

## 절연 파괴 데이터의 와이블 분포 시뮬레이션을 이용한

### 절연 신뢰도 예측

박진호<sup>o</sup>

<sup>o</sup>청강문화산업대학 모바일스쿨

e-mail: ghpark@ck.ac.kr

## Prediction of Insulation Reliability Using Weibull Distribution Simulation of Dielectric Breakdown Data

Geon-Ho Park<sup>o</sup>

<sup>o</sup>School of Mobile Technology, Chungkang College of Cultural Industries

### ● 요약 ●

본 연구에서는 변성기용으로 사용되는 에폭시 복합체에 대해 절연 파괴 실험을 하고 그 데이터를 와이블 분포 확률을 이용해서 시뮬레이션을 하였다. 에스테르기의 기여에 의한 가교밀도 때문에 저온에서 경화제가 증가할수록 파괴강도가 증가하고 충전제를 첨가한 시료들의 파괴강도는 비충진 시료들의 경우 보다 더 낮았는데 이는 충전제 첨가가 계면을 형성하고 전하가 축적되어 분자의 이동도가 증가되고, 전계가 집중되어 전자 가속화 및 전자 사태의 성장이 초기에 도달되기 때문으로 사료된다. 또한 와이블 분포의 분석으로부터 허용 절연파괴 확률이 0.1[%]로 주어질 때, 인가 전계값은 21.5[kV/mm] 이하가 되어야 함을 확인하였다.

**키워드:** 절연 파괴(Dielectric Breakdown), 와이블 분포 확률(Weibull Distribution Probability), 가교밀도(Cross-Linked Density), 전자 사태(Electron Avalanche)

### I. 서론

전기 에너지의 신뢰성 높은 공급은 절연 기술의 뒷받침 없이는 실현되기 어렵기 때문에 이를 위한 절연 재료에 관한 연구 및 개발의 성과를 이루어 안전성이 높은 송전 체계 및 전력 기기의 확대를 실현시켜야 하며, 또한 절연 구성의 고전계화에 대처하기 위해서는 전기 절연에 대한 미시적 관점의 물성론적 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 제조공정의 개발과 장기 수명을 지배하는 각종 절연 열화 현상의 해석 시 물성론에 기초한 이론적 해석이 요망되므로 절연에 대한 정확한 이해와 우수한 절연 재료의 개발을 통해서 앞으로의 전기·전자 기기 분야의 비약적인 발전이 이루어질 수 있다.<sup>[1]</sup> 고분자는 우수한 절연성을 가지고 있어서 전력 계통 분야에서 절연 재료로서 널리 사용되고 있다. 하지만 일반적으로 시간의 경과에 따라 기기 구성 재료의 변질에 의해 기기의 성능은 떨어지는데 이러한 현상은 통상 품질의 저하를 야기시켜 사고를 유발하므로 안정된 시스템을 구축하기 위해서는 구성 재료의 열적, 기계적, 화학적 및 경년 열화에 대한 제 현상론의 이해와 열화 진단에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다. 현재 이뤄지고 있는 전력 분야에서의 계통의 초고압화 및 제반 송배전 계통의 안정성을 도모하기 위하여 여러 가지 연구가 수행되고 있으며, 고전압 기술에 있어서 절연 파괴 전압이나 임의의 일정 전압이 인

가될 때, 수명 시간에 관한 데이터는 매우 중요하고 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.<sup>[2]</sup> 따라서, 본 연구에서는 송배전 계통에서 변성기의 몰딩 재료로서 널리 사용되고 있는 에폭시 복합체를 시료로 하여 설정해 놓은 배합비에 의해 5종으로 제작한 각 시편에 대해 절연 파괴 실험을 하여 얻어지는 절연 파괴 데이터를 가지고, 수명 평가나 파괴 통계에서 주로 이용되는 와이블 분포식을 이용하여 임의의 허용 파괴 확률에서의 허용 인가 전계값을 추정하여 절연 안전성을 판단하기 위하여 경년 열화 데이터의 통계 처리 방법을 제안하였다.

