

에폭시 복합체의 절연신뢰도 및 파괴수명 예측 - Prediction of Insulation Reliability and Breakdown Life in Epoxy Composites -

신철기⁰, 박건호⁰, 왕중배⁰, 김성열⁰, 이준웅⁰
0 : 광운대학교 전기공학과

Cheol-Gi Shin⁰, Geon-Ho Park⁰, Jong-Bae Wang⁰,
Song-yol Kim⁰, Joon-Ung Lee⁰
0 : Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ.

Abstract

In this study, the dielectric breakdown of epoxy composites used for transformers was experimented and then its data were simulated by Weibull distribution probability.

As a result, first of all, speaking of dielectric breakdown properties, the more hardener increased the stronger breakdown strength at low temperature, and the breakdown strength of specimens because it is believed that the adding filler forms interface and charge is accumulated in it, therefore the molecular motility is raised, the electric field is concentrated, and the acceleration of electron and the growth of electron avalanche are early accomplished. In the case of filled specimens with treating silane, the breakdown strength become much higher since this suggests that silane coupling agent improves interfacial combination and relaxes electric field concentration.

Finally, from the analysis of weibull distribution, it was confirmed that as the allowed breakdown probability was given by 0.1[%].

되고 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(經年) 열화에 대한 제 현상론의 이해와 열화 진단에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다. 현재 진행되고 있는 전력 분야에서의 제통의 초고압화

및 제반 송배전 계통의 안정성을 도모하기 위하여 여러 가지 연구가 수행되고 있으며, 고전압 또는 고전계 기술에 있어서 절연과파 전압이나 임의의 일정 전압이 인가될 때 수명시간에 관한 데이터는 매우 중요하고 특히 절연 진단 시에 비절연 파괴와 절연 파괴 사이의 관계를 나타내는 데이터 또한 중요하다. 그러나, 이들 수명 시간 및 절연 파괴에 관한 데이터는 일반적으로 산만하고 흐트러져 있어서 일정한 통계 처리를하여 정량적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 송배전 계통에서 변성기의 몰드 재료로서 널리 사용되고 있는 에폭시 수지를 시료로하여 설정해 놓은 배합비에 의하여 제작한 각 시편에 대해 절연 파괴 실험을하여 얻어지는 절연 파괴 데이터를 가지고 데이터 처리에 이용되는 확률 분포 즉, 와이블 분포, 정규분포, 지수 분포, 감마 분포 등 여러 가지 중에서 수명 평가나 파괴 통계에서 주로 이용되는 와이블 분포식을 이용하여 임의의 허용 파괴 확률에서의 허용인가 전계의 값을 추정하여 절연 안전성을 판단하기 위하여 경년 열화 데이터의 통계 처리 방법을 제안하였다.

1. 서론

유기 고분자 재료는 우수한 절연성을 가지고 있어서 전력 계통을 비롯한 여러분야에서 절연 재료로서 널리 사용

2. 실험

2-1. 사용 시료

본 실험에 사용된 에폭시 수지는 고온 경화용 주형수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형(Bisphenol-A type) 수지이며, 경화제는 산무수물 제종의 MeTHPA(Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였으며, 기계적, 열적특성을 개선시키기고 단가절감을 위해 SiO₂를 충전제로서 사용하였다. 또한 유기질인 에폭시 수지와 무기질인 실리카 사이의 결합상태를 개선하기 위하여 아미노 실란계의 계면결합제(KBM 603)를 1[%] 농도로 수용액에 희석하여 실리카 표면을 실란 처리하였다. 그리고, 경화물의 충격강도와 인장 강도를 개선시키기 위하여 가소성 부여제인 DY-040을 5[wt%] 첨가하였다.

