질을 개선하여 기계적 강도를 강화시키고 제조 비용의 절감효과를 목적으로 블렌딩 과정에서의 충전재의 첨가는 필수적인 요소로 받아들여지고 있다[9-10].

본 연구에서는 전기적 부하가 걸려있는 상태에서의 에폭시수지 내부의 충전재 분포가 전극 간에 형성된 전계에 어떠한 변화를 일으키는지 예측하여 첨가되는 충전재의 적정한 분포도를 결정하기 위한 과정으로 전계해석 시뮬레이터를 이용하여 그 결과를 확인하였다. 이를 위해서 충전재와 에폭시수지의 물성을 파악하고 형상 설계를 위한 시뮬레이션 파라미터를 도출하였으며 설계된 형상에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 또한 실제 사용환경과 비교하기 위한 목적으로 직류 전압 인가 조건하에서 주변 온도 변화 및 충전재 분포에 따른 절연파괴 시험을 수행하였고[11-13] 시뮬레이션 결과 및 실제 절연파괴시험 결과를 비교 고찰하였다.

II. Preliminaries

1. Related works

고체 유전체에 전압을 인가할 때 낮은 전압에서는 오음의 법칙에 의해 전류가 직선적으로 증가하고, 점점 전압이 높아짐에 따라 지수함수적으로 증가하다가 고전압 영역에서는 더욱 더 급격히 증대되어 절연 파괴가 발생한다. 이것은 자유롭게 이동하는 캐리어가 거의 없는 고체 유전체 내에서 캐리어가 급증하여 절연체의 성질을 잃고 전기 양도체화 되어 양 전극 사이가 단락 상태로 되기 때문이다.

이와 같은 현상을 절연 파괴라 하고 이 때의 전압을 절연 파괴 전압(dielectric breakdown voltage)이라 한다. 또한 이 때의 최대 전위 경도를 절연 파괴 강도라 하고 절연체가 고전압에 견디는 능력을 절연 내력(dielectric strength)이라고 하며 [MV/cm]또는 [MV/m]가 사용된다. 이와 같이 절연 파괴 전압은 절연체가 그 절연 성능을 유지하는 한계를 의미하며, 전기, 전자 부품 및 기기의 성능 및 수명을 지배하는 중요한 역할을 하고 있다.

일반적으로 절연 파괴 강도는 온도에 무관한 영역과 온도 상승과 더불어 그 강도가 감소하는 영역으로 나누어진다.

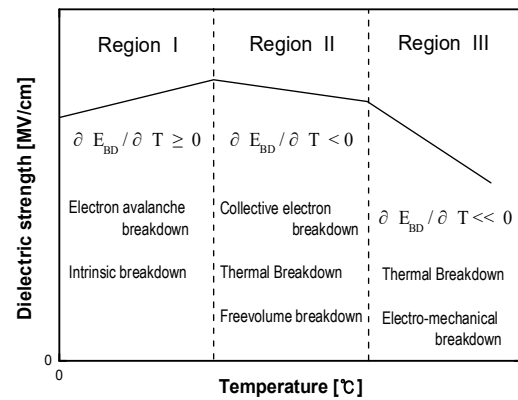


Fig. 1. The temperature dependence of dielectric strength in solid dielectric

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. 무극성 고체 유전체의 경우 I 영역과 II영역간의 임계 온도가 분명히 존재 하지만 극성 고체 유전체의 경우에는 그 임계 온도가 분명하지 않다. II, III영역에서 주도적으로 작용하는 순열파괴는 거시적으로 절연체 내에서 열입력과 열방산의 평형이 되지 않을 때 발생한다. 전력이 절연에 의해 소비될 때 발생하는 열은 많은 캐리어들을 이동시켜서 절연체의 도전성을 지수함수적으로 증가시키며, 또한 열에 의한 분자쇄편의 운동이 진성 이온 전도의 형태로 이동도를 증가시킬 수도 있다[14-17]. 전기기기의 사용환경이 주로 고온임을 감안할 때 절연체 단위 체적당의 열 발생율과 주변으로의 열 방산율의 평형을 유지하는 동시에 기계적 강도를 보강하는 차원에서 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃) 등과 같은 무기질의 충전재를 첨가하여 가공하고 있으며 그 중 실리카는 열분해온도, 유리전이온도 및 열팽창 계수 등의 개선으로 복합재료의 열안정성을 증가시켜주는 것으로 확인되었다.

