

절연재료의 열화 및 수명평가를 위한 통계적기법



박대희
원광대학교 교수

1. 서 론

절연재료의 수명은 가해지는 전기적, 열적 스트레스, 기타의 환경 등에 의한 요인으로 절연열화가 진행되어 절연파괴에 이르게 되는 기간을 나타낸다. 결국 절연파괴는 절연재료의 물리적인 특성을 잃음으로 전기기기 및 전기용품의 성능을 발휘하지 못하도록 한다. 절연재료의 수명은 전기기기 및 전자소자의 성능에 직접적인 영향을 미치는 것으로 중요성이 높아지고 있는 추세에 있으며, 열화진단 및 평가기술의 확립이 요구되고 있는 실정이다. 절연재료의 수명평가는 절연파괴의 물리적 기구의 연구에 절연파괴현상을 가장 잘 표현할 수 있는 물리적 모델을 이용하여 해석하는 것과 같이, 절연재료의 공학적인 수명 해석에도 역시 수명특성을 잘 표현될 수 있는 모델을 이용하는 것이 필요하다.

절연재료의 수명은 미시적인 물

리적 원인에 의해 거시적으로 일어나고, 절연파괴의 형태로 나타내는 것이 많은 실험 결과로부터 증명되어졌으며 절연파괴는 시간적으로나 공간적으로도 확실적인 분포를 나타낸다. 이와 같은 특성을 고려한 절연재료의 수명평가는 수명분포를 고려한 모델을 기초로 하여 신뢰성공학을 이용한 통계적 방법에 의해서 해석하는 것이 넓게 이용되고 있다.

절연재료의 수명평가는 보다 단시간에, 보다 정확하게, 보다 적은 비용으로 수행하는 조건하에서 이루어 지도록 검토가 되고 있다. 또한 수명시험에서 얻어진 결과를 정리하고 해석하여 신뢰성이 높은 결과가 얻어지도록 계획을 세워야 한다. 이와같은 관점에서 수명시험은 어떠한 조건하에서 시험을 할 것인가를 가정하는 것이 어렵다. 따라서 일반적인 절연재료의 수명시험은 내열시험을 통하여 평가를 하고 있으며, 평가하는 과정에서 가열후 절연재료의 어떠한 물성을 시험하고 어떻게 평가할 것인가를 하는 것은 대단히 어려운 문제로 아직도 많은 이론과 규격이 제안되고 있다.

본 보고에서는 수명평가를 위한 이론적인 배경을 설명하고, 절연재료를 열화시킨후 물성의 저하를 평가 하면서 수명을 예측하고, 진단하는 방법을 요약하고자한다.

2. 가속시험과 수명모델

보통 절연재료는 장시간의 수명

을 예측하는 것으로, 시험시간은 대단히 길어진다. 그 해결책으로서, 혹독한 스트레스(온도, 전압 등)의 시험조건 하에서 열화를 촉진시켜 그의 결과로부터 통상의 사용 조건에서의 수명을 추정하는 가속 수명시험이 이용되어지고 있다. 가속 수명시험이 이용할 수 있는 조건은 스트레스에 대하여 수명의 가속성이 있고, 또한 각 시험 스트레스와 열화나 파괴기구나 수명과의 사이에 규칙성과 어떠한 물리적 법칙이 그림 1과같이 관련성이 있어야 한다.

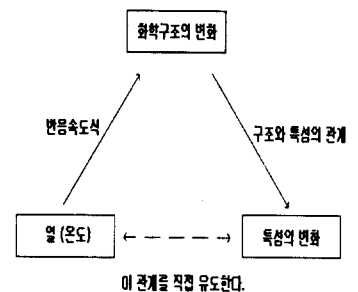


그림 1. 열화와 특성변화의 관계

구체적인 수명 추정에는, 수명과 가속 스트레스의 관계와 수명을 가장 잘 나타내는 분포함수와 관련되어지는 수명모델을 가정하고 해석하는 것이 적당하다. 절연재료의 수명의 가장 기본이 되는 내열수명에는, Arrhenius 모델, 전압수명에는 n승측 모델이 있다.

