공학 연구논문집 제28권 1호 pp. 317~331. 울산대학교.
Journal of Engineering Research Vol. 28, No. 1. pp. 317~331, 1997
University of Ulsan.

가속수명실험을 이용한 케이블 절연재료의 수명특성에 관한 연구

김경석 · 이태식** · 박홍태* · 남창우 · 이규철
전기공학과*LG산전 전력연구소**현대중공업 프랜트사업본부

〈요 약〉

본 연구는 고체절연재료의 수명예측의 일환으로서 가속수명실험을 통해 얻은 수명데이터의 통계학적 처리방법과 복합 스트레스와 수명과의 상호관계를 규명하기 위한 수명모델을 제시하고 있다. 가속수명실험을 통해 얻는 수명데이터는 와이블분포에 적용하고, 최소자승법과 최우추정법을 이용하여 와이블분포함수의 모수를 추정하였다. 또한 제시된 수명모델의 상수를 추정하여 복합스트레스와의 관계를 규명함으로써 수명모델의 타당성을 입증하였다.

추정결과, 주위온도와 인가전압이 상승함에 따라 수명은 현저히 짧아지고, 수명모델의 상수는 복합스트레스에 크게 의존하는 것으로 나타난다. 따라서 본 연구에서 제시된 수명모델은 고체절연재료의 수명을 나타내는데 적당한 것으로 나타났다.

A Study on the Life Characteristics of the Cable-Insulated Material using the Accelerated Life Test

Kyeng-suk Kim, Tae-Sik Lee, Hong-Tae Park, Chang-Woo Nam, Kyu-Chul Lee
Department of Electrical Engineering

본 연구는 96년도 울산대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

<Abstract>

This paper suggests the statistic method for a lifetime estimation of solid insulating materials using the data obtained from accelerated aging test.

The accelerated aging test has been performed to obtain the lifetime data. The multi-stress including thermal and electrical stress has been applied to accelerate the degradation of insulating materials. The Weibull Cumulative Distribution Function has been used to treat statistically the lifetime data.

Using the lifetime model of this study, we estimated the lifetime constants to show the relationship between the lifetime and the applied multi-stress. It has been shown that the lifetime model agrees well with the lifetime of solid insulating materials.

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발달로 인한 전기기기의 대용량화, 전력설비의 초고압화, 운전책무의 다양화 등의 사용조건을 만족시키기 위해 고체절연재료의 고신뢰성이 요구되고 있다. 과거에는 주로 고체절연재료의 전기적 특성, 구조, 분자의 운동에 관한 연구들이 주로 행해졌으나,[8,9,15,18,19] 현재는 전기설비의 이용측면에서 무보수, 무점검이 요구됨에 따라 전력시스템의 우수한 신뢰성 문제가 크게 대두되고 있으며, 이로 인해 각종 열화요인에 대한 수명과 관련된 연구가 확대되고 있다.[12~17] 일반적으로 고체절연재료는 제작과정에서 수분발생, 이물질의 침투 및 보이드(Void)의 생성과 같은 결함이 발생하게 되고, 장시간 사용함에 따라 전기적, 열적, 기계적 그리고 환경적인 영향을 받아 부분방전, 트리발생 및 산화현상 등이 나타난다. 이런 열화요인에 의해 고체절연재료는 점차 열화되어 수명이 단축되고 결국 절연사고가 발생하게 된다.[5,8] 절연사고를 방지하기 위해서는 고체절연재료의 열화를 나타내는 인자와 수명과의 상호관계를 규명하고, 이것을 기초로 고체절연재료의 수명예측방법을 통계학적으로 체계화하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 고체절연재료의 수명은 인가 스트레스에 따른 고장시간의 변화특성을 고찰함으로써 예측할 수 있다.[1,2,5,6,7,10,11]

현재까지 고체절연재료의 수명과 관련된 연구로 L. Simoni는 기초적인 수명모델을 사용하여 고체절연재료의 수명을 진단하기 위한 방법을 제시하였고,[3,4,13,14] G. C. Montanari는 L.Simoni의 연구를 기초로 하여 복합스트레스하에서 고체절연재료의 수명예측에 관한 실험과 통계적인 수명모델을 제시함으로써[14,16,17] 고체절연재료의 수명예측에 관한 연구에 상당한 진척을 보이고 있다. 그러나 현재 국내에서의 고체절연열화에 따른 수명에 관한 연구는 몇몇 연구기관 및 학계에서 행하고 있지만 아직 기초적인 단계에 머무르고 있는 실정이다.[20]

