

와이블 분포식을 이용한 에폭시 복합체의 수명 시간 예측

논문
11-3-1

An Estimation of Life Time in Epoxy composites using Weibull Distribution Equation

신철기*, 김진사, 정일형*, 임장섭*** 김태성**, 이준웅*

(Cheol-Gi Shin, Jin-Sa Kim, Il-Hyung Jung, Jang-Seob Lim, Tae-Sung Kim, Joon-Ung Lee)

Abstract

In order to estimate the life time of epoxy composites used for molding material of transformer, the AC breakdown experiments of it were experimented and then the AC breakdown data were also simulated by Weibull distribution equation in this study. The life time of H100F65 specimen was the shortest and it of SH100F65 specimen was the longest, and as the AC voltage was applied to specimen for 50[min], the breakdown probability of each specimen was 31.2[%], 17.99[%], 84.86[%] and 12.35[%], respectively.

Key Words(중요용어) : Epoxy Composites(에폭시 복합체), Hardener(경화제), Filler(충진제), Silane Coupling Agent(계면 결합제), Life Time(수명 시간)

1. 서 론

전기 에너지의 신뢰성 높은 공급은 전기 절연 기술의 뒷받침 없이는 실현되기 어렵기 때문에 이를 위한 절연 재료에 관한 연구 및 개발의 성과를 이루어 안전성이 높은 송배전 체계 및 전력 기기의 확대를 실현시켜야 하며, 또한 절연 구성 상의 고전계화에 대처하기 위해서는 전기 절연성을 미시적인 관점의 물성론적 해석이 선행되어야 한다. 이로부터 기존 재료의 특성 개선 및 신소재의 개발에 있어 기본 개념을 얻는데 이점이 있으며, 특히 장기적인 수명을 지배하는 각종 절연 열화 현상의 해명시 물성론에 기초한 이론적 해석이 절실히 요망되고 있다.¹⁾

에폭시 복합체는 우수한 절연성을 가지고 있어서 PT나 CT 등의 절연 몰드 재료로 널리 사용되고 있

다. 하지만 일반적으로 시간의 경과에 따라 절연성이 떨어져 사고를 유발시키므로 안정된 시스템을 구축하기 위해서는 절연 재료의 열적, 기계적, 화학적 및 경년(經年) 열화에 대한 제 현상론의 이해와 열화 진단에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 하며, 또한 현재 진행되고 있는 전력 분야에서 계통의 초고압화 및 제반 송배전 계통의 안정성을 도모하기 위하여 여러 가지 연구가 수행되어야 한다.

그리고 고전압 또는 고전계 기술에 있어서 절연 파괴 전압이나 임의의 일정 전압이 인가될 때의 수명 예측에 관한 데이터는 매우 중요하며, 특히 절연 진단 시에 비절연 파괴와 절연 파괴 사이의 관계를 나타내는 데이터 또한 중요하다. 그러나, 이들 수명 예측이나 절연 파괴에 관한 데이터는 일반적으로 산만하고 흐트러져 있기 때문에 일정한 통계 처리를 행하여 정량적으로 평가할 필요가 있다.²⁾

따라서, 본 연구에서는 송배전 계통에서 변성기의 몰드 재료로서 널리 사용되고 있는 에폭시를 주재(主材)로 하여 설정해 놓은 배합비에 의하여 제작한 각 시편에 대해 교류 절연 파괴 실험을 하여 얻어진 절연 파괴 데이터를 가지고, 수명 평가나 파괴 통계에서 주로 쓰이는 와이블 분포식을 이용하여 절연

* : 광운대학교 공대 전기공학과

(서울시 노원구 월계동 447-1, Fax: 02-912-5144

E-mail: joonung@daisy.kwangwoon.ac.kr)

** : 전남대학교 전기공학과

*** : 목포해양대학교 해양전자·통신공학부

1997년 9월 14일 접수, 1997년 12월 1일 심사완료

수명 시간을 추정할 수 있는 데이터의 통계 처리 방법을 제안하였다.

