

절연 파괴 데이터를 이용한 에폭시 복합체의 절연 신뢰도 평가

박건호

청강 문화산업 대학

Evaluation of Insulating Reliability in Epoxy Composites using Dielectric Breakdown Data

Geon-Ho Park

Chungkang College of Cultural Industries

Abstract

In this study, the DC dielectric breakdown of epoxy composites used for molding material was experimented and then its data were simulated by Weibull distribution equation. From the analysis of Weibull distribution, it was confirmed that as the allowed breakdown probability was given by 0.1[%], the applied field value needed to be under 21.5[kV/mm].

Key Words: DC dielectric breakdown, Weibull distribution equation, Breakdown probability

1. 서론

절연 구성의 고전제화에 대처하기 위해서는 전기 절연성을 미시적 관점의 물성론에 입각한 해석이 선행되어야 한다. 이로부터 기존 재료의 특성 개선 및 새로운 재료의 개발에 있어 기본 개념을 얻는데 유용한 것으로 재료의 정제(精製), 특히 각종 결함을 제거하는 제조·공정의 개발과 장기 수명(Life Time)을 지배하는 각종 절연 열화 현상의 해명 시 물성론에 기초한 이론적 해석이 요망되므로 절연에 대한 정확한 이해와 우수한 절연 재료의 개발을 통해서 앞으로의 전기·전자 부품 분야의 비약적인 발전이 이루어질 수 있다.^{1,2)}

유기 고분자 재료는 우수한 절연성을 가지고 있으나 일반적으로 시간의 경과에 따라 구성 재료의 변질에 의해 기기 및 부품의 성능은 떨어지는데 이러한 현상은 통상 품질의 저하를 초래하여 사고를 유발하므로 안정된 시스템을 구축하기 위해서는 구성 재료의 열적, 기계적, 화학적 및 경년(經年) 열화에 대한 제 현상론의 이해와 열화 진단에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다. 그러므로 현재 이뤄지고 있는 전력 분야에서의 계통의

초고압화 및 제반 송배전 계통의 안정성을 도모하기 위하여 여러 가지 연구가 수행되고 있으며, 고전압 또는 고전계 기술에 있어서 절연 파괴 전압이나 임의의 일정 전압이 인가될 때, 수명 시간에 관한 데이터는 매우 중요하며 특히 절연 진단 시에 비절연 파괴와 절연 파괴 사이에 관계를 나타내는 데이터 또한 중요하다. 그러나 이들 수명 시간 및 절연 파괴에 관한 데이터는 일반적으로 산만하고 흐트러져 있어서 일정한 통계 처리하여 정량적으로 평가할 필요가 있다.³⁾

2. 실험

2-1. 사용 시료

본 연구에서 사용된 시료는 상온에서 액상인 비스페놀-A형인 에폭시 수지와 산무수물 계통의 경화제인 MeTHPA(Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 임의의 일정 배합 비율로 하여,⁴⁾ 1차 경화(100[°C], 2[hrs]) 및 2차 경화(140[°C], 6[hrs])시켰으며 유연제인 DY-040을 5[wt%] 첨가하여 충격 강도와 인장 강도를 개선시켰고, 기계적 및 열적 특성을 보완하기 위하여 충전제로 실리카(SiO₂)를 첨가하였다.^{5,6)} 또한, 충전제의 표면 처리

에 쓰이는 계면 결합제로서 아미노 실란 계통을 사용하여 제조하였다. 표 1에 시료의 조성비를 나타내었고, 그림 1에 시편의 제작 과정을 나타내었다.

표 1. 시료의 조성비

시료	에폭시	경화제	유연제	충진제	경화 조건
H 80FN	100	80	5	0	▶ 1차; 100[°C] ×2[hrs]
H 90FN	100	90	5	0	
H100FN	100	100	5	0	
H100F60	100	100	5	60	▶ 2차; 140[°C] ×6[hrs]
SH100F60	100	100	5	60	