2.1 내열 수명 모델

이 모델은 앞에서 언급한 내용

을 요약한 것으로 절연재료의 열 열화를 화학반응 속도론에 입각하여 유도하는 내열수명모델로 물성론적 모델이라고 한다. 많은 절연재료는 온도와 수명간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

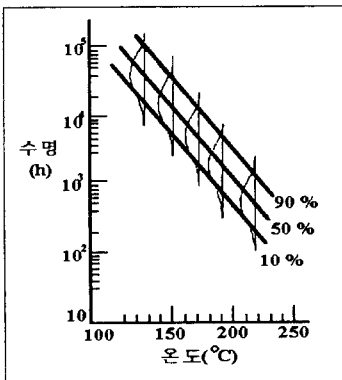
$$\ln L/t = C + B/T \quad (1)$$

여기에서 L은 수명(시간), t는 기준에 달하는 시간, B는 활성화 에너지, T는 절대온도로

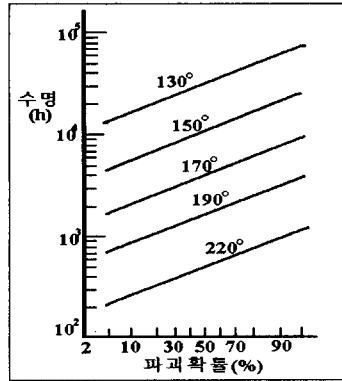
$$C = \ln[f(P_0) - f(P_T)] - \ln t \quad A \quad (2)$$

P_0 는 초기 물성치(절연파괴강도 혹은 인장강도등), P_T 는 수명의 특성치, A는 재료의 특성정수이다.

(1)식은 온도와 수명의 평균치(혹은 중앙치)를 나타내며, 실제의 수명은 대수 정규분포로 나타내면 바라스키를 갖는 경우가 많다. 내열수명특성이 (1)식, 수명분포가 대수정규분포의 양자로 나타내는 경우가 Arrhenius 모델이다. 즉 임의의 온도와 파괴확률에 대한 수명이 합리적으로 추정되는 방법이 Arrhenius 모델로 많이 사용되고 있다.



(a) Arrhenius Plot



(b) 대수 정규분포에서의 Plot

그림 2. 전기절연의 내열수명 예

그림 2는 전기절연의 내열수명을 Arrhenius모델로 해석한 예이다. 그림2(a)는 온도와 수명과의 관계를 Arrhenius plot로 나타낸 것으로 수명은 각 파괴확률에 대하여 평행으로 되며, (1)식이 성립한다. 그림 2(b)는 대수정규확률지에 온도를 변수로 하여, 수명과 파괴확률을 나타낸 것으로 수명분포는 대수정규분포로 나타낼수 있고 온도에 대하여 평행이다. 이 예의 해석으로부터 가속수명시험의 유효성을 확인하고, 임의의 온도와 파괴확률에 대한 수명을 합리적으로 추정할 수 있다.

2.2 역 n승측 모델

이 모델은 전압수명의 결과로부터 절연파괴의 확률을 도입한 확률적인 모델이다. 많은 절연재료의 전압수명은 경험에 의한 역 n승측이 성립되고, 또 수명분포는 Weibull분포에 적합되는 경우가 많다. 절연재료의 수명은 실사용의 면에서 생각해 보면, 과전상태 하에서 절연재료가 절연파괴될 때까지를 수명으로 실용적인 수명은 전압 수명을 특히 중시하고 있으며, 그 해석에 역 n승측 모델이 이용되어지고 있다. 실제적인 수

명추정은 Arrhenius모델을 이용하여 허용온도를 추정하고, 그 온도 조건하에서 전압수명을 역n승측 모델로부터 추정하는 것이 일반적이다.

3. Weibull분포에 의한 모델

3.1 인가전압과 수명(V-t 특성)

절연재료에 인가되는 전계 E와 파괴시간(수명)의 평균치(혹은 중앙치) t와의 관계(V-t 특성)는 대부분 다음의 식이 성립되어진다.

$$t = k \cdot E^{-n} \quad (3)$$

단, k는 정수이고 n의 값은 재료의 종류, 파괴기구등에 의해 다르다. 그림 3은 각종 절연재료의 대표적인 V-t특성으로 역 n승 법칙을 나타내고 있다. 종래의 수명 추정은 이 역n승 법칙에서 외삽하는 경우가 많았다. 그러나, 과전시간, 과전 스트레스를 일정하게 할 때 파괴강도, 파괴시간은 큰 바라스키를 갖는 분포를 갖으며, 수명은 본질적으로는 E와 t의 2가지 확률변수를 갖는 현상으로 취급하는 것이 합리적이라 볼 수 있다. 이와 같은 것으로부터 (3)식에 신뢰성공학의 수법을 도입하여 수명을 통계적으로 해석한다.

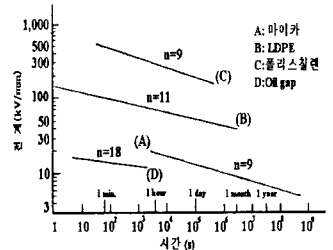


그림 3 각종 절연재료의 V-t 특성

3.2 파괴시간(수명)의 분포

절연재료에 일정한 전압을 인가할 때, 파괴시간의 확률을 Weibull 분포함수 $F(t)$ 로 나타내면 식(4)와 같다.