III. Experimental and results

1. Conditions for electric field analysis

1.1 Shape design

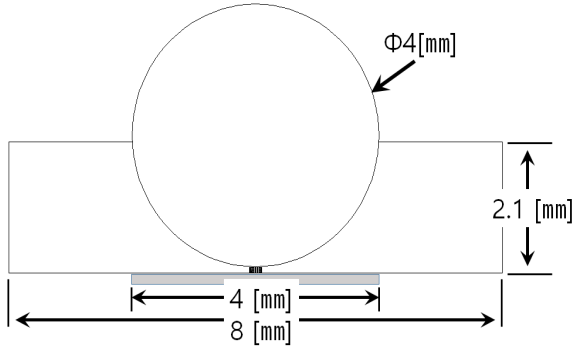


Fig. 2. Shape of specimen

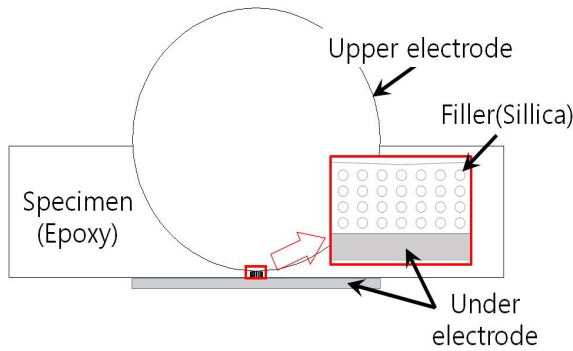


Fig. 3. Magnified distribution form

충진재의 분포에 따른 전계 집중현상을 파악하기 위해 전계해석 프로그램(FLUX)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다[18-20]. 시편의 형상은 절연파괴강도 측정을 위해 제작되는 것과 동일하게 구대 평판 전극을 적용하였으며, 구전극의 지름은 4,000[μm]이다. 시편의 크기는 8,000[μm] \times 8000[μm] \times 2100[μm]로 설계하였으며 하부전극은 직경 4,000[μm]의 은전극으로 처리하여 전극 간 절연층의 두께가 100[μm]가 되도록 하였다. 무충진 시편의 경우 전극 간 물질은 에폭시수지만 존재하는 것으로 하고 100[phr] 충전 시편의 경우 전극 사이에 4개의 충전재 입자가 존재한다고 가정하여 형상을 구현하였다.

1.2 Parameter setting

표 1은 시뮬레이션 및 절연파괴시험 시편 제작에 사용된 에폭시수지와 충전재 SiO_2 의 비중, 비유전율 및 입자의 크기를 나타낸다[12]. 이 값들로부터 충전재가 100[phr]로

균일하게 분포된 가로, 세로 및 두께가 8,000[μm] \times 8000[μm] \times 2100[μm]인 시편의 경우를 가정하면 충전재 1라인에 약 336개의 입자가 13.8[μm]간격으로 배치하는 것으로 계산된다. 이 경우에 상부전극과 하부전극 사이에는 약 4개의 충전입자가 삽입될 것으로 추정되며 이에 맞춰 형상을 결정하였다.

Table 1. Characteristics of SiO_2

Materials	Specific gravity	Relative permittivity (ϵ_r)	Size [μm]
Resin(EPOXY)	1.2	3	-
Filler(SiO_2)	2.65	4.5	10

시뮬레이션은 그림 4에서 보는 바와 같이 수평축으로 상부전극부분(H-1)과 하부전극부분(H-2)을 조사하였으며, 수직축으로는 전극간 거리가 가장 짧은 위치(V)의 전계 분포를 측정하였다.