표 2-1. 시료의 조성비 (단위: [wt%])
Table 2-1. Mixing Ratio of Specimens

시료명	에폭시	경화제	충진제	경화조건
H80FN	100	80	0	
H90FN	100	90	0	* 혼합
H100FN	100	100	0	80[°C] 30[min]
H100F55	100	100	55	* 1차 경화
H100F60	100	100	60	100[°C] 4[hr]
H100F65	100	100	65	* 2차 경화
SH100F55	100	100	55 ★	140[°C] 8[hr]
SH100F60	100	100	60 ★	★: 계면처리를
SH100F65	100	100	65 ★	행한것.

이러한 시료들을 이용하여 절연파괴값을 측정하기 위하여 가로, 세로 각각 30[mm]인 Teflon Molder를 제작한 후 에폭시, 경화제, 유연제, 충전제, 계면결합제 등을 표 2-1의 배합비에 맞게 혼합하여 100[°C]에서 4시간 동안 1차경화를 시킨후 140[°C]에서 8시간동안 2차 경화를 시켜 시편을 제작하였다.

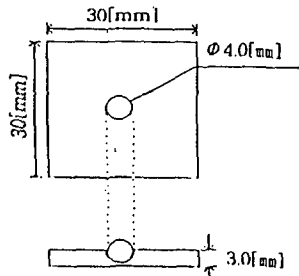


그림 2-1. 시편의 형상
Fig 2-1. Shape of Specimen

절연파괴 실험은 연면방전을 방지하기 위하여 탈기 처리한 실리콘 오일 중에서 온도범위 20~150[°C]로 변화시키면서 직류 전압의 승압속도를 1[kV/sec]로 하여 절연 파괴가 일어날 때까지 승압하면서 측정하였다. 절연 파괴 실험용 시편은 직경 4[mm Ø]의 스테인레스 강구를 두께 3[mm]인 에폭시에 상부 전극으로 매입하여 제작하였으며 구-평판 전극계를 이용하였다.

2-2. 와이ابل 분포 시뮬레이션

그림 2-2에 에폭시 복합체의 절연파괴 데이터를 이용하여 인가 전계에 대한 파괴 확률을 추정하기 위하여 수행된 절차를 나타낸 알고리즘이다.

3. 연구결과 및 검토사항

3-1. 파괴전압 특성

그림 2-3 ~ 2-6에 각 온도별로 파괴특성을 나타내었다. 여기에서 그림 2-3, 2-4는 무충진 시편의 경화제 비율변화에 따른 DC, AC 절연파괴의 온도의존성을 나타낸 것으로 DC는 저온에서는 경화제 비율이 증가할수록 파괴강도가 높아지며, 90[°C]와 120[°C]사이에서는 급격히 파괴강도가 저하하다가 120[°C]이상의 고온부근에서는 경화제 비율이 적은 시료가 높은 파괴강도를 나타내고 있다. 이러한 급격한 파괴강도의 저하는 이 온도부근이 분자운동이 활발해지는 T_g점 근처이기 때문이라 생각된다. AC에서 T_g 부근까지 파괴강도가 온도상승에 따라 증가하다가 T_g를 넘어서는 온도상승에 따라 급격히 감소하고 있는데 이는 에폭시 경화물의 주쇄를 이루고있는 에스테르 결합이 온도상승에 따라 느슨해지면서 이곳에 전하가 트랩되는 확률이 증가하기 때문이라 사료된다.