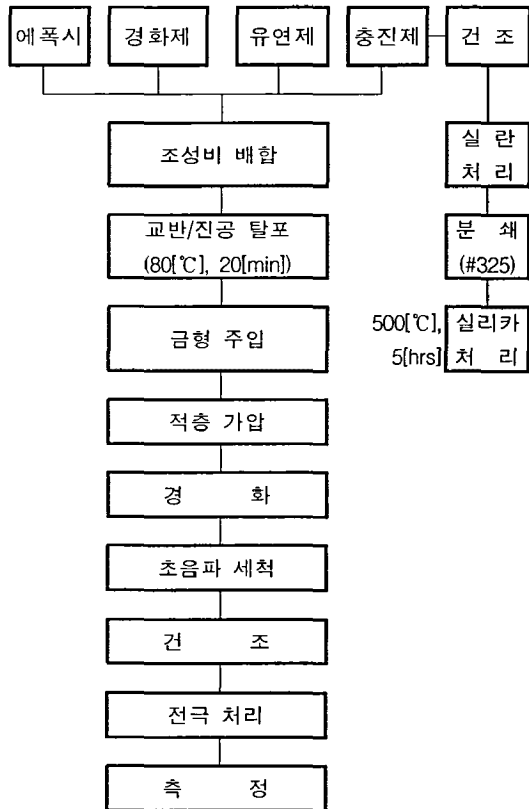


그림 1. 시료의 제작 과정

2-2. 실험 방법

절연 파괴 실험 장치는 그림 2와 같이 구성하였

다. 연면 방전을 방지하기 위하여 탈기 처리한 실리콘 오일 중에서 온도 범위 20[°C]~160[°C]로 변화시키면서 직류 전압의 승압 속도를 1[kV/sec]로 하여 절연 파괴가 일어날 때까지 승압하면서 측정하였다. 그리고 측정 회수는 동일 조건에서 10개의 시편을 취하여 그 평균값을 파괴 전압으로 하였으며, 절연 파괴 실험용 시편은 직경 4[mm]의 스테인리스 강구를 두께 3[mm]인 에폭시에 상부 전극으로 매입하여 제작하였고, 전극간의 거리는 200[μm]로 하여 구-평판 전극계를 구성하였다.

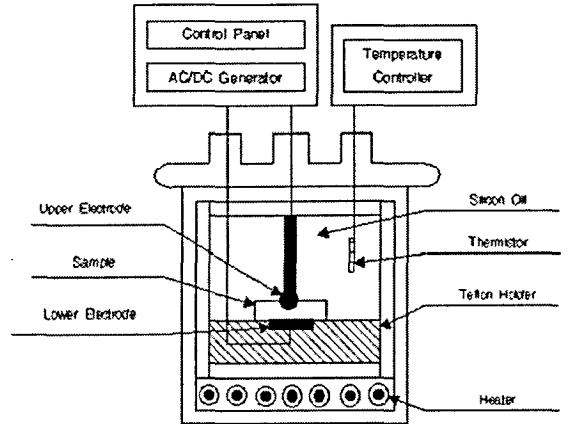


그림 2. 실험 장치

3. 절연 파괴 데이터 시뮬레이션

3-1. 와이블 분포(Weibull Distribution)

와이블 분포(Weibull Distribution)는 고전압 기기의 열화 통계에 가장 많이 사용되고 있는 분포로 우선 가장 기본적인 통계량인 평균값 E와 표준편차 σ를 구해야 하는데 이는 파괴 데이터를 실제의 기기 설계에 이용하는 경우 평균값이 중요함은 물론 흐트러짐의 지표인 표준 편차도 매우 중요한 요소이기 때문이다. 일반적으로 데이터가 n개이고 이 중에서 i번째의 데이터가 X_i(i=1, 2, ..., n)인 경우 평균치 X와 표준 편차 σ는

$$X = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n$$

$$\sigma = \sqrt{(X_1 - X)^2 + (X_2 - X)^2 + \dots + (X_n - X)^2} / n$$

으로 되고, 누적 확률 분포는 확률 변수 X의 실효치를 x로 하여

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_l}{x_s}\right)^m\right] \quad (x \geq x_l)$$

$$= 0 \quad (x < x_l)$$

으로 표시된다. 확률 변수 X 의 실효치가 x 이하가 되는 확률이 $F(x)$ 라는 것을 의미하고 있는데 여기서 x_l , x_s , m 은 각각 위치 파라미터, 척도 파라미터, 형상 파라미터라고 한다. x_l 은 이 값 이하에서는 절대로 절연 파괴 등의 현상이 일어나지 않는다는 하한치이며, 또 x_s 는 누적 파괴율 63.2[%]에 해당하는 평균적인 파괴 강도에 대응하고 있다. m 은 누적 파괴 확률 분포의 분포 형상을 결정하는 파라미터로서 m 이 커짐에 따라 흐트러짐은 작은 분포로 되며 m 이 1정도에서는 지수 분포에 가까운 분포 형상이 되고 m 이 4정도 이상이 되면 정규 분포에 가까운 분포 형상이 된다.