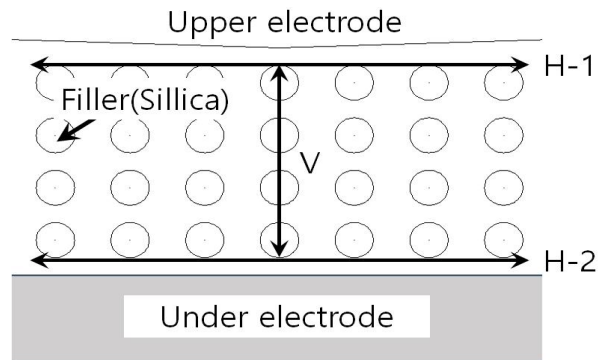


Fig. 4. The location where the electric field was measured

2. Dielectric breakdown test

2.1 Preparation of the specimen

본 실험에서는 비스페놀 A형 에폭시수지에 경화제, 중합개시제 및 충전제를 혼합하여 진공 가열 교반장치에 넣고 80[$^{\circ}\text{C}$]에서 1시간 30분 동안 교반한 후 미리 제작해 놓은 금형에 주입, 90[$^{\circ}\text{C}$]에서 2시간 동안 1차 경화시킨 후 다시 150[$^{\circ}\text{C}$]에서 8시간 동안 2차 경화를 시켜 시편을 제작하였다[18-19]. 제작된 시편의 형상은 그림 1과 같으며 충전재 함량에 따라 표 2와 같이 각각 S-0, S-50 및 S-100으로 표기하였다.

Table 2. Classification of sample

Classification	Filler (SiO_2)		
	0 [phr]	50 [phr]	100 [phr]
Specimen Code	S-0	S-50	S-100

2.2 Process of dielectric breakdown test

시편의 절연파괴강도는 고전압 발생기(Pulse Engineering Co. Ltd)를 사용하여 측정하였다. 0.5[kV/s]의 승압속도로 절연 파괴가 일어날 때 까지 직류전압을 인가하여 파괴시점의 전압값을 측정하였다. 충전재 첨가의 긍정적 효과를 확인하기 위해 시료가 들어있는 실리콘유 의 온도를 50[°C], 70[°C], 90[°C], 110[°C], 130 [°C], 160 [°C] 및 190 [°C]로 변화시키고, 각 온도에서 시료를 5분간 예열한 후 시료의 절연파괴강도를 측정하였다. 절연파괴 실험장치의 구조는 그림 5와 같다. 측정회수는 동일 조건 하에서 10개의 시료를 취하여 그 평균값을 파괴전압으로 하였다. 또한 충전재 함량에 따른 절연파괴전압의 변화를 측정하기 위해 S-50 시편의 절연파괴시험을 수행하였다.

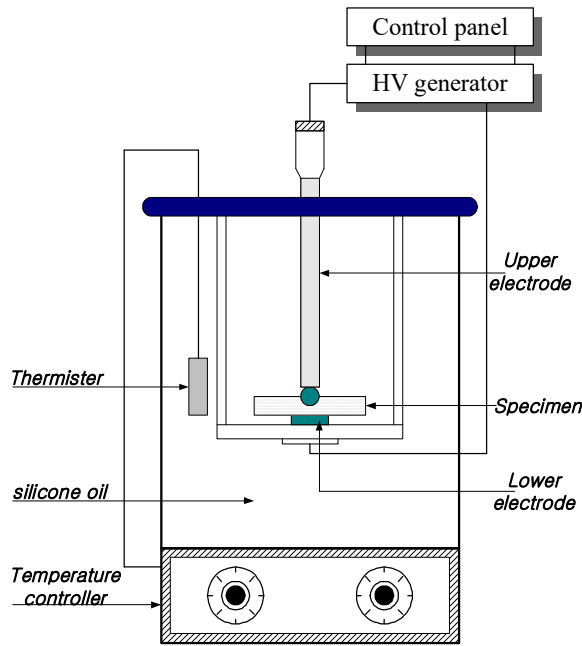


Fig. 5. Schematic diagram of Dielectric breakdown test apparatus

3. Results of electric field analysis

그림 6은 S-0 시편의 전계분포를 나타낸다. 전극간 거리가 가장 짧아지는 중심 부분으로 접근할 수록 전계의 세기가 점점 커지는 것을 확인할 수 있으며, 1.00967×10⁹ [V/m]의 최대 전계값이 전극간 거리 100[μm] 위치에서 나타남을 확인할 수 있었다.