그림 2-5와 2-6은 경화제 100[wt%] 첨가한 시편에 충전제 비율을 55, 60, 65[wt%]로 변화시킨 시편과 여기에다 유기질인 에폭시와 무기질의 실리카사이의 계면상태를 개선시키기 위하여 실란처리를 한 시편들의 DC와 AC절연파괴 특성을 나타낸 것이다. 충전제만을 첨가한 경우는 전체적인 파 저하하지만 온도에 따른 급격한 파괴강도는 둔화되어 전반적으로 온도의존성이 무충진 시편의 경우보다 약하게 나타남을 알 수 있었다. 실란처리를 해준경우의 시편들의 절연파괴 특성은 하지않은 시편에 비하여 계면의 결합상태가 개선되고 전체집중을 완화하여 파괴강도가 크게 완화되었음을 알 수 있었다. 충전제를 55[wt%] 첨가한 시편은 실란처리를 하여도 파괴강도가 더욱 낮아짐을 볼수 있는데, 이는 과다한 경화제가 계면사이의 결합상태를 저하하거나 파잉실란이 불순물로 작용하여 파괴강도를 낮추는 것이라 생각된다. 따라서 본 실험에서 파괴강도를 높이면서 전기적인 특성을 개선시키며 단가를 절감시킬 수 있는 충전제 비율 65[wt%]의 시편이 실란 계면결합제 농도 1.5[wt%]에서의 최적충진제 첨가량임을 알 수 있었다.

3-2. 파괴수명진단

에폭시 복합체의 절연파괴 실험을 통하여 얻은 각 파라미터 및 데이터를 통하여 시뮬레이션을 한 결과 다음 표 2-2 ~ 2-5와 같은 허용 인가 전계값을 추론 하였다.

여기에서 m은 형성파라미터를, E_s는 척도파라미터를 나타내며 허용파괴 확률 0.1[%]에서의 파괴수명값을 진단한 것이다. 이들로부터 경화제의 양이 많을수록 허용인가 전계값은 증가하며, 충전제 첨가시의 값을 고려하면 실란처리를 하여준 시편들에 대한 허용인가 전계값이 높게 나타

났는데 이는 앞의 절연파괴 특성에서 나타난 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

제작된 각 시편을 실리콘 오일중에서 온도범위 20[°C]~150[°C]로 변화시키면서 전압의 승압속도를 1[kV/sec]로 하여 절연파괴가 일어날 때까지 승압하면서 절연파괴 실험을 통하여 얻은 데이터를 이용하여 절연사고 예방을 위해 절연파괴 데이터 분석을 와이블 분포식으로 분석하여 절연진단을 한 결과,

1. 경화제 비율이 증가할수록 에폭시 경화물의 에스터화 증가되어 가교밀도가 높아지면서 저온에서는 파괴강도가 높아지며, 110[°C] 부근이 분자운동이 활발해지는 유리전이 온도 근처이기 때문에 고온에서는 급격히 파괴강도가 저하하고 있는 것으로 판단된다.

2. 충전제를 첨가한 경우 에폭시와 실리카 사이에 접합 계면이 형성되어 전계가 계면으로 집중되기 때문에 전자가 가속되어 전반적인 파괴강도는 무충진에 비해 전체적으로 낮게 나타났으며, 실란처리를 했을 때에는 계면 접합상태가 개선되기 때문에 충전제만을 첨가한 시료에서 보다 더 높은 파괴강도를 나타내었다. 따라서, 에폭시 복합체를 기 절연의 재료로 사용하기 위해서는 실란처리를 통하여 계면의 성장을 억제하여 절연성을 높여야 한다.

3. 와이블 분포식을 통하여, 기기 절연의 허용파괴 확률을 0.1[%] 이하로 낮추기 위해서는 허용인가 전계값이 표 2-2~표 2-5 이하가 되어야 함을 추론함으로써 절연파괴 수명을 추론할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S. S. Sastry, G. Satyanandam, "Effects of Fillers on Electrical Properties of Epoxy Composites", J. Appl. Poly. Sci., Vol.26, pp.1607-1615, 1988
2. J.J. O'Dwyer, "The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics", Clarendon Press. Oxford, 1973
3. T. Kamon, H. Furukawa, "Curing Mechanisms and Mechanical Properties of Cured Epoxy Resins : Epoxy Resin and Composites IV, K. Dusek E야.", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp.173-202, 1986
4. R. Rygal et al., "The Influence of the Filler Characteristics on the Surface Resistivity of Epoxy Composition Applied in SF Insulation System", Conf., Rec., 1992 IEEE Inter. Symp. Insul., Baltimore, U.S.A, Jun, pp.279-282, 1992