2. 실험

2-1. 사용 시료

본 연구에 사용된 에폭시 수지는 고온 경화용 주형 수지로 상온에서 액상인 비스페놀-A형 (Bisphenol-A type) 수지이며, 경화제는 산무수물 계통의 MeTHPA(Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였으며, 기계적·열적 특성을 개선시키고 단가 절감을 위해 실리카(SiO₂)를 충전제로서 사용하였다. 또한 유기질인 에폭시 수지와 무기질인 실리카 사이의 결합 상태를 개선하기 위하여 아미노 실란계의 계면 결합제(KBM 603)를 1 [wt%] 첨가하였으며, 경화물의 충격 강도와 인장 강도를 개선시키기 위하여 가소성 부여제(DY-040)를 5[wt%] 첨가하였다.¹⁾⁻²⁾

표 1. 시료의 혼합비

Table 1. Mixing ratio of specimens

(단위: [wt%])

시료명	에폭시	경화제	충진제	계면처리	유연제
H80FN	100	80	-	-	5
H100FN	100	100	-	-	5
H100F65	100	100	65	-	5
SH100F65	100	100	65	○	5

2-2. 시료 제작

절연 파괴 실험용 시편의 형상은 가로 및 세로가 각각 30[mm]이고, 두께가 3[mm]인 Teflon Molder에 직경 4[mm Ø]의 강구(強球)를 넣고 그림 1과 같은 절차로 제조된 액상의 에폭시 복합체를 부어 제작하였는데, 무충진 시편의 경우에는 100[°C]에서 4시간 동안 1차 경화를 하고 140[°C]에서 8시간 동안 2차 경화를 하여 시편을 제작하였으며, 또한 실란 처리한 충전 시편의 경우에는 경화 전에 우선 실리카를 500[°C]에서 5시간 동안 고온 처리하여 각종 불순물을 제거한 후 실란 계면 결합제를 처리하여 80[°C]에서 4시간 동안 건조시킨 다음 실란 처리한 충전제를 액상의 에폭시 수지와 중량 비율로 혼합한 후에 경화제와 유연제 등을 넣고 진공 탈포 시킨 후 1차, 2차 경화를 행하여 시편을 제작하였다.³⁾⁻⁴⁾

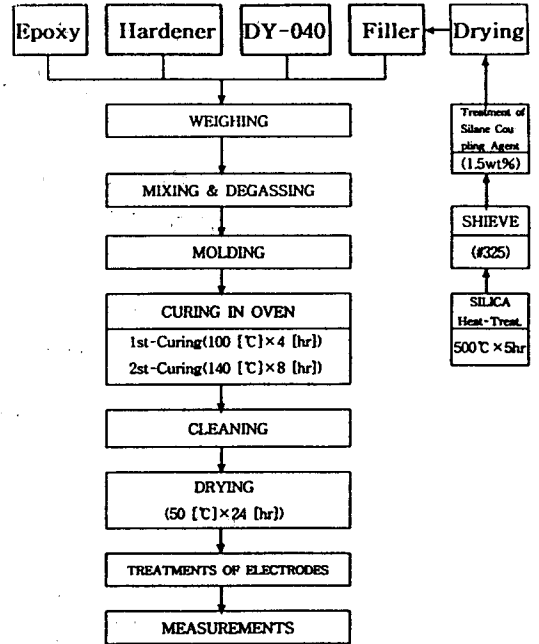


그림 1. 시편 제작 과정

Fig. 1. Manufacturing process of specimens

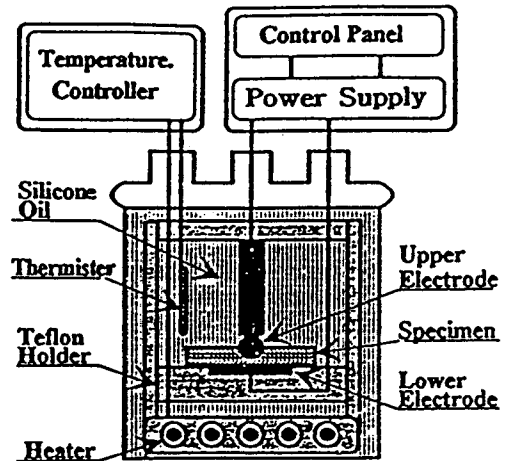


그림 2. 실험 장치

Fig. 2. Experimental apparatus

2-3. 실험 방법

연면 방전을 방지하기 위하여 탈기 처리한 실리콘 오일 중에서 교류 6[kV]의 전압을 인가하여 절연 파괴가 일어나는 시간을 측정하였다. 그리고 측정 회

수는 동일 조건 하에서 10개의 시편을 취하여 실험 하였으며, 전극 간의 거리는 200[μm]로 하여 구-평판 전극계를 구성하였다. 다음의 그림 2에 절연 파괴 실험 장치를 나타내었다.