본 연구에서는 고체절연재료의 열화특성과 수명과의 상관관계를 규명하기 위해 가속수명실험법(accelated life test method)을 이용하여 복합 스트레스하에서 가교폴리에틸렌(crosslinked polyethylene : XLPE)의 수명특성을 실험적으로 고찰하고, 실험을 통

해 얻은 수명데이타를 와이블 분포(Weibull distribution)에 적용시켜 통계학적인 추정방법에 의해 와이블 분포의 모수와 그 신뢰구간을 추정하였다. 와이블 분포의 특성수명을 제시된 수명모델에 적용시켜 수명모델의 상수를 추정하고 수명모델과 복합스트레스와의 상관관계를 고찰함으로써 수명모델의 타당성을 입증하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 고체절연재료의 수명을 측정할 때, 실험시간내에 시료가 모두 고장나지 않으면 자료의 수가 적어지고, 실험시간을 연장하면 실험비용이 증가하게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 도중에 실험을 중단하는 중도중단실험(censoring test)방법과 실험조건을 정상조건보다 악조건하에서 행하는 가속수명 실험방법을 수명실험에 주로 이용하고 있다. 그 중 일정스트레스법은 인가 스트레스를 일정하게 유지시켜 절연재료의 고장시간을 측정하는 방법으로 실험시간이 많이 소요된다는 단점을 가지고 있지만 다른 방법에 비해 가속변수와 수명과의 관계에 대한 모델이 잘 개발되어 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 본 논문에서는 일정스트레스법을 이용하여 수명데이타를 얻었다.

고체절연재료의 수명실험을 통해 얻어진 수명데이타는 동일조건하에서도 서로 많은 변화를 나타내고 있으며, 이것은 고체절연재료의 수명실험에 있어 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 일반적으로 고체절연재료의 수명실험에서 얻은 수명데이타는 유용성 및 다양성의 측면을 고려할 때 와이블분포를 가장 많이 사용하고 있다.[1,3,4,6,10,11,16]

와이블분포의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function ; CDF)는 식 (2-1)과 같은 형태의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \qquad (2\text{-}1)$$

여기서, α는 척도모수(scale parameter)로서 누적고장확률이 63.2%일때의 특성수명을 의미하며, β는 형상모수(shape parameter)로서 수명데이타의 분산을 의미한다.

수명실험을 통한 데이타의 분석방법은 와이블 확률지를 이용하는 그래프적인 방법과 통계학적인 추정방법인 최소자승법(Least Squres Estimation method)과 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation method)등이 있다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 것은 통계학적인 추정방법들이다.[5,7,12,16,17]

열적 및 전기적 스트레스하에서 고체절연재료는 시간에 따라 화학적 특성과 물리적 특성이 변하게 되며, 결과적으로 열화현상이 나타나게 된다. 이러한 절연재료의 열화는 열화요인에 따라 열적열화와 전기적열화로 구분할 수 있으며 각각 열적 수명모델과 전기적 수명모델로써 나타낼 수 있다. 그러나 실제 절연재료의 열화현상은 각각 따로 존재하는 것이 아니라 이러한 열화들이 복합적으로 존재하게 된다. 따라서 고체절연재료의 수명은 복합 수명모델로서 나타낼 수 있다.

복합스트레스하에서 수명모델은 아이링 모델(Erying model)을 기초로하여 다음과

같이 열적 수명과 전기적 수명의 합으로 나타낼 수 있다.

$$L = L_0 \exp(-B\Delta T)\left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n(T)} \tag{2-2}$$

여기서 $n(T)$ 은 복합스트레스의 내력계수이다.

식 (2-2)에서 상수 B, n은 복합스트레스의 수명모델에 있어 중요한 상수이며 스트레스에 따라 큰 영향을 받는다.

3. 실험장치와 방법

본 연구에 사용된 시편은 현미경시험용 절단기(microtome)를 사용하여 전력 케이블의 절연체 부분의 XLPE(Cross-Linked Polyethylene;대한전선)를 두께 100[μm], 크기는 40×40[㎟]로 절단하여 사용하였다. 이 시료의 두께에 대한 오차는 ±5%이다. 먼저 생산과정에서 발생하는 잔존 부산물과 경화과정중의 가교 부산물을 제거하기 위해서 시료를 상온에서 200[torr]의 압력하에서 48시간동안 진공처리하였다.

