

와이블 분포를 이용한 에폭시 복합체의 수명시간 예측

An Estimation of Life Time in Epoxy Composites Using Weibull Distribution

오현석 광운대학교 공대 전기공학과
이동규 광운대학교 공대 전기공학과
장인범 광운대학교 공대 전기공학과
박건호 청강문화산업전문대 이동통신과
김용주 충주산업대 공대 전기공학과
이준웅 광운대학교 공대 전기공학과

Hyun-Seok Oh Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon Univ.
Dong-Kyoo Lee Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon Univ.
In-Bum Jang Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon Univ.
Geon-Ho Park Chungkang College of Cultural Industries
Yong-Ju Kim Dept. of Electrical Eng., Chungju Industrial Univ.
Joon-Ung Lee Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon Univ.

Abstract

The method of estimating life time of epoxy composites which be widely used for transformers has been studied in this paper. The breakdown properties of specimens are observed by applying high AC voltage at the room temperature from a series of the experiments. Afterwards, the breakdown time was determined under the constant voltage below the lowest breakdown voltage.

Also, V-t properties were found out using weibull distribution widely used in the applications of discrete data for estimating life time of epoxy composites and life exponent n was gained properly. when life exponent is gained is found out, the long breakdown life time at used voltage can be estimated from breakdown experiments in short time using reverse law of n power.

1. 서 론

에폭시 복합체는 우수한 절연성을 가지고 있어서 전력 계통을 비롯한 여러분야에서 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(經年) 열화에 대한 제 현상론의 이해를 통한 대처 방안 및 열화 진단에 관한

연구가 필수적으로 이루어져야 하는데, 이 중에서도 기기의 절연파괴 수명을 예측하는 것은 기기의 안정된 사용환경을 결정하는 중요한 요소이므로 본 연구에서는 에폭시 복합체의 조성비에 따른 절연수명을 예측해 봄으로써 수명예측의 방법을 제시하고자 하였다.

2. 관 계 이 론

2-1. 절연물체에의 와이블 분포 적용

실제의 절연물에 있어서, 한가지 변수만으로 와이블 분포를 적용하여 피시험 대상물의 절연 수명을 예측하는 것은 지극히 단편적인 데이터밖에 얻지 못하기 때문에 여러 가지 조건들을 확률 변수로 취하여 종합적으로 누적 확률 분포 함수를 구한다. 보통 $V-t$ 특성으로 수명을 예측할 수 있으므로 시간과 인가 전압(전계)을 확률 변수로 한 2-변수 와이블 분포 함수를 취하여 시료의 $V-t$ 특성을 고찰한다.

시험물에 가해지는 전압을 확률 변수로 취하면, 전압에 대한 누적 확률 분포는

$$F(V) = 1 - \exp\left\{-\frac{V^b}{V_0}\right\}$$

같은 절차에 따라, 시간 t 를 포함한 2-변수 와이블 분포함수를 얻는 것이 가능하다.

$$\lambda(V, t) = \frac{b}{V_0} V^{b-1} \frac{a}{t_0} t^{a-1}$$

$$F(V, t) = 1 - \exp\left\{-\frac{V^b}{V_0} \frac{t^a}{t_0}\right\}$$

2-2. $V-t$ 특성의 추정 방법

가. 시편의 순간 파괴 전압을 측정한다.

나. 순간 파괴 전압값의 평균을 기준으로 평균값보다 단계적으로 낮은 값을 인가하여 각각의 전압에 대한 파괴 시간을 와이블 확률분포로 추정한다.

다. 가와 나로부터 구한 와이블 확률데이터 중 파괴확률이 각각 $F(i)$ 일 때 같은 $F(i)$ 의 값을 가지는 (V, t) 값을 구하여 $V-t$ 특성도를 구한다.