2-4. 와이블 분포 통계 처리

그림 3은 에폭시 복합체의 절연 파괴 실험으로부터 얻은 데이터를 가지고 인가 전계에 대한 파괴 확률을 추정하기 위하여 수행된 절차를 나타낸 알고리즘이다.

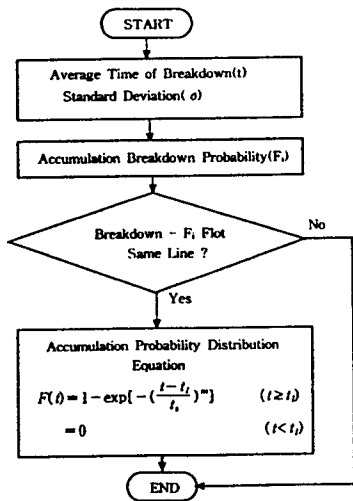


그림 3. 와이블 분포 통계 처리 과정
Fig. 3. The statistics process of Weibull distribution

3. 결과 및 고찰

3-1. 평균 수명

각 시편에 대한 평균 수명 시간을 구하기 위하여 우선적으로 두께 100[μm]의 시편에 일정 전압(6[kV]) 하에서 상온에서의 파괴 수명 시간을 측정하여 표 2와 같은 결과를 얻었다.

여기에서 각 시편에 대한 파괴 시간을 측정해 본 결과 실란 처리를 한 SH100F65 시편에서의 평균 파괴 시간이 105분으로 가장 높게 나타났는데 이는 실란 처리를 통해 계면으로의 전계의 집중을 어느 정도 막을 수 있기 때문으로 사료된다.

또한 파괴 데이터를 실제 기기 설계에 이용하는 경우 평균 값이 중요하기는 하나 흐트러짐의 정도인 표준 편차도 매우 중요하여 아무리 평균 값이 높더

표 2. 각 시편의 파괴 수명 시간

Table 2. Breakdown life time of each specimen

시편 회 수	H80FN	H100FN	H100F65	SH100F65
1	35분 38초	33분 24초	11분 07초	42분 55초
2	41분 08초	55분 10초	15분 01초	58분 23초
3	46분 08초	61분 11초	23분 16초	64분 28초
4	53분 23초	71분 07초	25분 47초	81분 11초
5	56분 07초	78분 58초	28분 17초	95분 12초
6	63분 00초	88분 24초	31분 15초	107분 21초
7	64분 03초	95분 44초	36분 16초	114분 08초
8	66분 01초	99분 12초	43분 09초	119분 47초
9	77분 54초	107분 09초	46분 36초	123분 59초
10	80분 18초	112분 02초	49분 31초	132분 57초
평균(X)	58분 22초	80분 14초	31분 02초	105분 00초
표준편차 (σ)	14분 29초	23분 48초	12분 16초	28분 17초

라도 표준 편차가 높게되면 실용적이지 못하기 때문에 각 시편에 대한 표준 편차 값도 나타내었다. 표준편차 σ는

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

의 식으로 구하였으며, SH100F65 시편의 경우가 가장 높게 나왔는데, 이는 절연 파괴 시간이 길기 때문에 나타난 것으로 사료된다.

3-2. 와이블 분포

파괴 시간에 따른 수명을 예측하기 위한 와이블 분포 통계 처리를 이용하기 위해서는 먼저 시편에 따른 누적 파괴 확률, 척도 파라미터, 형상 파라미터 등을 구해야 하는데,⁵⁾⁻⁶⁾ 이를 위해서 먼저 표 2의 데이터를 이용하여 파괴 시간이 적은 순서대로 정렬한 후, i번째의 데이터 t_i에 대하여 다음의 식 (1)에서 계산되는 누적 파괴 확률 F_i를 대응 시킨다. 여기서 n은 데이터의 수이다.

$$F_i = \frac{i}{n+1} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여⁵⁾ 다음 표 3과 같은 누적 파괴 확률을 구하였다.