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 고전압 발생장치로는 시험용 변압기(220V / 교류100kV, 직류50kV : 동명전기사)를 사용하였다. 실험온도를 올리기 위해 발열판을 사용하고 온도센서에 의해 온도조절을 하였다. 이때 온도센서는 100℃까지 측정이 가능한 열전대를 사용하였다. 장시간 동안의 실험중 발생하는 온도변화를 방지하기 위해 장치를 외부로부터 차폐하였다. 본 실험장치에서의 전극시스템은 직경이 20[mm]이고, 전극 edge부분은 전계집중을 방지하기 위해 반경 3[mm]인 곡률로 제작한 평대 평판전극을 사용하였으며 전극의 재질은 스테인레스 스틸(SUS 306)이다. 본 실험장치에서의 전극시스템은 진성절연파괴를 측정하기 위한 특정한 목적이 아니라 열화과정중의 열화조건 또는 주위환경으로부터 발생하는 변화를 확인하기 위해서 설계되었다. 절연파괴실험은 시료표면에서 발생하는 연면방전을 방지하기 위하여 열전도도와 절연특성이 우수한 실리콘 오일(KF96)내에서 행하였다. 시료에 대한 일정한 힘을 인가하기 위해서 전극의 상부에 스프링을 설치하여 항상 일정한 힘이 가해질 수 있도록 하였으며, 파괴실험시 전극의 손상을 방지하기 위해 직렬저항을 연결하여 파괴전류를 1[mA]이내로 제한하였다.

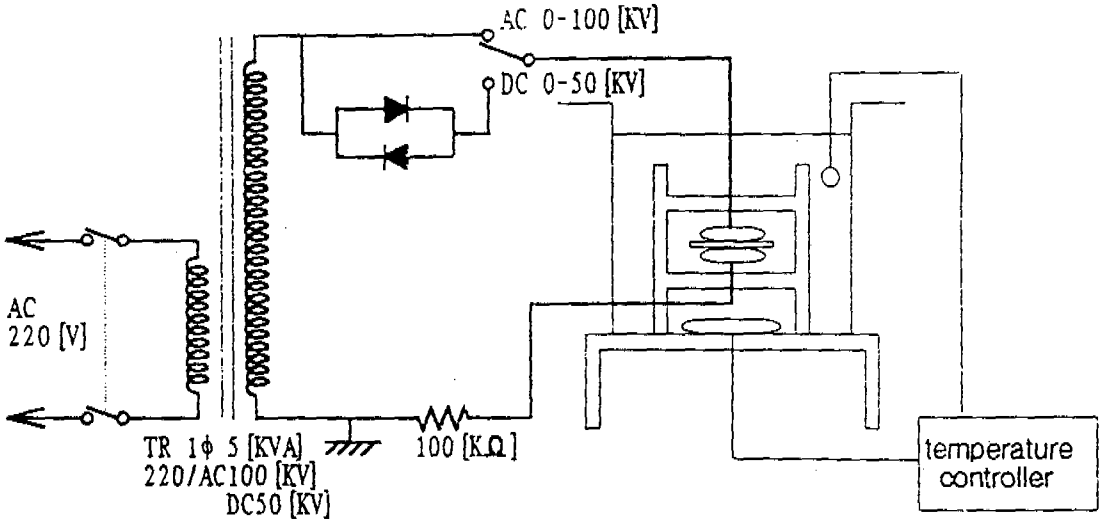

그림 1. 실험장치의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

복합스트레스의 온도를 결정하기 위해 DSC(differential scanning calorimetry) spectra를 사용해서 본 연구에서 사용된 시편의 융점을 측정하고, 이 결과를 이용하여 복합스트레스의 온도를 설정하였다. 이 설정된 각 온도에서 연속단계승압법(500V/sec)을 사용하여 교류절연파괴전압을 결정하였다. 각 조건에서 사용된 시편의 수는 9개이다. 교류절연파괴실험 결과를 통계학적으로 처리한 후 온도 23℃, 누적고장확률이 63.2%인 절연파괴전압의 50~90%범위내에서 전기적 스트레스를 선정하여 일정스트레스법에 의해 각 조건에서 20개의 시편이 고장나는 시간을 측정하고 측정된 고장시간은 Weibull 분포로 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 2는 복합스트레스의 온도를 설정하기 위한 DSC spectra분석의 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 사용된 XLPE 필름의 융점(Melting Point)은 109.24℃로 나타났으며, 복합스트레스의 온도는 융점이하에서 세 개의 온도 즉, 23℃, 50℃ 및 70℃로 설정하였다.

그림 3은 복합스트레스의 전압을 설정하기 위해 각각의 열적 스트레스하에서 행해진 절연파괴실험의 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 온도에 따른 절연파괴전압은 온도가 상승함에 따라 감소함을 알 수 있다. 이 실험의 결과에 따라 온도 23℃, 누적

고장확률이 63.2%인 절연파괴전압은 13[kV]로 나타났으며, 절연파괴전압의 50%~90% 범위내에서 각각 6.5[kV], 7.5[kV], 8.5[kV], 9.5[kV]인 복합스트레스의 전압을 결정하였다.