### II. 실험 및 시뮬레이션

#### 1. 사용 시료

본 연구에서 사용된 시료는 상온에서 액상인 비스페놀-A형인 에폭시 수지와 산무수물 계통의 경화제( MeTHPA)를 임의의 일정 배합 비율로 하여,<sup>[3]</sup> 1차 경화(100[°C], 2[hr]) 및 2차 경화(140[°C], 6[hr]) 시켰으며 유연제(DY-040)을 5[wt%] 첨가하여 충격 강도와 인장 강도를 개선시켰고, 기계적 및 열적 특성을 보완하기 위하여 충전제로 실리카(SiO<sub>2</sub>)를 첨가하였다.<sup>[4]</sup> 또한, 충전제

의 표면 처리에 쓰이는 계면 결합제로서 아미노 실란 계통을 사용하여 제조하였다. 표 1에 시료의 조성비 및 경화 조건을 나타내었고, 그림 1에 시편의 제작 과정을 나타내었다.

표 1. 조성비 및 경화 조건

Table 1. Formulating Ratio and Curing Condition

Samples	Epoxy	Hardener	DY-040	Filler	Curing Condition
H 80FN	100	80	5	0	▶ 1st Curing; 100[°C]×2[hr]
H 90FN	100	90	5	0	
H100FN	100	100	5	0	▶ 2nd Curing; 140[°C]×6[hr]
H100F60	100	100	5	60	
SH100F60	100	100	5	60	⇒ S는 계면처리

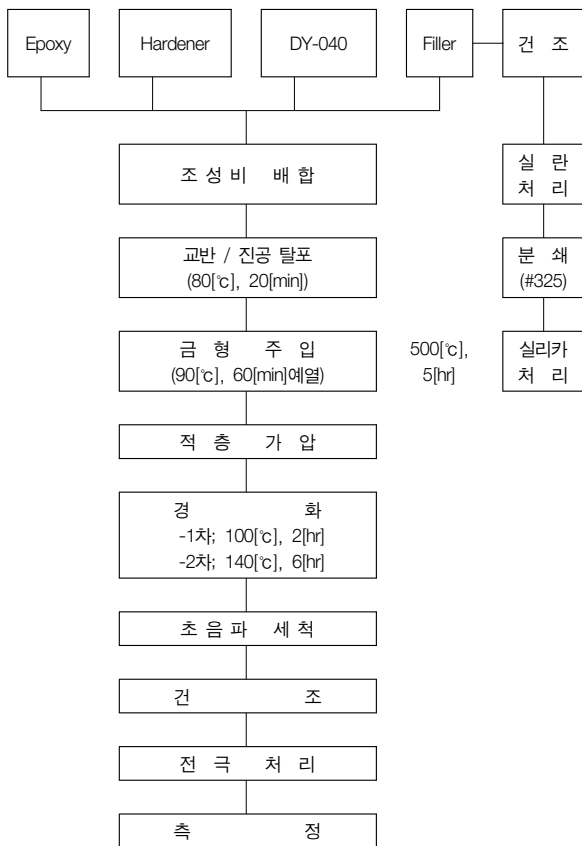


그림 1. 시편의 제작 과정

Fig. 1. Manufacturing process of samples

## 2. 실험 방법

절연 파괴 실험 장치는 그림 2와 같이 구성되어 연면 방전을 방지하기 위하여 탈기 처리한 실리콘 오일 중에서 온도 범위 20 [°C]~160 [°C]로 변화시키면서 직류 전압의 승압속도를 1 [kV/sec]로 하여 절연 파괴가 일어날 때까지 승압하면서 측정하였다. 그리고 측정회수는 동일 조건에서 10개의 시편을 취하여 그 평균값을

파괴 전압으로 하였으며, 절연 파괴 실험용 시편은 직경 4[mm]의 스테인레스 강구를 두께 3[mm]인 에폭시에 상부 전극으로 매입하여 제작하였고, 전극간의 거리는 200[μm]로 하여 구-평판 전극계를 구성하였다.

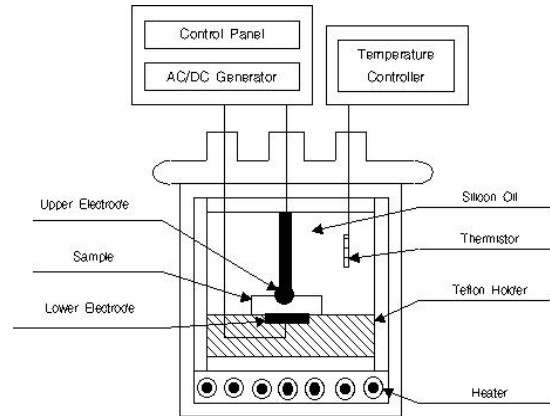


그림 2. 실험 장치

Fig. 2. Experimental Apparatus

## 3. 와이블 분포 시뮬레이션

와이블 분포는 고전압 기기의 열화 통계에 가장 많이 사용되고 있는 것으로 우선 가장 기본적인 통계량인 평균값( $E$ )와 표준편차( $\sigma$ )를 구해야 하는데 이는 파괴 데이터를 실제의 기기 설계에 이용하는 경우 평균값이 중요함은 물론 흐트러짐의 지표인 표준 편차도 매우 중요한 요소이기 때문이다.