2-3. $V-t$ 특성 해석으로부터의 수명 예측

파괴 전압과 파괴 시간을 와이블 확률 분포로 정리하면

$$F(V, t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{V}{V_0}\right)^b \left(\frac{t}{t_0}\right)^a\right\}$$

$$= 1 - \exp\left\{-\left(\frac{V^n t}{V_0^n t_0}\right)^a\right\}$$

여기서, V 는 파괴전압, t 는 파괴시간, $V_0 \cdot T_0$ 는 척도 파라미터, $b \cdot a$ 는 형상 파라미터, $n = b/a$ 이다. 고찰에 의하면, 같은 누적확률 분포에서는 두 변수 사이에 역 n 승 법칙이 성립한다.^{1),2)} 이에 따라 $F(V, t)$ 의 식에 대해서 식(1)과 같은 수명 특성

식이 얻어진다. 이때 n (수명지수)은 열화의 속도를 나타내는 정수로서 수 차례에 걸친 실험적 경험값에 의해서 구해진다. 따라서 n 값이 정해지면 단시간(수 시간 ~ 수 년)에서의 파괴 전압으로부터 사용 전압에서의 수명을 추정할 수 있고 취약점 부분의 설계에 있어 보다 경제적인 확정 값을 얻을 수 있다. 한편 초기 파괴 시험과 같이 일정 시간 승압하여 파괴 전압을 구하는 경우에는 전압 V 의 위치 파라미터 V_L 을 고려하여 아래와 같이 정리한다.

$$V^n t = C \quad (1)$$

$$F(V) = 1 - \exp\left\{-\frac{(V - V_L)^m}{V_0}\right\}$$

이것을 전계에 관해서 표기하면,

$$F(E) = 1 - \exp\left\{-\frac{(E - E_L)^m}{E_0}\right\}$$

위치파라미터 E_L 은 파괴확률이 0이 되는 전계로서 절연 설계의 기준이 된다.

일반적으로 n 값은 다수의 고정 시험 전압에서의 파괴 시간으로부터 구하며 그 순서는 다음과 같다.

1) 일정 시험 전압 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ 에 대하여 파괴 시간들을 측정한다.

2) 각 시험 전압에서의 파괴 시간을 와이블 확률 분포로 추세를 그려서 평균값($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$)을 취한다.

3) $V-t$ 특성도에 1)과 2)에서 구한 데이터들의 (V_i, t_i) 좌표를 입력한다.

4) 좌표점 간의 관계 $V^n t$ 가 일정하다는 관계를 이용하여

$$V_1^n t_1 = V_2^n t_2 = Const \quad (2)$$

$$V_1^n = V_2^n \frac{t_2}{t_1}$$

$$n \log V_1 = n \log V_2 + \log \frac{t_2}{t_1}$$

$$n(\log V_1 - \log V_2) = \log \frac{t_2}{t_1}$$

n 에 대해서 정리하면,

$$n = \frac{\log \frac{t_2}{t_1}}{(\log V_1 - \log V_2)} \quad (3)$$

각 좌표 점들로부터 식 (3)를 이용하여 적당한 n 값을 정한다.

수명지수 n 이 정해지면 식 (2)에 대입하여 파괴 전압과 시간과의 관계를 추정할 수 있다.

3. 실험

3-1. 시편 제작

절연 파괴값을 측정하기 위하여 가로, 세로 각각 30 [mm]인 Teflon Molder를 제작한 후 에폭시, 경화제, 유연제, 충전제, 계면결합제 등을 표 1의 조성비에 맞게 혼합하여 그림 2의 시편 제작과정을 통해 그림 1과 같은 시편을 제작하였다.^{3), 4), 5)}

3-2. AC 절연 파괴 실험

절연 파괴 실험 장치를 그림 3과 같이 구성하여 전압의 승압속도를 1 [kV/sec]로 하여 절연 파괴가 일어날 때까지 승압하면서 측정하였다. 그리고 측정 회수는 동일 조건하에서 10개의 시편을 취하여 그 평균값을 파괴 전압으로 하였다. 그 다음에 AC 순간 평균 파괴 전계값보다 단계적으로 낮은 전계를 일정하게 인가하여 얻어지는 각각의 파괴시간들을 구하였다.⁶⁾

3-3. 와이블 분포를 이용한 수명 예측

다음은 에폭시 복합체의 절연 파괴 데이터를 이용하여 파괴 수명을 예측하기 위해 수행된 절차이다.