그림 4, 5 및 6은 각각 온도를 23℃, 50℃ 및 70℃로 일정하게 하였을 때, 인가전압의 변화에 따른 XLPE film의 고장시간을 Weibull 분포로서 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 일정한 온도하에서 인가전압이 상승함에 따라 시편이 고장나는 시간은 현저하게 짧아짐을 알 수 있다. 이러한 변화를 나타내는 이유는 온도와 인가전압이 상승함에 따라 고체절연체내의 보이드발생과 보이드내에서의 부분방전 및 고전계하에서의 유전손실의 증가, 고체절연재료의 전기-기계적 특성저하에 따른 탄성률(modulus of elasticity)의 감소때문인 것으로 생각된다. 전극과 시편의 접촉면에서 코로나 방전을 관찰 할 수 없었기 때문에 시편내의 트리잉에 의한 열화요인은 배제하였다.

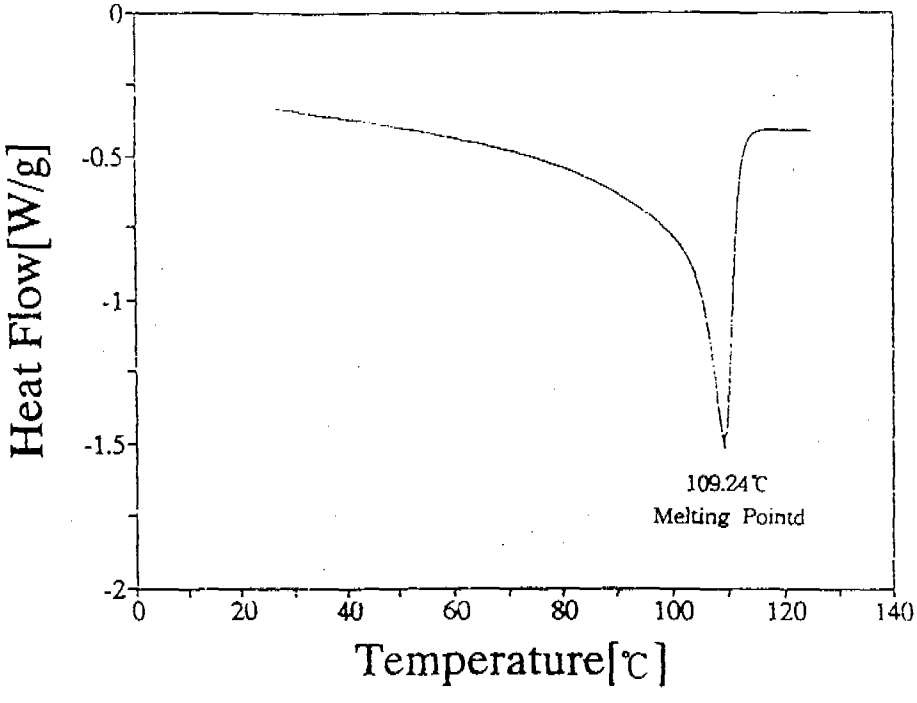

그림 2. XLPE 필름의 DSC spectra분석
Fig. 2. DSC spectra analysis of XLPE films.

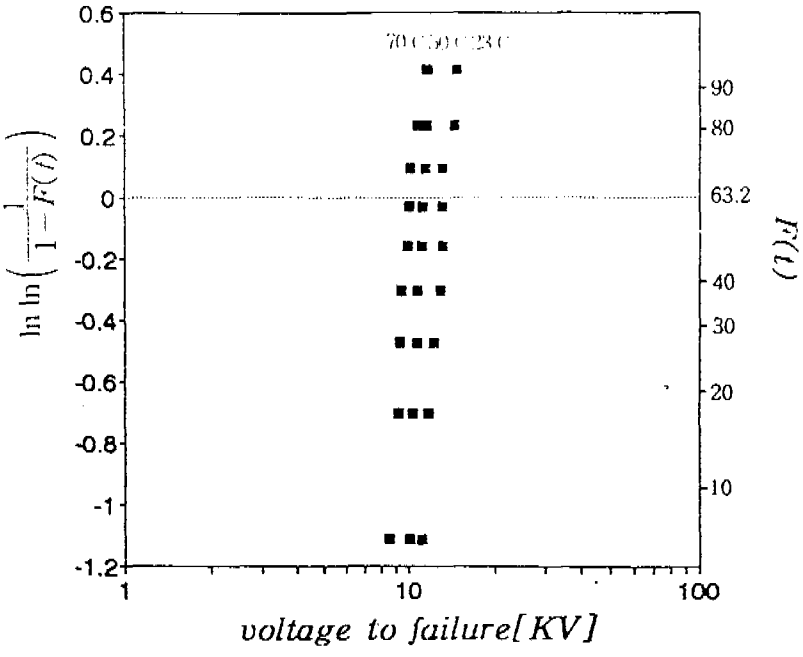

그림 3. XLPE 필름의 절연파괴 전압특성
Fig. 3. BDV characteristics of XLPE films.