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/t_0)^{1/b}] \quad (4)$$

여기에서 t 는 시간변수, t_0 는 척도모수(파괴확률이 63 [%]로 되는 시간), b 는 형상모수(재료에 따라 결정되는 정수로 파괴시간의 바라스키를 나타낸다. $1/b$ 는 m 으로 나타내는 경우가 많다.)이다. 실측치의 분포의 적합도의 검정이나 각 모수의 추정은 Weibull 확률치를 이용하여 간단하게 구해진다.

3.3 순간파괴율과 파괴발생현상의 추정

일정 스트레스를 t 시간 과전할 때 건전했던 시료가 계속되는 과전으로 파괴하는 비율을 과전시간 t 에 있어서 순간파괴율 $\lambda(t)$ 라 정의하면 식(5)로된다.

$$\lambda(t) = f(t)/[1-F(t)] = 1/b \cdot 1/t \cdot (t/t_0)^{1/b} \quad (5)$$

$f(t)$ 는 확률밀도함수, (5)식에서 $\lambda(t)$ 는 t 의 증대에 대하여 $b < 1$ 일 때 증가, $b = 1$ 일 때 일정, $b > 1$ 일 때 감소한다. 이와 같은 파괴 발생의 확률현상은, 물리적으로는, $b < 1$; 마모형 파괴, $b > 1$; 초기형 파괴(최대 약점이 과전시간의 초기에 파괴한 후 안정되는 현상)로 분류된다. 이상의 관계에서 b 의 값은 수명을 결정하는 물리적 요인을 추정하는 유효한 방법이다. 또한 각 시험 스트레스에서 구해지는 b 의 값 비교로 부터 열화기구의 변화도 판단할 수 있다.

3.4 절연파괴강도의 분포

일정 과전시간 내의 파괴강도의 분포를 Weibull 분포함수 $F(E)$ 로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$F(E) = 1 - \exp[-(E - E_L/E_0)^{1/a}] \quad (6)$$

E ; 절연파괴강도의 변수, E_0 ; 척도모수, E_L ; 위치모수(최저절연 파괴강도), a ; 형태모수이다. 최저 절연파괴강도의 E_L 을 고려치 않으면 $E_L = 0$ 로서 (6)식은 (7)식으로 된다.

$$F(E) = 1 - \exp[-(E/E_0)^{1/a}] \quad (7)$$

3.5 F(t), F(E)와 절연체 체적의존성

$F(t)$, $F(E)$ 의 절연체적 의존성의 관계는 다음 식으로 유도되어진다. 단위 체적의 N 배의 체적에 있어서 파괴시간의 분포함수를 $F_N(t)$, 파괴강도의 분포함수를 $F_N(E)$ 라 하면

$$F_N(t) = 1 - \exp[-N(t/t_0)^{1/a}] \quad (8)$$

$$F_N(E) = 1 - \exp[-N(E - E_L/E_0)^{1/a}] \quad (9)$$

으로 된다. (4)식과 (8)식 및 (7)식과 (9)식에 각각 등가확률의 조건을 넣으면 수명, 파괴강도의 체적 의존성이 유도된다. 즉 과전 스트레스 E 를 단위체적의 절연체에 가할 때의 수명(예를 들면 중앙치)를 t_0 로 하고 같은 스트레스를 N 배 체적의 절연체에 가하는 경우의 수명을 t_N (중앙치)라 하면

$$t_N = t_0/N^a \quad (9)$$

으로 된다. 또 동일 과전시간에 대한 파괴강도는

$$E_N = E_L + (E_0 - E_L)/N^a \quad (10)$$

로 된다. 단, E_N 은 N 배 체적의 파괴강도, E_0 는 단위체적의 파괴강도이다. 절연재료의 실험결과를 위 관계를 이용하여 해석하는 보 고가 많다.