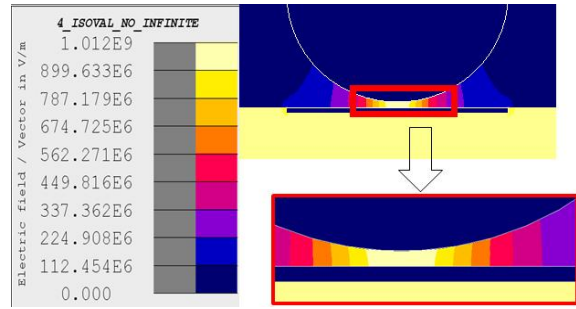


Fig. 6. Electric field distribution in S-0 specimen

그림 7과 그림 8은 충전재를 첨가한 상태에서의 전계분포도를 나타낸 것으로 그림 7은 전극 최단거리 부분에 고르게 분포되어 있는 것을 모의하였고, 그림 8은 그림 7의 형상을 간소화하기 위해 전계가 집중되는 위치에만 한 줄로 충전재를 배치한 경우의 전계분포도를 나타내고 있다.

그림 7에서 충전재가 고르게 분포된 경우 충전재의 계면 주변에서 전계가 강화되어 최대 1.265×10⁹[V/m]의 전계가 집중되는 반면, 충전재의 내부에서는 8.301×10⁸[V/m]로 급격히 떨어진다. 그림 8에서도 동일한 모습을 나타내고 있으며, 전계의 세기만 계면에서 1.248×10⁹ [V/m]이며, 충전재 내부에서는 8.321×10⁸ [V/m]으로 고르게 분포된 계면에 비해 약간 줄어들었으며, 내부에서는 약간 커짐을 확인할 수 있다.

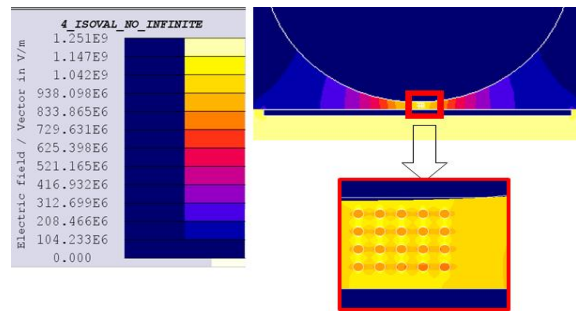


Fig. 7. Electric field distribution in S-100 specimen (assuming five lines)

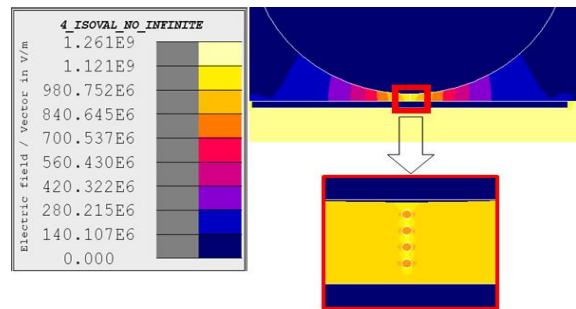


Fig. 8. Electric field distribution in S-100 specimen (assuming single line)

그림 9는 전극사이의 최단거리상에 한 줄로 충전재를 배치한 경우와 여러 줄로 배치한 경우에 수직상 위치에서

의 전계분포도를 나타낸 것이다. 계면에서는 여러 줄이 있을 때가 전계가 높고, 충전재 내부에서는 한 줄로 나열할 때가 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 이 경우에도 그림 7 및 그림 8의 경우와 같이 충전재를 한 줄 배치했을 때와 여러 줄 배치했을 때의 차이가 약 1[%] 이내로 나타난다. 이것으로 볼 때 시뮬레이션 상에서 충전재를 전체적으로 꼭 채워 배치하지 않고 전계가 집중되는 곳에만 충전재를 삽입한 후 시뮬레이션을 수행하여도 충분히 응용 가능한 결과를 얻을 수 있다고 사료된다.