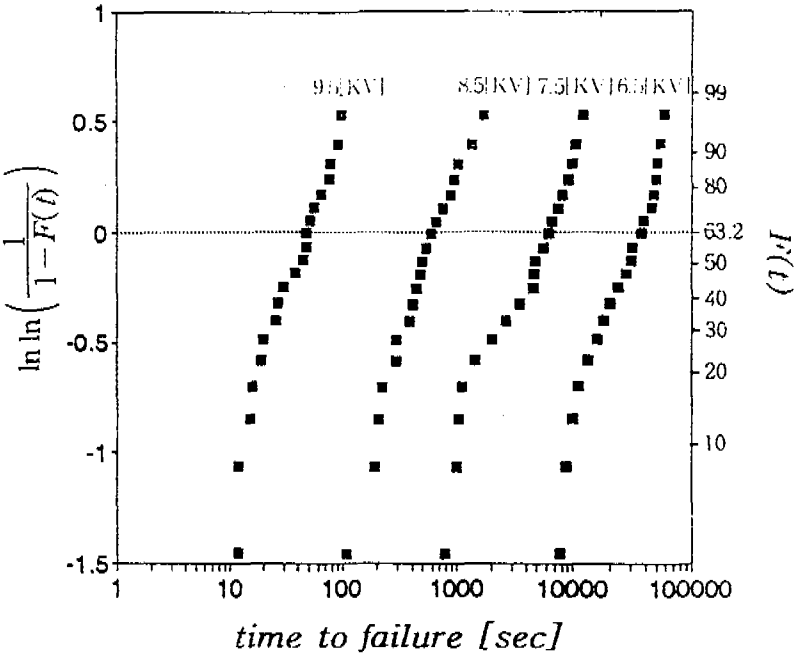

그림 4. XLPE 필름의 고장시간에 대한 와이블 분포(23℃)
Fig. 4. Weibull distribution for time to failure of XLPE films at 23℃.

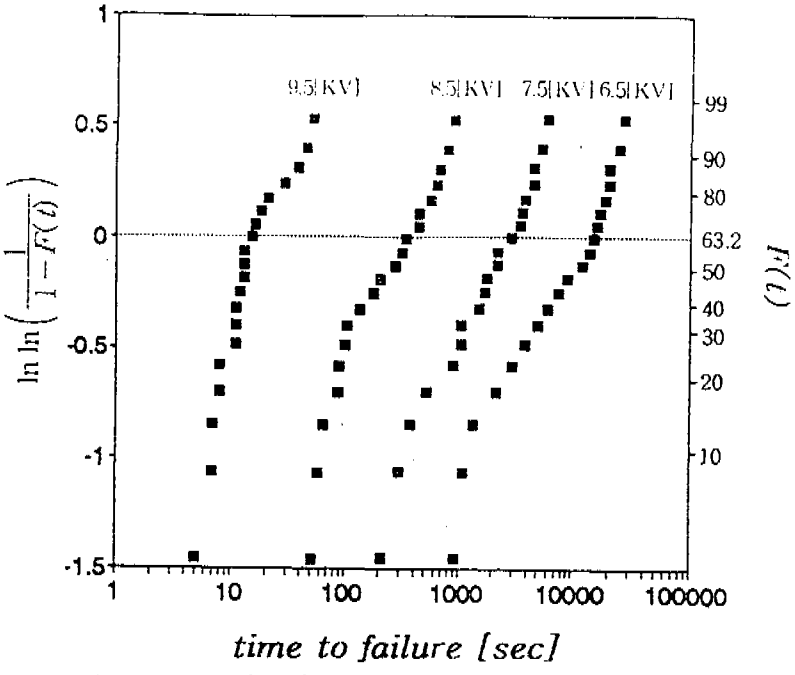

그림 5 XLPE 필름의 고장시간에 대한 와이블 분포(50℃)