- 1) 각 시편들의 종류에 따른 상온에서의 순간 파괴 전압의 평균을 구한다.
- 2) 순간 평균 파괴 전계값보다 단계적으로 낮은 전계를 인가하여, 얻어지는 파괴 시간들을 와이블 확률 분포에 적용한다.
- 3) 각 시편 종류에 따른 $V-t$ 특성도를 구한다.
- 4) $V-t$ 특성도에서 적절한 수명 지수 n 값을 선정한다.
- 5) 구해진 n 값을 이용하여 각각의 사용 전계에서의 수명을 추정한다.

4. 실험 결과 및 고찰

각 시편들의 AC 파괴 전압을 다양한 온도에서 측정한 결과 표 2와 같은 각각의 온도에서의 평균 파괴전계 값을 구하였다. 표 3은 각 시편의 인가전압에 따른 파괴시간을 표 4는 1시간에 파괴되는

전계값을 나타내었다. 이상의 측정 결과로부터 수명지수를 구해보면 표 5와 같고, 최저 허용 파괴전계를 고려한 전압-시간과의 관계를 그래프로 나타내면 그림 4와 같다.

5. 결론

와이블 확률분포를 이용하여 구한 $V-t$ 특성으로부터 $V^n t =$ 일정함을 이용하여 적절한 수명지수 n 을 구할 수 있었고, 구해진 수명지수로부터 절연 설계에 있어서 사용 전압에 대한 수명에 따른 초기 내전압값과 이로부터 절연 두께를 구할 수 있다. 실란 처리를 행한 시편인 SH100F65의 수명지수가 19 정도로 가장 높게 나타났으며, H100FN과 H80FN이 각각 19와 17의 수명지수를 가지는 것으로 고찰되었다. 이로부터 인가 전계가 30[kV/mm]인 경우의 수명은, 최저 허용 인가를 고려하면, H80FN이 약 3.4년, H100FN이 약 35년, 그리고 SH100FN이 약 41년으로 나타났다. 파괴 시간에 따른 수명 진단의 다양한 실험을 통해서, 산업 현장에서 부품이나 시스템의 장기적인 성능을 사전 평가할 수 있으며, 기기나 설비의 이상징후나 앞으로 발생할 수 있는 사태를 미리 예측해 볼 수가 있으므로 지속적인 연구가 이루어져야 한다고 사료된다.

참고문헌

1. “長時間V-t特性における最適數學モデル選定と壽命推定の統計的方法”, 電學論, 112B, No.9, 1992
2. J.J. O'Dwyer, “The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics”, Clarendon Press. Oxford, 1973
3. 算允男, 池田恭久, 安西健司, 簡牛千秋, “注型, ポレィソグ, エソギャブシュレーション : 新エポキシ樹脂, 相内弘 編著”, 昭光堂, pp. 406 - 452, 1985
4. CNC, “液狀樹脂の最新成形, 應用技術”, Technical Report No.26, pp.154-164, 1984
5. 元起巖, 時光 富士雄, 喘貫 勇次郎, “エポキシ樹脂の柱形技術と應用”, 富士時報, 第47券. 第8號, pp.25-30, 1974
6. 吉村, 藤田, 外 2人, “アルシナ充てんエポキシ樹脂の交流短時間破壊特性”, 日本, 電學論A, 102, 773 (昭 57-12)

표 1. 시료의 조성비 및 경화조건

시료명	에폭시	경화제	충진제	제면처리	유연제	경화조건
H80FN	100	80	0	-	5	• 교반 - 80(°C) 30(min)
H100FN	100	100	0	-	5	• 1차 경화 - 100(°C) 4(hr) • 2차 경화 - 140(°C) 10(hr)
SH100F65	100	100	65	*	5	*: 제면처리를 행한것.