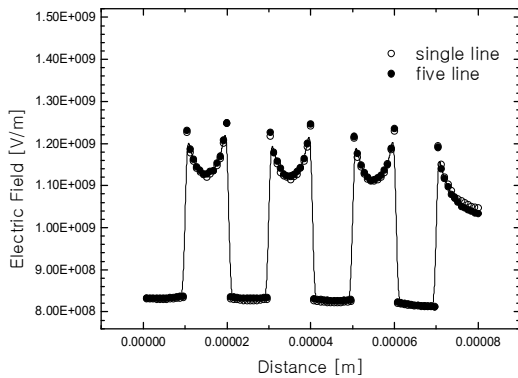


Fig. 9. Electric field distribution in S-100 specimen(measured on vertical axis)

그림 10은 충전재 유무에 따른 수직상 위치에서의 전계 분포도를 나타낸 것으로 S-0에서는 선형적으로 전계의 세기가 감소함을 확인할 수 있었다. S-100에서는 에폭시 영역에서는 1.1배로 전계가 증가하며 충전재와의 계면에서 1.2배로 증가했으며, 충전재 내부에서는 0.84배로 감소함을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 충전재 유전율이 에폭시보다 높기 때문에 충전재 내부의 전계 집중은 감소하지만, 충전재 표면에서는 계면이 형성되어 전계의 집중을 유도하고 있기 때문이라고 판단할 수 있다.

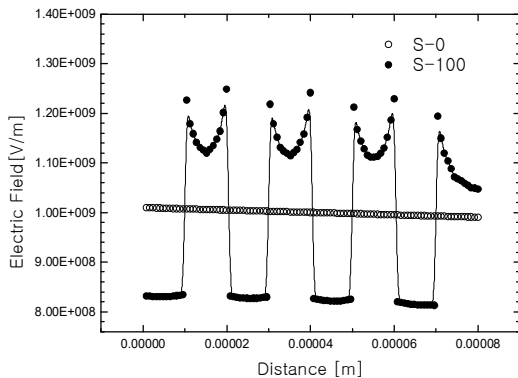


Fig. 10. Electric field distribution in S-0 and S-100 specimen(measured on vertical axis)

그림 11은 수평상 위치에서의 전계분포를 나타낸 것으로 상부전극 근처(V-1)에서 나타나는 전계의 변화를 나타내고 있다. 구전극의 곡선면에 의해 하부 평판전극과 거리가 멀어지면서 전계의 세기는 감소함을 확인할 수 있었으며, 전극간 거리가 가장 가까운 중심에서 가장 높은 전계가 나타났다. S-100의 경우 이 점은 충전재의 계면위치와 일치하여 급격하게 전계가 증가하게 되어 S-0의 경우 1.2 배 높게 나타남을 확인할 수 있다.

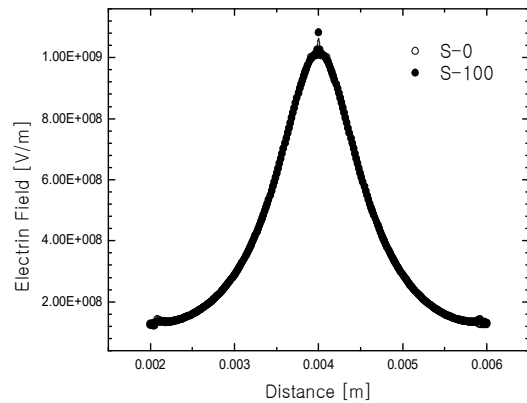


Fig. 11. Electric field distribution in S-0 and S-100 specimen(measured on horizontal axis H-1)

그림 12는 하부 전극(H-2) 부근 수평상 위치에서의 전계 분포도를 나타낸다. 상부전극 부근과 유사한 형태로 전극 간의 간격에 따라 전계의 집중도가 변화하다가 중심부근에서 S-100은 S-0에 비해 0.84배의 크기를 나타냈다. 또한 양 끝단에서는 전계가 커지는 현상이 일어나는데 이는 하부전극의 모서리 부분으로 하부전극의 엷기 부분에 전계가 집중된 결과로 보여진다.