Fig. 5. Weibull distribution for time to failure of XLPE films at 50℃

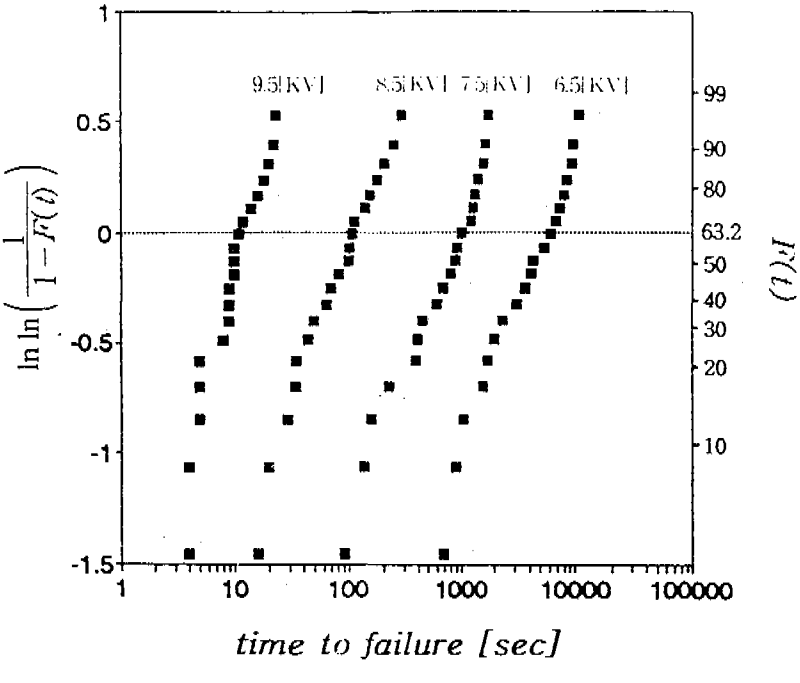

그림 6. XLPE 필름의 고장시간에 대한 와이블 분포(70℃)

Fig. 6. Weibull distribution for time to failure of XLPE films at 70℃

표1.은 최소자승법에 의해 Weibull누적포함수의 모수값들과 그 모수의 90% 신뢰구간을 추정한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 척도모수 α는 스트레스가 증가할수록 작아지는 반면에, 형상모수 β는 스트레스와는 무관한 것으로 나타났다. 척도모수 α가 감소하는 이유는 이미 앞에서 설명된 바와 같이 스트레스가 증가함에 따라 유전손실이 증가하고 전기적-기계적특성이 저하하기때문인 것으로 생각되며, 형상모수 β는 스트레스와는 무관하고 수명데이타의 분산에만 영향을 받고 있는 것으로 나타났다

표 1. 최소자승법에 의한 Weibull 모수(90% 신뢰구간)
Table 1. Weibull parameters corresponding 90% confidence interval by Least Squres Estimation

스트레스		Weibull 모수	
온도[℃]	전압[kV]	α (90% C.I.)	β (90% C.I.)
23℃	6.5	34237 (25911, 45099)	1.6331 (1.1595, 2.0250)
	7,5	5828 (4020, 8449)	1.2117 (0.8603, 1.5025)
	8.5	670 (500, 898)	1.5390 (1.0927, 1.9084)
	9.5	49 (37, 65)	1.5290 (1.1302, 1.9741)
50℃	6.5	12298 (7818, 19344)	0.9935 (0.7054, 1.2319)
	7.5	2641(1745, 3998)	1.0852 (0.7705, 1.3456)
	8.5	338 (229, 499)	1.1522 (0.8181, 1.4287)
	9.5	20 (15, 26)	1.6092 (11425, 1.9954)
70℃	6.5	5143 (3807, 7742)	1.2678 (0.9001, 1.5721)
	7.5	902 (621, 1311)	1.2037 (0.8546, 1.4926)
	8.5	114 (81, 161)	1.3133 (0.9324, 1.6285)
	9.5	13 (10, 16)	1.9503 (1.3847, 2.4184)

표 2는 최우추정법에 의해 Weibull 누적분포함수의 모수값들과 그 모수의 90%의 신뢰구간을 추정한 것이다. 표 1에서와 같이 척도모수 α는 스트레스가 증가할수록 작아지고, 형상모수 β는 스트레스에 무관한 것으로 나타났다. 이상의 두가지 추정법에서 큰차이점은 보이지 않았다.