3.6 역 n승측과 F(E, t)의 관계

$t = 0$, 혹은 $E = 0$ 에서 $F = 0$ 의 조건을 가정하고, F 의 단승측 가형을 고려하면, 파괴강도와 파괴시간의 2가지의 확률변수를 갖는, 가장 간단한 파괴확률은 다음과 같은 Weibull 분포함수로 나타 낼 수 있다.

$$F(E, t) = 1 - \exp[-(E - E_L/E_0)^{1/a} (t/t_0)^{1/b}] \quad (11)$$

단 a, b 는 E, t 에 각각 독립과 함께 일정하다. 절연체체적을 일정 하다고 하면, $E_0^{1/a}, t_0^{1/b}$ 은 정수로 되므로 (12)식은 아래 식으로 변환시킬 수 있다.

$$F(E, t) = 1 - \exp[-C(E - E_L)^{1/a} t^{1/b}] \quad (12)$$

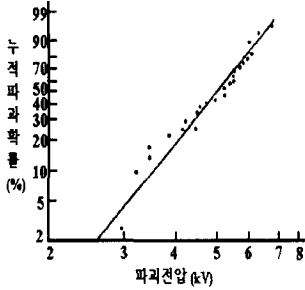
단, C 는 정수이다. (12)식에 따르면 등가확률의 곡선은 $\log t - \log(E - E_L)$ 평면 상에서 평행 직선이 된다. (12)식에서 파괴확률이 일정한 값(예를 들면 중앙치)의 경우는

$$t = K(E - E_L)^{-b/a} \quad (13)$$

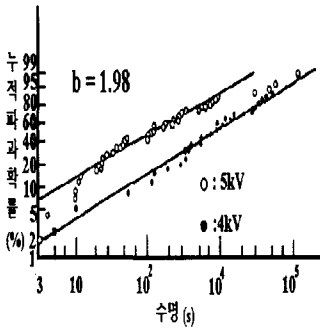
으로 된다. K 는 정수. 만약 $E_L = 0$ 의 경우에는 (13)식은 (3)식과 같 게 되며

$$n = b/a \quad (14)$$

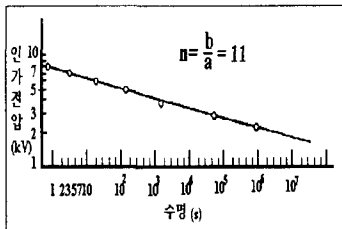
의 관계로 역n승측은 F(E, t)로 결합되어진다. 그림 4는 위에서의 상호관계가 성립되는 예를 나타낸 것이다.



(a) 파괴전압의 Weibull Plot



(b) 수명의 Weibull Plot



(c) V-t 특성

그림 4. 파괴전압의 분포(a)(F(E)), 수명의 분포(b)(F(t)) 와 V-t 특성(c)의 관계

4. 역n승측 모델에 의한 수명 추정

수명의 추정은 작은 시료에서 얻어진 실험결과로부터 실제 크기 절연체의 수명을 외삽하는 것이 실용적인 면에서 중요하다. 작은 시료의 F(E, t)가 (12)식에서 표현되어지는 경우에는 N배 크기의 시료에 대한 분포함수 $F_N(E, t)$ 는 다음 식이 유도 되어진다.

$$F_N(E, t) = 1 - \exp[-NC(E - E_L)^{1/a} t^{1/b}] \quad (15)$$

(12)식과 (14)식에서 파괴확률이 같을 때의 E, t를 각각 E_1, t_1 및 E_N, t_N 이라 하면

$$t_N = t_1 \left[\frac{E_1 - E_L}{E_N - E_L} \right]^{b/a} \frac{1}{N^b} \quad (16)$$

혹은

$$t_N = t_1 \left[\frac{E_1 - E_L}{E_N - E_L} \right]^n \frac{1}{N^b} \quad (17)$$

으로 된다. 따라서 작은 시료로부터 a, b, E_L 를 추정하고, a, b가 E, t에 의존하지 않는 것을 확인 할 수 있고, V-t 특성의 직선성과 n을 구하면 (16)식에서 N배 크기 (실크기 절연체)의 수명을 추정할 수 있다. 이와같은 방법 등으로 케이블의 수명평가 및 절연재료의 특성을 파악할 수 있으며 절연설계의 기초가 되고 있다.

5. 수명평가를 위한 규격

이와같이 수명을 추정하기 위하여 특히 내열수명의 평가를 위하여 외국의 규격이 제안되고 있는 것을 요약하였다. 내열수명은 속도론을 기초로 하여 가속열화시험이 이루어지고 있다.

Dakin의 이론을 기초로 하여 규격화되어진 내열성 시험법은

IEC pub 216, ISO DIS 257 및 UL746B로 되어져 있다. 열화 시험 온도는 수명의 대수와 절대온도의 역수와 직선 관계를 보기 위하여 적어도 3점 혹은 4점 이상으로 한다. 이때의 온도범위는 4점 정도의 열화 시험 온도를 10~20°C 간격으로 설정하며, 절연재료의 특성은 질량 변화, 기계적, 전기적 측정을 한다.