일반적으로 데이터가  $n$ 개 있고 이 중에서  $i$ 번째의 데이터가  $X_i(i=1, 2, \dots, n)$ 인 경우 평균치( $X$ )와 표준 편차( $\sigma$ )는

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

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

와이블 분포는 최약점 파괴 확률 분포라고도 부르며 누적확률 분포는 확률변수  $X$ 의 실효치를  $x$ 로 하여

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

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

확률변수  $X$ 의 실효치가  $x$  이하가 되는 확률이  $F(x)$  라는 것을 의미하고 있는데 여기서  $x_l$ ,  $x_s$ ,  $m$ 은 각각 위치파라미터, 척도파라미터, 형상파라미터라고 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.

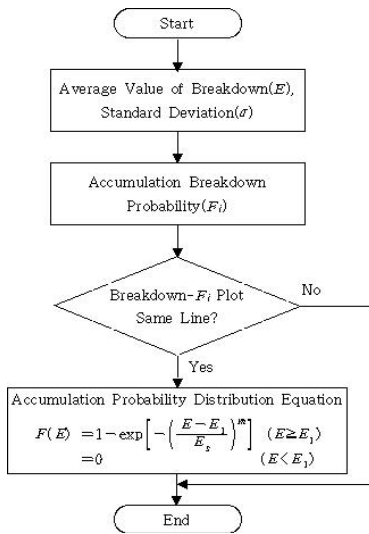


그림 3. 와이블 분포의 알고리즘  
Fig. 3. The Algorithm of Weibull Distribution

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 절연 파괴 특성

그림 4는 2차 경화시킨 무충진 시편의 경화제 비율에 따른 직류 절연 파괴 강도를 나타내고 있다. 유리전이온도( $T_g$ )를 지난 고온부에서는 에스테르기가 열분해 되기 쉬우며 경화제의 첨가량이 많을 수록 시료 내부에 자유체적을 많이 점유하여 절연강도를 저하시켜서 경화제 비율이 작은 시료가 높은 파괴값을 보이는 것으로 여겨진다.<sup>[5]</sup>

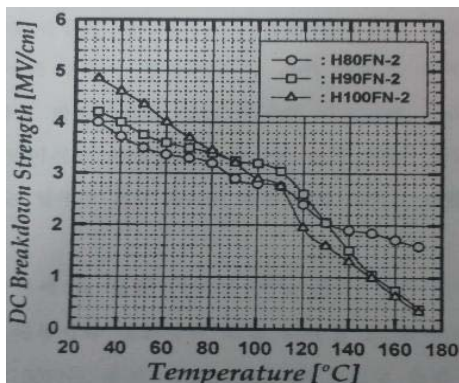


그림 4. 경화제 첨가 비율에 따른 직류절연파괴강도  
Fig. 4. DC Breakdown Strength according to Ratio of Adding Hardener

그림 5는 2차 경화시킨 무충진 시편의 경화제 첨가 비율에 따른 교류 절연 파괴의 온도 특성을 보여주고 있다. 온도가 상승하여 임계온도를 넘어서면 자유체적 증가에 의한 파괴강도의 급격한 저하가 나타난다고 하는 열팽창계수 차이에 의한 파괴기구가 제안되어 있다.<sup>[6]</sup>

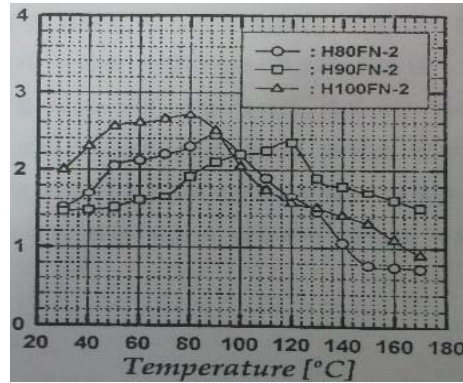


그림 5. 경화제 첨가 비율에 따른 교류절연파괴강도  
Fig. 5. AC Breakdown Strength according to Ratio of Adding Hardener