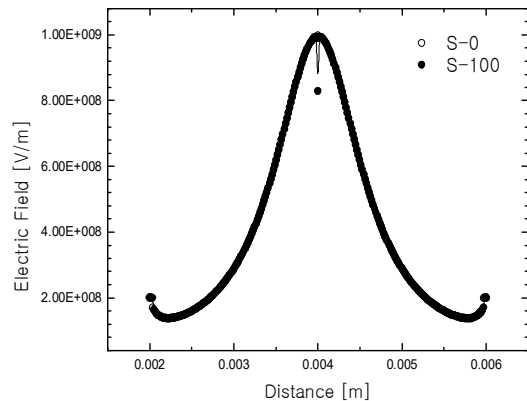


Fig. 12. Electric field distribution in S-0 and S-100 specimen(measured on horizontal axis H-2)

4. Results of dielectric breakdown test

4.1 Temperature dependence of dielectric breakdown strength

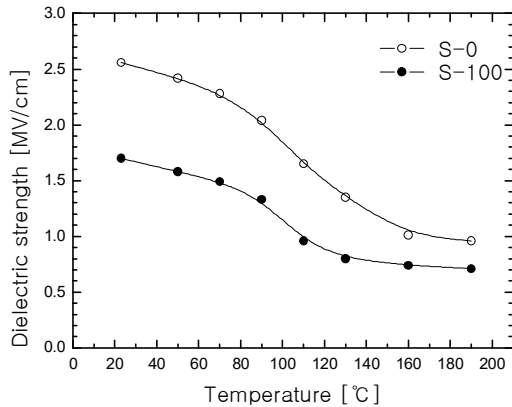


Fig. 13. Temperature dependence of DC dielectric strength

그림 13은 온도변화에 따른 절연파괴강도의 변화를 나타낸다. 저온영역은 전자사태파괴기구[21]가 지배하는 영역으로 볼 수 있는데 일반적으로 온도가 증가할수록 전자의 평균자유행정이 조금씩 짧아져서 미미하기는 하지만 파괴전압이 증가하게 된다. 하지만 그림12에서는 파괴전압이 약간 낮아지는 것을 볼 수 있는데 이는 전자의 평균 자유행정이 길어지는 시편 내부의 결함에 의한 것이라 추측된다. S-100의 절연파괴강도가 S-0에 비해 낮게 나타난 것도 충전재와 에폭시수지간의 계면에서의 전계집중으로 인한 결과로 볼 수 있다. 온도가 증가하면서 전계에 의해 가속되어 동적에너지를 가지게 된 전자가 분자와 충돌하여 국부적으로 구조를 변형시키고 결합절단이 발생할 때까지 자유체적을 확장시켜 절연파괴강도가 급격히 감소하게 된다. 160[°C]이상의 고온영역은 순열파괴의 정상열 파괴가 지배적인 영역으로 고온에서 열적으로 해리 또는 불순물 이온의 해방으로 전하밀도의 급격한 증가가 나타나고 이것이 절연파괴의 주요 원인으로 작용하게 된다. 이때 에폭시수지보다 열전도율이 약 6배 정도 높은 충전재 입자 부근보다는 계면에서 떨어진 에폭시수지 단체 부분에서 절연파괴가 발생할 확률이 높다고 판단되며 결과적으로 전기기구의 주된 사용환경이 고온영역임을 고려할 때 충전재의 첨가는 기능적, 경제적으로 매우 의미있는 효과를 가져올 것으로 사료된다.