절연재료의 수명평가는 장시간과 단시간시험법이 있으며, 특성 평가항목은 기계적, 전기적인 특성과 열분석등이 있다. 수명평가법은 아직도 미확립이 되어져, 국제적인 규격도 계속적인 보완이 되고 있는 실정에 있으며, 대표적인 규격은 다음과 같다.

- (1) Canadian Standard C 22.2 No. 0.11-M 1985, "Classification of Polymeric Compounds"
- (2) IEEE Standard Pub. 1, "IEEE general principles of temperature limits in the rating of electric equipment"
- (3) IEEE Standard Pub. 57, "IEEE test procedure for evaluation of the thermal stability of enamelled wire in air"
- (4) IEEE Standard Pub. 65, "IEEE proposed test procedure for thermal evaluation of ventilated dry-type power and distribution transformer"
- (5) IEEE Standard Pub. 96, "IEEE general principles for rating electric apparatus for short-time, intermittent, or varying duty"
- (6) IEEE Standard Pub. 97, "IEEE recommended practice for specifying service conditions in electrical standards"
- (7) IEEE Standard Pub. 98,

- "IEEE guide for the preparation of test procedure for thermal evaluation of electrical insulation materials"
- (8) IEEE Standard Pub. 97, "IEEE guide for the preparation of test procedure for thermal evaluation of insulation system for electrical equipment"
- (9) IEEE Standard Pub. 101, "IEEE report on guide for statistical analysis of test data"
- (10) IEEE Standard Pub. 117, "IEEE test procedure for evaluation of system of insulating materials for radom round electric machinery"
- (11) IEEE Standard Pub. 259, "IEEE proposed test procedure for evaluation of insulation system for speciality transformers"
- (12) IEEE Standard Pub. 266, "IEEE proposed test procedure for the evaluation of insulation system for electronic power transformer"
- (13) IEEE Standard Pub. 275, "IEEE proposed test procedure for the evaluation of insulation system of insulating materials for ac electronic machinery employing form wound perinsulated stator coils machines rated at 50 to 200 horsepower (35 to 1500 kilowatts mechanical output) and below 6600 volts"
- (14) IEC Pub. 85, "Thermal evaluation and classification of electrical insulation"
- (15) IEC Pub. 172, "Test procedure for the determination of the temperature index of enamelled winding wires"
- (16) IEC Pub. 216, "Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials"
- (17) IEC Pub. 290, "Evaluation of the thermal endurance of electrical insulating varnishes by the herical coil bond test"
- (18) IEC Pub. 370, "Test procedure for thermal endurance of insulating varnishes-electric strength method"
- (19) ASTM D 229, "Methods of testing rigid sheet and plate materials used for electrical insulation"
- (20) UL 746 B, "Polymeric materials-long term evaluation"

6. 결 언

절연재료의 열화 및 수명평가를 위한 방법은 화학적인 반응식에 근거를 두고 통계적인 예측을 하고 있다. 특히 절연과괴강도 및 절연과괴시간등과 같은 특성값을 평가하고, 열화의 기준은 Weibull 분포에 있어서 형 모수와 척도의 모수, 위치의 모수등을 각각 활용한다. 수명평가는 형 모수를 활용하여, 수명계수를 예측할 수 있으나, 가속방법 및 측정항목에 의해서 크게 좌우된다.

따라서, 통계적인 평가를 위한 실험계획으로서 시험방법 및 항목의 설정은 매우 중요하다. 가속열화를 이용한 수명평가법은 국제규격에 제안되고 있으나, 계속적으로 보완이 되고 있는 실정에 있다.

참 고 문 헌

- 1) G.C. Montanari, " An Investigation on the Thermal Endurance of EPR Model Cables" IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.25, pp. 1046-1055, Dec. 1990.
- 2) 北川 賢司, " 壽命に對する信頼性的アプローチ" 日本ゴム協會誌, 第53卷 第1號 pp.15-22 1983年
- 3) S.E. Klersztyn, " Formal Theoretiacl Foundation of Electrical Aging of Dielectrics" IEEE Trans. on PAS., Vol.PAS-100,pp.4333-4340, Non. 1981
- 4) P. Metra, et al, " High Voltage Cables with Extruded Insulation. Statistical Controls and Reliability Evaluation" IEEE Trans. on PAS., Vol.PAS-94, pp.967-976, May/June 1975
- 5) K. Sugiyama, " Consideration on Breakdown Stress and Weibull Parameters of XLPE Cable" 大日本電線時報, 第62號, pp.1-8, 1977
- 6) T.Kaneko, " Thermal Aging" IEEE Trans. on EI, Vol. EI-21, pp.907-911, Dec. 1986

< 이준호 위원 > < 김정태 위원 >