표 2. 최우추정법에 의한 Weibull 모수(90% 신뢰구간)
Table 2. Weibull parameters corresponding 90% confidence interval by Maxinum Likelihood Estimation

스트레스		Weibull 모수	
온도[℃]	전압[kV]	α (90% C.I.)	β (90% C.I.)
23℃	6.5	32331 (23905, 43728)	1.4903 (1.0581, 1.8480)
	7,5	5504 (3861, 7846)	1.2693 (0.9012, 1.5739)
	8.5	644 (461, 899)	1.3469 (0.9563, 1.6702)
	9.5	47 (34, 65)	1.4197 (1.0080, 1.7604)
50℃	6.5	11643 (7871, 17224)	1.1492 (0.8159, 1.4250)
	7.5	2512 (1718, 3673)	1.1843 (0.8409, 1.4685)
	8.5	334 (226, 494)	1.1508 (0.8171, 1.4270)
	9.5	19 (14, 27)	1.3204 (0.9375, 1.6373)
70℃	6.5	5143 (3631, 7285)	1.2925 (0.9177, 1.6027)
	7.5	902 (639, 1272)	1.3083 (0.9289, 1.6223)
	8.5	110 (77, 158)	1.2500 (0.8875, 1.5500)
	9.5	12 (8, 18)	1.1574 (0.8218, 1.4352)

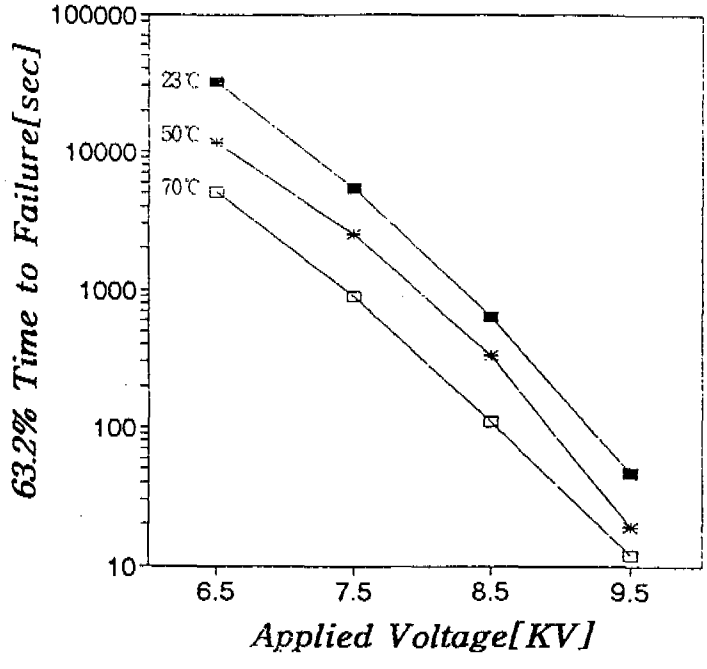

그림 7. 온도하에서 XLPE 필름의 수명곡선
Fig. 7. Lifetime curve of XLPE films at various temperature.

그림 7은 각 온도조건하에서 AC 전압에 대한 XLPE film의 수명곡선을 나타내고 있다. 이때 63.2%의 고장시간은 추정된 Weibull 분포함수의 특성수명이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 전기적스트레스가 증가함에 따라 63.2%의 고장시간은 감소하는 것을 보이고 있으며 각각의 온도조건하에서 수명곡선의 기울기는 수명상수 n을 나타낸다. 수명상수 n은 전압에 대한 수명의 변화량을 고찰함으로써 알 수 있으며, 전기적 열화에 대해서는 제시된 역승법칙이 전기적 수명모델로써 타당한 것으로 나타났다.