파괴 수명 예측을 위한 와이블 분포 방정식은⁵⁾

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_i}{t_s}\right)^m\right] \quad (2)$$

로 나타내는데, 여기에서 F(t)는 누적 확률 분포이고, t_i은 위치 파라미터이고, t_s는 척도 파라미터이

표 3. 에폭시 복합체의 누적 파괴 확률
Table 3. Accumulation breakdown probability of epoxy composites

시편 번호	누적 파괴 확률[%]
1	9.1
2	18.2
3	27.3
4	36.4
5	45.5
6	54.5
7	63.6
8	72.7
9	81.8
10	90.9

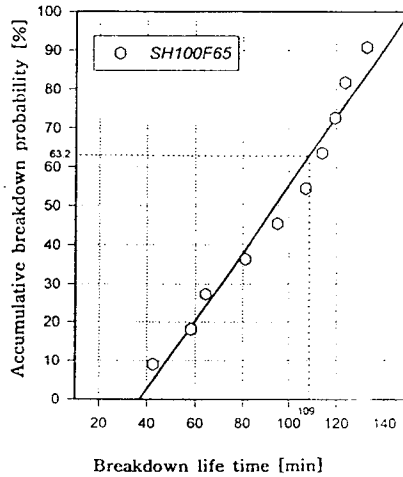
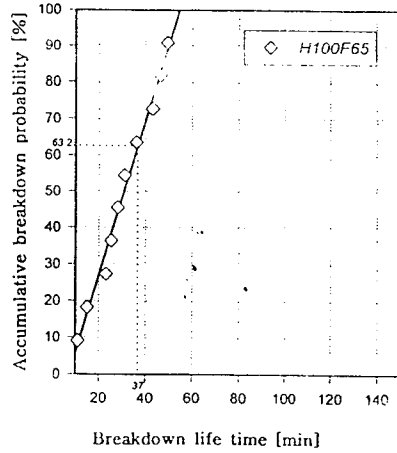
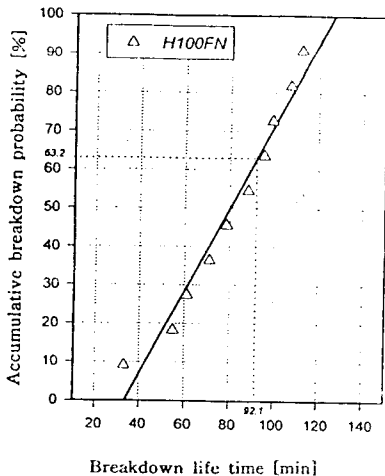
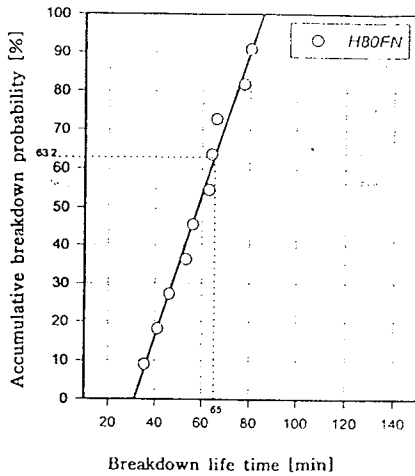


그림 4. 각 시편의 척도파라미터

Fig. 4. Measuring parameter of each specimen

며, m 은 형상 파라미터이다.

표 2에서 모든 시료의 파괴 시간을 측정하여 그림으로 나타낸 결과 이 플롯점이 거의 직선상에 나란히 하고 있기 때문에 와이블 분포식을 적용시킬 수 있다. 이들 데이터에 대하여 직선에 꼭 들어 맞도록 하고 직선의 기울기로 부터 형상 파라미터(m)를, 그 직선과 누적 파괴 확률(F)이 63.2 [%]일 때 시간 값으로 부터 척도 파라미터(t_s)를 얻는다. 다음의 그림 4에 각 시편의 척도 파라미터(t_s)를 각각 도시하였으며, 이를 표 4에 정리하여 나타내었다.