3-2. 알고리즘(Algorithm)

그림 3은 에폭시 복합체의 절연 파괴 데이터를 이용하여 인가 전계에 대해 파괴 확률을 추정하기 위하여 수행된 절차를 나타낸 와이블 분포 시뮬레이션의 알고리즘이다.

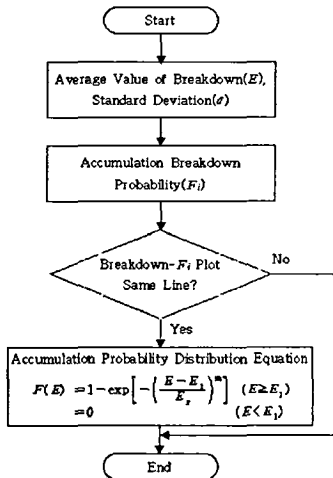


그림 3. 알고리즘

4. 실험 결과 및 검토

4-1. 절연 파괴 특성

그림 4는 에폭시와 경화제의 배합 비율을 1:1로 하여 무충진 시료(H100FN), 충전 시료(H100F60) 그리고 충전 및 실란 처리 시료(SH100FN)의 DC

파괴 강도를 도시한 것이다. 충전제를 첨가한 시료는 무충진 시료에 비해 전체적인 파괴 값이 낮게 나타났는데, 이것은 에폭시와 실리카 사이에 접합 계면이 형성되어 전계가 계면으로 집중되기 때문에 전자가 가속되어 전자 사태를 유발시키는 것으로 사료된다. 한편 실란 처리를 통해 절연에 있어서 약점에 해당하는 계면의 성장을 억제할 수 있어서 결국 절연 내력을 크게 하는데 작용하므로 충전제만 첨가한 경우보다는 높은 파괴 강도를 보이게 된다.⁷⁾

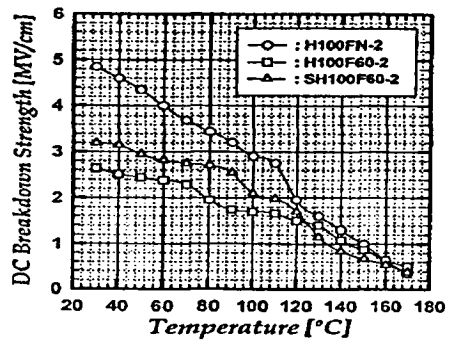


그림 4. 충전제 및 실란에 따른 DC 절연 파괴

그림 5는 2차 경화시킨 무충진 시편의 경화제 비율에 따른 DC 절연 파괴 데이터로서, 저온에서는 경화제 비율이 증가할수록 파괴 강도가 높아지며, 110[°C] 부근이 유리 전이 온도(T_g)임을 고려할 때 급격히 파괴 강도가 저하하고 있음을 확인할 수 있고, 또한 90[°C] 이하의 저온에서 경화제 함량 비율이 높은 순서로 파괴 강도가 높아지는 것은 경화제 증가에 따라 가교 밀도가 높아지면서 절연 내력의 증대로 나타나는 것으로 사료되고, T_g 이후의 고온부에서는 에스테르기가 열 분해되기 쉬우며 경화제의 첨가량이 많을수록 시료 내부에 자유 체적을 많이 점유하여 오히려 절연 강도를 저하시켜서 경화제 비율이 낮은 시료가 높은 파괴 값을 보이는 것으로 여겨진다.⁸⁾

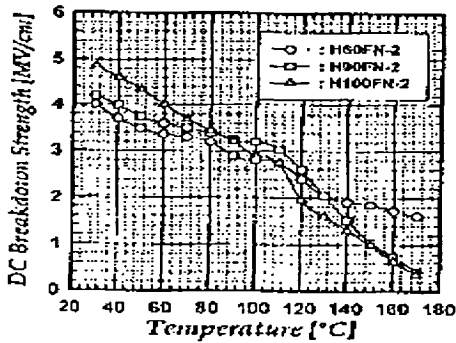


그림 5. 경화제 비율에 따른 DC 절연 파괴

4-2. 와이블 확률 분포

DC 절연 파괴 실험을 통해 얻은 각 파라미터 및 이들을 이용하여 시물레이션을 한 결과, 허용 파괴 확률이 0.1[%]인 경우 다음의 표 2에서와 같은 허용 인가 전계값을 구하였다.