4.2 Filler content dependence of dielectric breakdown strength

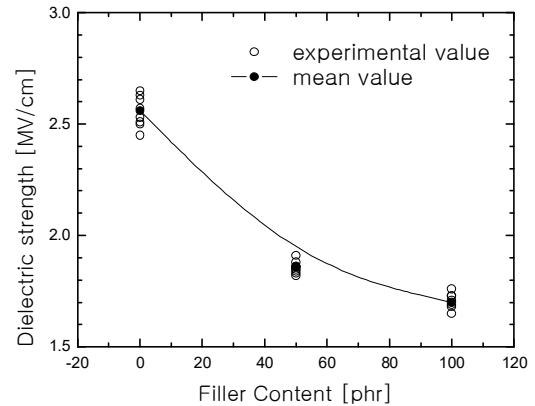


Fig. 14. Dielectric strength due to filler content variation

에폭시 수지는 경화시에 1~5[%] 수축을 하는데, 이러한 수축도는 SiO_2 와 같은 비수축성 충전제의 높은 중량비의 첨가로 0.25[%] 정도로 낮아진다. 그림 14는 상온에서 충전재 함량변화에 따른 직류전압 절연파괴강도의 변화를 보여준다. S-0, S-50 및 S-100 시편을 시험한 결과값을 각각 8회씩 플로팅하였고 평균값을 계산하여 입력한 후 추세를 확인하였다. 충전재 함량이 증가함에 따라 절연파괴강도는 감소되는 경향을 볼 수 있는데 이러한 경향의 주요 원인은 비교적 실온 부근에서의 절연 파괴 기구는 열이 개입되지 않는 전자 사태 파괴이기 때문이라고 생각된다. 이것은 4.1절에서도 서술되었듯이 충전재와 에폭시수지 사이의 계면으로 전계가 집중되어 전로 형성이 용이하기 때문에 계면이 전기적 약점으로 작용하는 것으로 판단된다.

IV. Conclusions

본 연구에서는 전계해석 시뮬레이터를 이용하여 충전재의 분포에 따른 에폭시복합재료의 전계 변화를 분석하였고 직류 전압 인가 조건하에서 주변 온도 변화 및 충전재 함량변화에 따른 절연강도 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충전재가 첨가되지 않은 S-0 시편의 전계분포에서 전극간 거리가 가장 짧아지는 중심쪽으로 접근할 수록 전계의 세기가 점점 커지는 것을 확인하였다.
- 2) 전계해석 시뮬레이션에서 충전재를 여러 줄로 배치한

경우와 전계가 집중되는 부분에 한 줄로 배치했을 경우 충전재 부근의 전계를 비교한 결과 그 차이가 약 1%이내로 거의 동일한 결과를 나타내었다.

3)전극 간 전계의 수직상의 분포 결과에 따라 에폭시 영역에서는 1.1배, 충전재와의 계면에서 1.2배로 전계가 증가하였으며 충전재 내부에서는 유전율의 증가로 인해 전계는 0.84배 감소한 것으로 나타났다.

4)전극 간 전계의 수평상의 분포 결과에 따라 전극간 거리가 최소인 위치에 접근할 수록 전계가 증가하였으며 충전재와의 계면과 만나는 점에서 1.2배만큼 급격하게 증가함을 확인하였다.

5)온도변화에 따른 절연파괴강도의 변화를 고찰한 결과 전기기구의 주된 사용환경이 고온영역을 고려할 때 충전재의 첨가는 기능적, 경제적으로 반드시 필요한 요소임을 확인하였다.

6) 시뮬레이션 결과와 절연파괴시험 결과를 고찰한 결과 두 경우 모두 충전재 첨가시 충전재와 에폭시수지 사이의 계면으로 전계가 집중되어 절연파괴의 약점으로 작용하는 것으로 확인되었다.

에폭시수지와 충전재 입자간의 계면에 대한 정밀한 모델링과 재료의 물성에 대한 데이터를 보다 정확하게 취득할 수 있다면 절연설계 및 제품 개발 시 전계 해석 시뮬레이션으로 실제와 유사한 결과를 미리 예측할 수 있음을 확인하였고 이를 통해 많은 비용 및 시간을 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기구의 다양한 형상, 수지-충진재 계면 및 크랙과 같이 제조 과정에서 발생할 수 있는 약점들에 대한 모델링을 구현하여 향후 절연체의 안전검사용 비전시스템에 응용 가능한 신뢰성 있는 데이터베이스를 구축하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the 2020 Far East University Research Grant(FEU2020R18)