한편, 형상 파라미터(m)를 구하기 위하여 와이블 분포 방정식을 변형하면,

표 4. 척도 파라미터

Table 4. Measuring parameter

구 분	H80FN	H100FN	H100F65	SH100F65
척도 파라미터 (t_s)	65분00초	92분30초	37분00초	109분00초

$$1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{t_s}\right)^m\right] \quad (3)$$

이 되며, 윗식 (3)으로 부터 이것의 역수를 취하여 자연 대수를 두 번 취하면

$$\ln \ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right] = m \ln\left(\frac{t}{t_s}\right) \quad (4)$$

를 얻는다. 이 식에서

$$X = \ln\left(\frac{t}{t_s}\right), \quad Y = \ln \ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right] \quad (5)$$

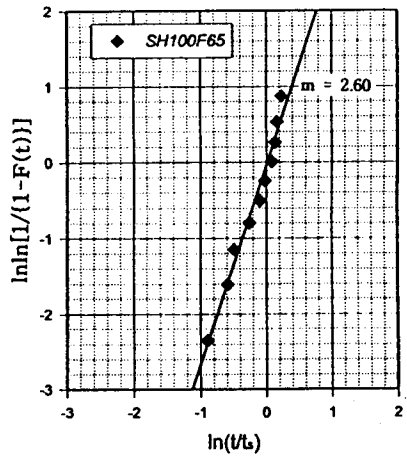
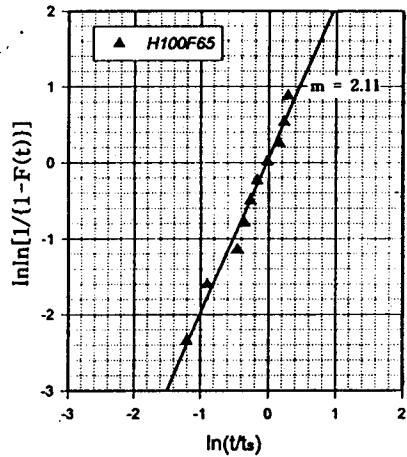
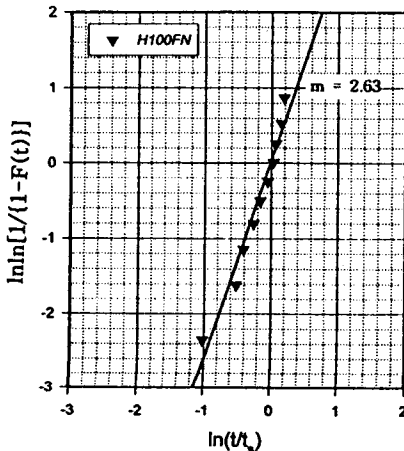
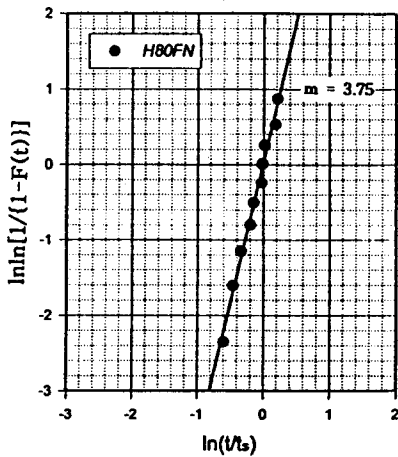


그림 5. 각 시편의 와이블 플롯

Fig. 5. Weibull plot of each specimen

표 5. 형상 파라미터

Table 5. Shape parameter

구 분	H80FN	H100FN	H100F65	SH100F65
형상 파라미터 (m)	3.75	2.63	2.11	2.60

라 하면, 형상 파라미터(m)는 일차 함수에서의 기울기에 해당되므로, 그림 5와 같이 와이블 플롯을 행하여 표 5 및 표 6에 각각 형상 파라미터(m) 및 그 X, Y 좌표 값을 나타내었다.