그림 6은 무충진 시료, 충진 시료 그리고 충진 및 실란 처리 시료의 직류 절연 파괴 강도를 도시한 것이다. 실란 처리를 하여 계면접합 상태를 개선시킨 경우에는 충진제 만을 첨가한 시료에서 보다 높은 파괴강도를 보이고 있는데, 이는 계면의 성장을 억제할 수 있어서 결국 절연내력을 크게 하는데 작용하는 것으로 여겨진다.<sup>[7]</sup>

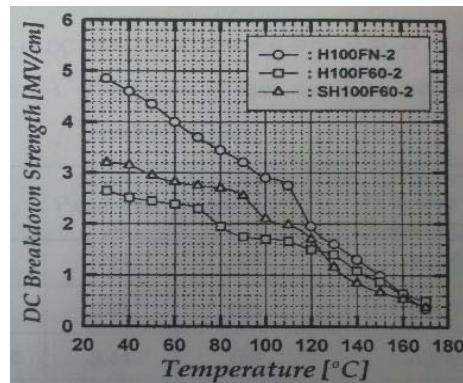


그림 6. 충진제 및 실란 처리에 따른 직류절연파괴강도  
Fig. 6. DC Breakdown Strength according to Adding Filler and Treating Silane Coupling Agent

#### 2. 와이블 확률 분포

DC 절연 파괴 실험을 통해 얻은 각 파라미터 및 이들을 이용하여 시뮬레이션을 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 요소값  
Table 2. The Values of Each Parameter Obtained  
from DC Breakdown Data

시료	형상 파라미터 ( <i>m</i> )	측정 파라미터 ( <i>E<sub>s</sub></i> )	인가 전계값 (허용파괴확률=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]

#### IV. 결론

설정된 계획에 의해 제작한 에폭시 복합체를 절연 파괴 실험을 통하여 얻은 데이터를 이용하여 절연 사고 예방을 위해 절연 파괴 데이터 분석을 와이블 분포식으로 분석하여 절연 진단을 한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 경화제 비율이 증가할수록 에폭시 경화물의 에스터화가 증대되어 가교 밀도가 높아지면서 저온에서는 파괴 강도가 높아지며, 110[°C] 부근이 분자 운동이 활발해지는 유리 전이 온도 근처이기 때문에 고온에서는 급격히 파괴 강도가 저하하고 있는 것으로 사료된다.
- (2) 충전제를 첨가한 경우 에폭시와 실리카 사이에 접합 계면이 형성되어 전계가 계면으로 집중되기 때문에 전자가 가속되어 전반적인 파괴 강도는 무충진에 비해 전체적으로 낮게 나타났으며, 실란 처리를 했을 때에는 계면 접합 상태가 개선되기 때문에 충전제 만을 첨가한 시료에서 보다 더 높은 파괴 강도를 나타내었다. 따라서, 에폭시 복합체를 기기 절

연의 재료로 이용하기 위해서는 실란 처리를 통해 계면의 성장을 억제하여 절연성을 높여야 한다.

- (3) 와이블 분포의 분석을 통하여, 기기 절연의 허용 파괴 확률을 0.1[%] 이하로 낮추기 위해서는 허용인가 전계값이 21.5[kV/mm] 이하가 되어야 함을 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] 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
- [2] 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
- [3] "固體絶縁材料の添加劑, 充てん劑の効果", 電氣學會技術報告, II部, 第342號, pp.3-58, 1990
- [4] R. Schifani, "Surface Discharge Effects on Dielectric Properties of Epoxy Resins", IEEE Tran. Elect. Insul., Vol.EI-18, pp.504-512, 1983
- [5] S. S. Sastry, G. Satyanandam, "Effects of Fillers on Electrical Properties of Epoxy Composites", J. Appl. Poly. Sci., Vol.26, pp.1607-1615, 1988
- [6] J. U. Lee, J. B. Wang, K. T. Park, G. H. Park, "Effects of Additives on Electrical Conduction and Breakdown Properties of Epoxy Composites", Proceedings of the 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Insulation and Dielectric Materials, Seoul, Korea, pp.50-55, 1993
- [7] J. D. Reid, "Dielectric Properties of an Epoxy Resin and its Composite II", J. Appl. Poly. Sci., Vol.33, pp.2293-2303, 1987