REFERENCES

- [1] Povilas Bertasius, "Dielectric Properties of Epoxy-Matrix Composites with Tungsten Disulfide Nanotubes", *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2019, 2019. DOI:https://doi.org/10.1155/2019/5761439
- [2] T. Candra, "Advanced Composites", A publication of the minerals, & metals society, pp. 771-941, 1993.
- [3] Dongxian Zhuo, "Flame retardancy effects of graphene nanoplatelet/carbon nanotube hybrid membranes on carbon fiber reinforced epoxy composites." *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2013, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/820901>
- [4] B. Ellis, "Chemistry and Technology of Epoxy resins", Blackie Academic & Professional, pp. 29-35, 1993.
- [5] Kim Sung Tae, "Development Trend for Thermoplastic Polymer Composite", *Polymer Science and Technology*, Vol. 24, pp. 25-29, 2013.
- [6] Sakshi Singh, "Breakdown Strength Estimation of Non-Cellulosic Insulating Materials Used in Electrical Power Equipment", *TEEM*, Vol. 18, No. 6, pp. 338-340, December 25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.6.338>
- [7] M. Schwartz, "Encyclopedia of Materials, Parts and Finishes", CRC Press, p. 190. 2002.
- [8] R. Arora and W. Mosch, "High Voltage Insulation Engineering: Behavior of Dielectrics; Their Properties and Applications", New Age International Ltd., p. 236. 2008.
- [9] D. J. Lee, "A Study on the Variations of Mechanical and Electrical Property of Epoxy Composites due to Boiling Absorption", *Journal of KIIEE*, Vol.14, No.1, pp. 53-58, 1997.
- [10] Richard A. Pethrick, "Dielectric, Mechanical and Structural and Water Absorption Properties of a Thermo-plastic Modified Epoxy Resin", *Macromolecules*, 29, pp. 5208-5214, 1996.
- [11] Jaejun Park, "Long-term and Short-term AC Treeing Breakdown of Epoxy/Micro-Silica/Nano-Silicate Composite in Needle-Plate Electrodes", *TEEM*, Vol. 13, No. 5, pp. 252-255, October 25, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/TEEM.2012.13.5.252>
- [12] Jae-Jun Park, "Electrical Insulation Breakdown Strength in Epoxy/Spherical Alumina Composites for HV Insulation", *TEEM*, Vol. 14, No. 2, pp. 105-109, April 25, 2013 DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/TEEM.2013.14.2.105>
- [13] J. H. Kim et al., "A Study on the AC Dielectric Breakdown Characteristics and Mechanical Characteristics of Interpenetrating Polymer Network Epoxy Composites", *Trans. of KIEEME*, Vol.9, NO.7, pp.702-707, 1996.
- [14] L. A. Dissado, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Redwood Press, pp. 242-261. 311-316, 1992.
- [15] Kouichi Tanaka, "A molecular dynamics study on thermal conductivity of thin epoxy polymer sandwiched between alumina fillers in heat-dissipation composite material", *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 89, pp. 714-723, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.080>
- [16] Yunmin Liang, "Effects and mechanism of filler surface coating strategy on thermal conductivity of composites: A case study on epoxy/SiO₂-coated BN composites", *International journal of heat*

and mass transfer, Vol. 164, 2021.

- [17] Ya-Fei Zhang, "Vertically aligned graphene film/epoxy composites as heat dissipating materials", International journal of heat and mass transfer, Vol. 118, pp. 510-517, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.014>
- [18] J. K. Sung, "Optimum Insulation Design of 500 kV HVDC Polymer Insulator Based on DC Electric Field Simulation Techniques", Hanyang University, pp. 6-9, 2015.
- [19] H. S. Jung, "Analysis of Electric Fiele for Mold Transformer using Finite Element Method", Hoseo University, pp. 11-12, 2009.
- [20] In-Bum Jeong, "Electrical Insulation Properties of Nano composites with SiO₂ and MgO Filler', TEEM, Vol. 11, No. 6, pp. 261-265, December 25, 2010 DOI: 10.4313/TEEM.2010.11.6.261

Authors



Deok-Jin Lee received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Kwangwoon University, Korea, in 1993, 1995 and 2000, respectively. Dr. Lee is currently a professor in the department of aviation and

IT convergence, Far East University. He is interested in insulation design and sensor system design.