5. "誘電體現象論", 日本電氣學會, pp.71-152, 1985

6. J. D. Reid, "Dielectric Properties of an Epoxy Resin and its Composite II", J.Appl. Poly. Sci., Vol.33, pp.2293-2303, 1987

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

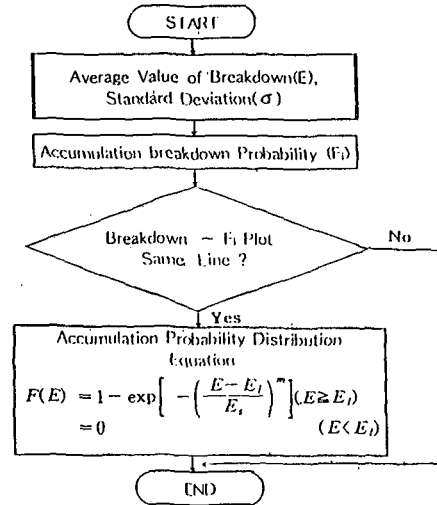


그림 2-2. 와이블 분포 시뮬레이션의 알고리즘

Fig 2-2. The algorithm of Weibull distribution simulation

표 2-2. 절연파괴 데이터로부터 구한 각 요소값(30[°C])

Samples	Shape Parameter (m)	Measuring Parameter (Es)	The Values of Applied Field
H80FN	3.88	60.20	10.15 [kV/mm]
H90FN	3.91	61.98	10.59 [kV/mm]
H100FN	4.03	71.10	12.81 [kV/mm]
H100F55	3.76	48.00	7.65 [kV/mm]
H100F60	3.79	54.11	8.75 [kV/mm]
H100F65	3.50	38.99	5.42 [kV/mm]
SH100F55	4.01	36.00	6.43 [kV/mm]
SH100F60	4.01	49.00	8.75 [kV/mm]
SH100F65	4.16	56.12	10.67 [kV/mm]

표 2-3. 절연파괴 데이터로부터 구한 각 요소값(60[°C])

Samples	Shape Parameter (m)	Measuring Parameter (E_s)	The Values of Applied Field
H80FN	3.71	51.00	7.93 [kV/mm]
H90FN	3.74	54.08	8.53 [kV/mm]
H100FN	3.76	59.10	9.41 [kV/mm]
H100F55	3.6	41.00	6.02 [kV/mm]
H100F60	3.64	42.21	6.33 [kV/mm]
H100F65	3.76	38.09	6.07 [kV/mm]
SH100F55	3.95	23.50	4.09 [kV/mm]
SH100F60	4.18	33.00	6.32 [kV/mm]
SH100F65	4.24	46.12	9.04 [kV/mm]

표 2-4. 절연파괴 데이터로부터 구한 각 요소값(100[°C])

Samples	Shape Parameter (m)	Measuring Parameter (E_s)	The Values of Applied Field
H80FN	3.66	37.05	5.61 [kV/mm]
H90FN	3.70	48.10	7.44 [kV/mm]
H100FN	3.59	45.00	6.57 [kV/mm]
H100F55	3.58	36.00	5.23 [kV/mm]
H100F60	3.70	39.06	6.03 [kV/mm]
H100F65	3.60	35.00	5.14 [kV/mm]
SH100F55	3.90	24.00	4.08 [kV/mm]
SH100F60	4.05	39.00	7.08 [kV/mm]
SH100F65	4.10	42.00	7.79 [kV/mm]

표 2-5. 절연파괴 데이터로부터 구한 각 요소값(130[°C])