표 6. 형상파라미터를 위한 X, Y 좌표
Table 6. X, Y coordinate for shape parameter

구 號	H80FN		H100FN		H100F65		SH100F65	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-0.60	-2.35	-1.02	-2.35	-1.20	-2.35	-0.93	-2.35
2	-0.46	-1.61	-0.52	-1.61	-0.90	-1.61	-0.71	-1.61
3	-0.34	-1.14	-0.41	-1.14	-0.46	-1.14	-0.53	-1.14
4	-0.20	-0.80	-0.26	-0.80	-0.36	-0.80	-0.30	-0.80
5	-0.15	-0.50	-0.16	-0.50	-0.27	-0.50	-0.14	-0.50
6	-0.03	-0.24	-0.05	-0.24	-0.17	-0.24	-0.02	-0.24
7	-0.02	0.011	0.03	0.011	-0.02	0.011	0.046	0.011
8	0.016	0.26	0.07	0.26	0.154	0.26	0.094	0.26
9	0.181	0.533	0.15	0.533	0.231	0.533	0.129	0.533
10	0.211	0.874	0.19	0.874	0.292	0.874	0.199	0.874

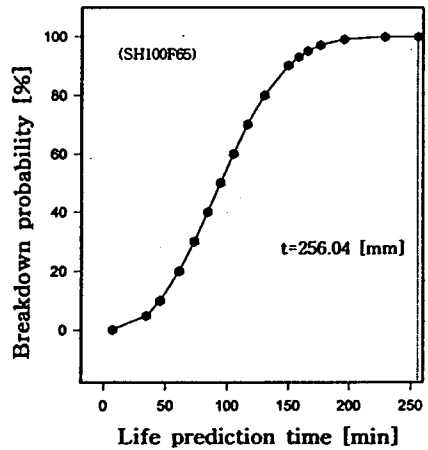
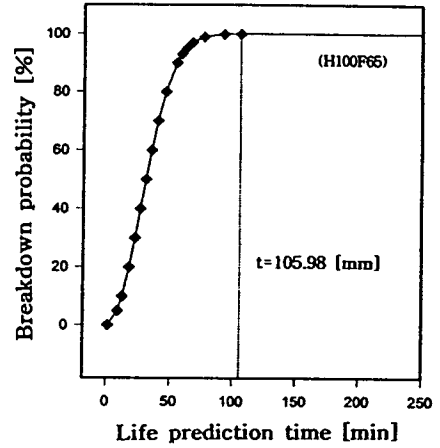
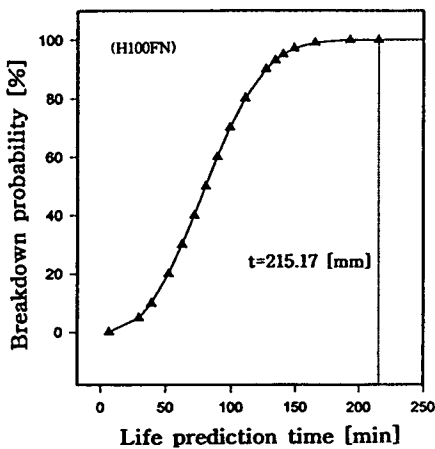
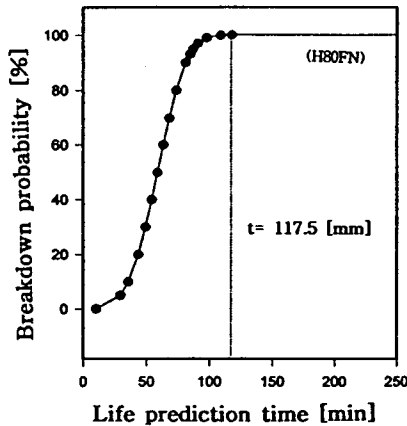


그림 6. 파괴 확률에 따른 수명 예측 시간
Fig. 6. Estimated life time according to break-down probability

3-3. 와이블 통계 처리를 이용한 수명 진단⁵⁾⁻⁸⁾

전 항에서 얻은 데이터를 통해 그림 6에 파괴 확률에 따른 수명 예측 시간을 도시하였으며, 허용 파괴 확률 0.1 [%]~99.99 [%]일 때의 파괴 수명을 예측하여 표 7에 그 결과를 나타내었는데, 이에 의하면 파괴 확률에 관계없이 SH100F65 시편에서의 수명 예측 값이 가장 길었으며 다음에 H100FN-H80FN-H100F65 순으로 파괴 수명 값이 예측되었다.

또한, 각 시편에 대해 전압 인가 시간이 10, 30, 50, 100, 150, 200분 일 때의 각 시편의 파괴 확률을 구하여 표 8에 나타내었다.