표 2. DC 절연 파괴 데이터로부터 구한 각 요소 값

시 료	형 상 파라미터 (m)	측 정 파라미터 (E ₀)	인가 전계값 (허용 파괴 확률 0.1[%])
H80FN-2	3.73	124	19.46[kV/mm]
H90FN-2	3.47	155	21.17[kV/mm]
H100FN-2	3.44	159	21.34[kV/mm]
H100F60-2	3.42	161	21.36[kV/mm]
SH100F60-2	2.83	246	21.43[kV/mm]

여기서 인가 전계값은 허용 파괴 확률을 0.1[%]로 하였을 때 구한 값인데, 이로부터 경화제의 첨가량이 많을수록 허용인가 전계값은 증가하며, 충전제를 첨가한 경우를 고려하면 충전제 첨가제의 허용인가 전계값이 실란 처리를 했을 때 보다 더 낮게 나타났는데 이는 전 항에서 살펴보았던 절연 파괴 특성에서 나타나는 결과와 잘 부합하고 있으며, 이 때의 허용인가 전계값은 21.5[kV/mm] 이하가 되어야 한다.

5. 결론

설정한 배합비에 의해 제작한 에폭시 복합체의 DC 절연 파괴 실험을 통하여 얻은 데이터를 이용하여 절연 사고 예방을 위해 절연 파괴 데이터 분석을 와이블 분포 시물레이션으로 절연 신뢰도를 분석한 결과, 충전제를 첨가한 경우 계면 형성으로 전계가 계면으로 집중되기 때문에 전자가 가속되어 전반적인 파괴 강도는 무충진에 비해 전체적으로 낮게 나타났으며, 실란 처리를 했을 때에는 계면 집합 상태가 개선되기 때문에 충전제만을 첨가한 시료에서 보다 더 높은 파괴 강도를 나타내었다. 따라서 에폭시 복합체를 기기 절연의 재료로 이용하기 위해서는 실란 처리를 통해 계면의 성장을 억제하여 절연성을 높여야 한다. 경화제 비율이 증가할수록 저온에서는 파괴 강도가 높아지며, 110[°C] 부근이 유리 전이 온도이므로 고온에서는 급격히 파괴 강도가 저하하고 있는 것으로 사료된다. 한편, 와이블 확률 분포의 시물레이션을 통하여 기기 절연의 허용 파괴 확률을 0.1[%] 이하로 낮추기 위해서는 허용 인가 전계값이 21.5[kV/mm] 이하가 되어야 함을 도출할 수 있었다.

참고 문헌

1. B. A. Rozenberg, "Kinetics, Thermodynamics and Mechanism of Reactions of Epoxy Oligomers with Amine: Epoxy Resin and Composites II, K. Dusek Edit.", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp.113-166, 1986
2. B. Ellis, "The Kinetics of Cure and Network Formation-Chemistry and Technology of Epoxy Resins, Bryan Ellis, Edit.", Blackie Academic & Professional, pp.72-113, 1993
3. X. M. Chen and B. Ellis, "Coatings and Other Applications of Epoxy Resins-Chemistry and Technology of Epoxy Resins, Bryan Ellis, Edit.", Blackie Academic & Professional, pp.303-327, 1993
4. "固體絶縁材料の添加剤, 充てん剤の効果", 電気學會 技術報告, II部, 第342號, pp. 3-58, 1990
5. L. Simoni, "A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under

Temperature and Voltages", Colloid & Polymer Sci., 260, pp.297 -302, 1982

6. R. Schifani, "Surface Discharge Effects on Dielectric Properties of Epoxy Resins", IEEE Tran. Elect. Insul., Vol.EI-18, pp.504-512, 1983

7. "電氣設備의 診斷技術", 日本電氣學會編著, pp.39-59, 1985

8. S. S. Sastry, G. Satyanandam, "Effects of Fillers on Electrical Properties of Epoxy Composites", J. Appl. Poly. Sci., Vol.26, pp.1607-1615, 1988