Samples	Shape Parameter (m)	Measuring Parameter (E_s)	The Values of Applied Field
H80FN	3.60	37.80	5.54 [kV/mm]
H90FN	3.71	41.05	6.38 [kV/mm]
H100FN	3.41	31.00	4.09 [kV/mm]
H100F55	3.50	29.00	4.03 [kV/mm]
H100F60	3.49	19.60	2.71 [kV/mm]
H100F65	3.54	34.50	4.90 [kV/mm]
SH100F55	3.80	26.90	4.37 [kV/mm]
SH100F60	3.74	37.00	5.72 [kV/mm]
SH100F65	3.81	41.60	6.76 [kV/mm]

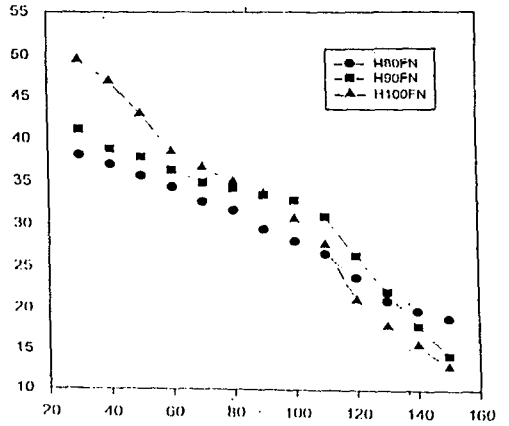


그림 2-3. 무충진 시편의 절연파괴 특성(DC)

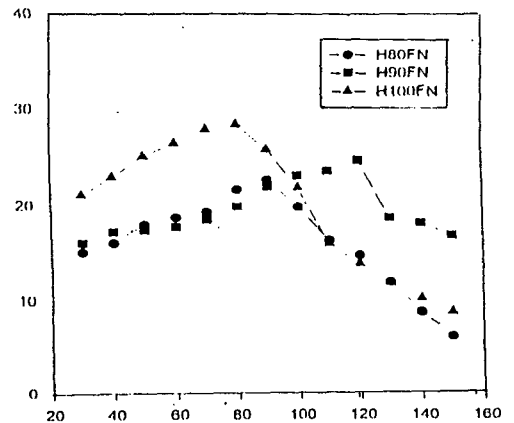


그림 2-4. 무충진 시편의 절연파괴 특성(AC)

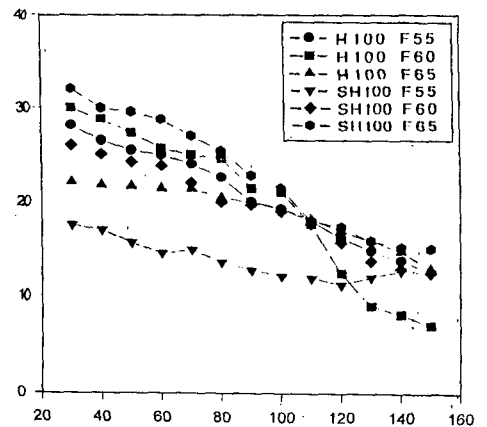


그림 2-5. 충전 시편의 절연파괴 특성(DC)

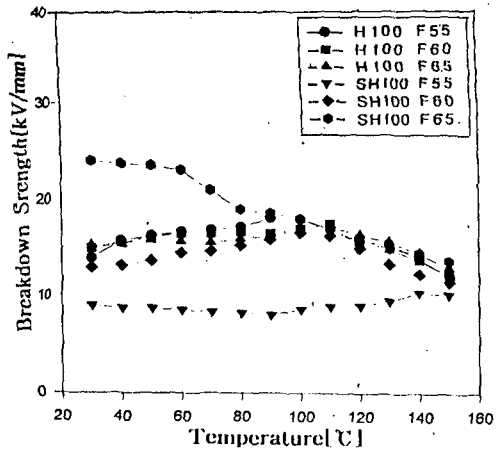


그림 2-6. 충전 시편의 절연파괴 특성(AC)

본 연구는 1995년도 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.