표 7. 파괴 확률에 따른 수명 예측값
Table 7. Estimated values of life time according to breakdown probability

파괴 확률 (%)	수명 예측값(min)			
	H80FN	H100FN	H100F65	SH100F65
0.1	10.30	6.69	1.40	7.65
5	29.44	29.90	9.05	34.78
10	35.67	39.31	12.74	45.87
20	43.57	52.29	18.18	61.22
30	49.38	62.50	22.70	73.32
40	54.34	71.65	26.91	84.18
50	58.95	80.47	31.10	94.67
60	63.50	89.48	35.50	105.40
70	68.30	99.27	40.40	117.07
80	73.80	110.85	46.36	130.90
90	81.20	127.02	54.94	150.22
93	84.37	134.17	58.82	158.78
95	87.09	140.39	62.24	166.23
97	90.83	149.05	67.06	176.60
99	97.67	165.32	76.30	196.12
99.9	108.83	192.88	92.47	229.22

표 8. 인가 시간에 따른 시편의 파괴 확률
Table 8. Breakdown probability of each specimen according to applied time

시 간 (min)	파괴 확률 (%)			
	H80FN	H100FN	H100F65	SH100F65
10	0.089	0.287	6.13	0.2
30	5.36	5.04	47.40	3.43
50	31.19	17.99	84.86	12.35
100	99.35	70.70	99.97	55.03
150	100	97.17	100	89.91
200	100	99.95	100	99.21

4. 결 론

에폭시 복합체의 경화제, 충전제의 변화에 따른 파괴 특성을 이해하고 파괴 시간을 이용한 수명을 예측하기 위하여 제작된 각 시편을 실리콘 오일 중에서 교류 6[kV]의 전압을 가하여 절연 파괴가 일어날 때까지의 수명 시간을 측정 한 후, 와이블 분포를 이용하여 절연 진단을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실란 처리는 무기질과 에폭시 사이의 계면으로의 전계의 집중을 방지하여 파괴 시간을 높게 하였다.
- 2) 형상 파라미터 값의 변화는 각 시편의 파괴되는 시간의 형상을 나타낸 것으로서 H80FN 시편이 파

괴되는 시간의 폭의 비율이 가장 좁게 나타나서 측정된 시편의 산만 정도가 가장 안정된 것으로 나타났으며, H100F65 시편이 산만 정도가 가장 넓게 나타난 것을 알 수 있었다.

3) 실란 처리를 하지 않고 충전제만을 첨가한 시편인 H100F65 시편이 예상되는 파괴 수명이 가장 짧은 것으로 나타났으며, 실란 처리를 한 SH100F65 시편이 파괴 확률에 따른 파괴 수명이 가장 길게 나타났다.

4) 50분간 동일 전압을 인가했을 때, 각 시편들의 파괴 확률은 각각 31.2, 17.99, 84.86, 12.35[%]로 나타났다.

수명 예측에 관한 장래 연구 방향은 산업 현장에서 사용되는 부품이나 시스템 등의 장기적인 성능을 사전에 평가하고 기기나 설비의 이상 징후등이 발생할 수 있는 절연 사고를 미리 예측할 수 있도록 절연 신뢰도 및 수명 진단을 할 수 있는 시뮬레이션 프로그램의 개발을 이룩해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학 공동연구소 연구비 지원에 의해서 수행됨.(과제관리번호 : 96-중기-05)

참 고 문 헌

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 Resin, Bryan Ellis, Edit." Blackie Academic & Professional, pp.77-113, 1993
3. X. M. Chen and B. Ellis, "Coatings and Other Applications of Epoxy Resins -Chemistry and Technology of Epoxy Resin, Bryan Ellis, Edit." Blackie Academic & Professional, pp.303-327, 1993
4. "固體絶縁材料の添加劑, 充て濟の効果," 電気學會技術報告, II部, 第342號, pp.3-58, 1990
5. "電気設備의 診斷技術," 日本電気學會編著, pp.39-59, 1985
6. 市田, 鈴木, "信頼性の 分布て統計," 日科技連, pp. 176-201, 1990
7. 野中保雄, "信頼性 データのとり方, とめ方," 日科技連, pp.45-72, 1987
8. 崔鍾碩 外 3人 "統計學 概論," 正益社, pp.431-443, 1989