표 2. 온도에 따른 교류 절연파괴장도[kV/mm]

온도[°C]	H80FN	H100FN	SH100F65
30	85	105.5	120
40	86	115	118.5
50	90	126	117.5
60	94	133	115
70	97	140	105
80	109	142.5	95
90	114	138	93
100	100	110	90
110	82	80	85
120	74	69	78
130	60	60	75
140	45	52	72.5
150	31	45	68.5

표 3. 각 시편의 인가 전계에 따른 파괴시간[min]

시편종류	H80FN				H100FN				SH100F65			
	인가전계[kV/mm]				인가전계[kV/mm]				인가전계[kV/mm]			
시편번호	60	58	56	54	60	58	56	54	60	58	56	54
1	39.5	50	167	390	33	92	270	592	43	66	293	496
2	41	65	175	406	50	117	295	695	59.5	108	342	643
3	46	77	201	436	56	130	307	637	64.5	144	389	769
4	53.5	93	232	470	58	152	321	672	81	168	427	846
5	56	115	268	503	62	172	344	701	95	194	452	952
6	63	125	275	538	65	188	376	738	107.5	246	508	1047
7	64	149	290	559	71	210	380	772	114	270	582	1130
8	66	168	322	587	76	229	399	802	120	289	576	1217
9	78	177	339	603	80	245	418	838	124	300	608	1294
10	80	189	362	628	86	275	445	851	133	313	622	1378

표 4. 각 시편의 1시간 파괴전계[kV/mm]

시편번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H80FN	55.8	56	57.5	58	59	60	61	62.5	64	64.2
H100FN	58	58.6	58.9	59	60	61	62	62.7	65.7	67
SH100F65	58.3	58.8	59.2	61	62	63	65	67	68	75

표 5. 각 시편의 수명지수

시편	H80FN	H100FN	SH100F65
수명지수	17 - 23	19 - 23	19 - 24

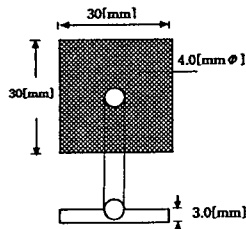


그림 1. 시편의 형상

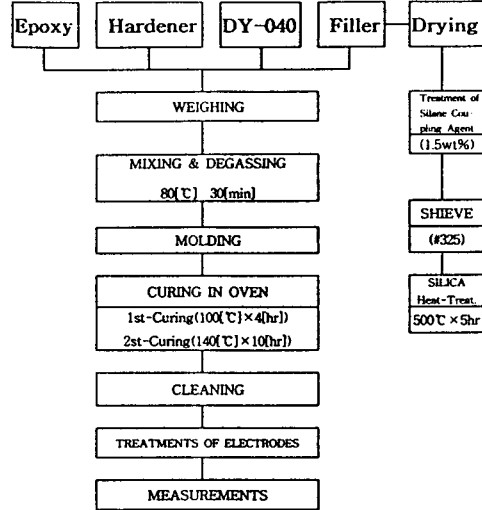


그림 2. 시편 제조 공정

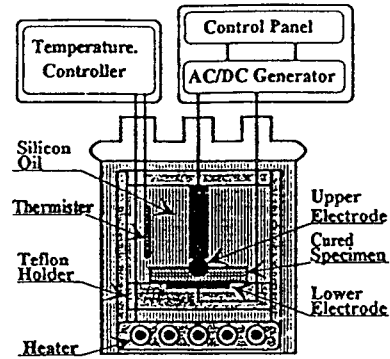


그림 3. 실험 장치

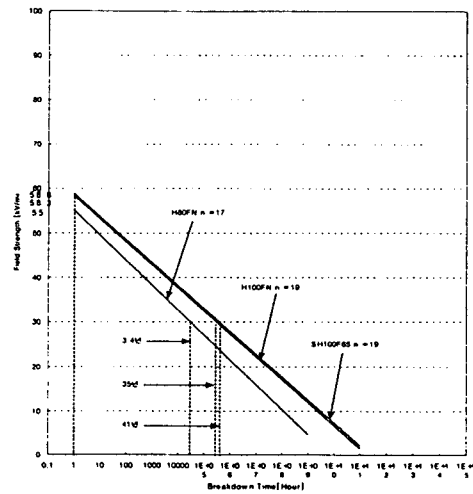


그림 4. V-t 특성에 따른 각 시편의 수명비교