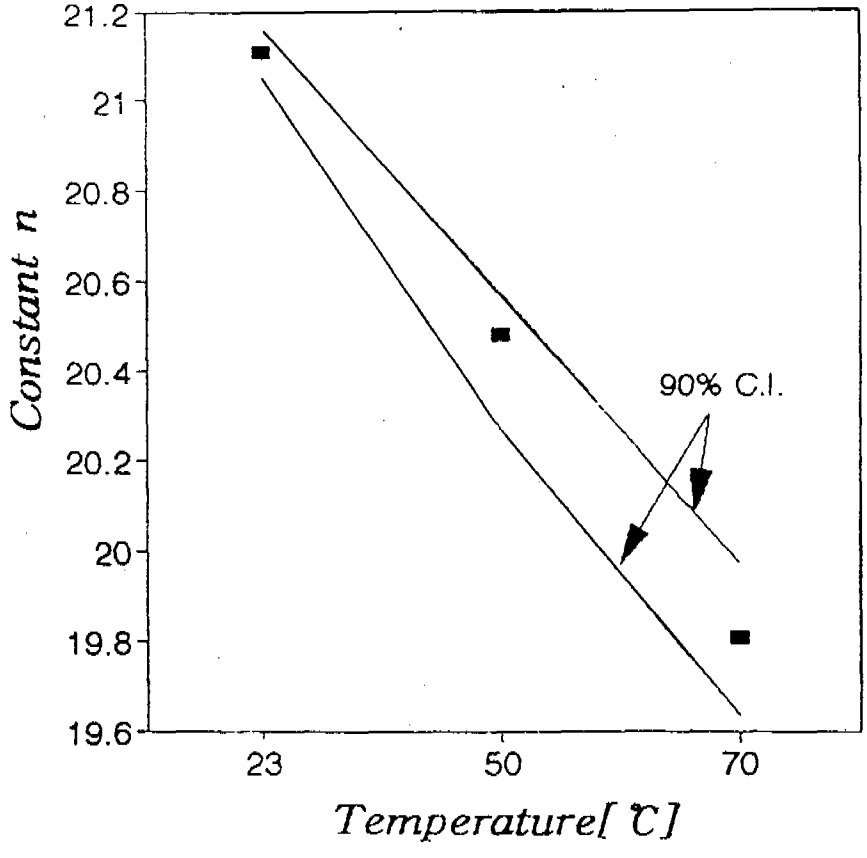

그림 8. 수명모델에서 상수 n의 온도 의존성

Fig. 8. Temperature dependency of constant n in Life model.

그림 8은 온도변화에 따른 수명상수 n의 변화와 상수 n의 90% 신뢰구간을 나타내고 있으며, 이 그림에서 알수 있듯이 수명상수 n은 온도에 큰 영향을 보이고 있으며 온도가 상승함에 따라 감소하고 있다. 이는 저온에서보다 고온에서 전압에 따른 수명의 변화가 더 작아짐을 알 수 있다.

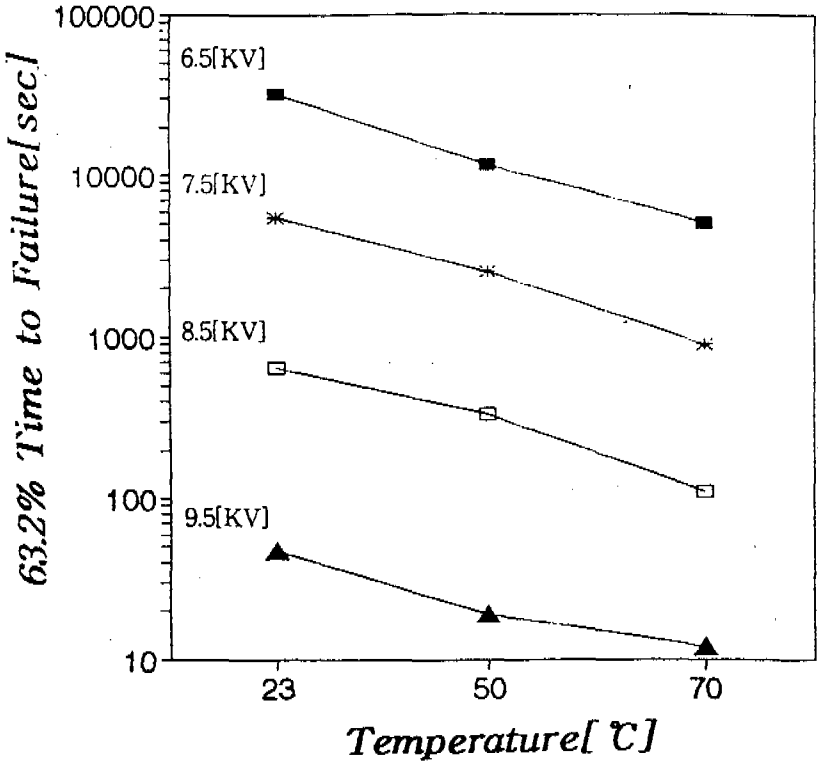

그림 9. 전압하에서 XLPE 필름의 수명곡선
Fig. 9. Lifetime curve of XLPE films at various voltage.

그림 9는 각 인가전압하에서 온도에 변화에 따른 XLPE film의 수명곡선을 나타내고 있다. 이때 63.2%고장시간은 그림 10에서와 같이 Weibull 누적분포함수의 특성수명으로 나타내었으며 시편의 수명은 온도와 인가전압이 상승함에 따라 감소하였다. 따라서 온도에 대해서는 Arrhenius 모델이 열적 수명모델로서 타당한 것으로 나타났다. 각 조건에서의 수명곡선은 수명상수 B의 값을 나타내고 있으며 온도에 대한 수명의 변화량을 의미한다.

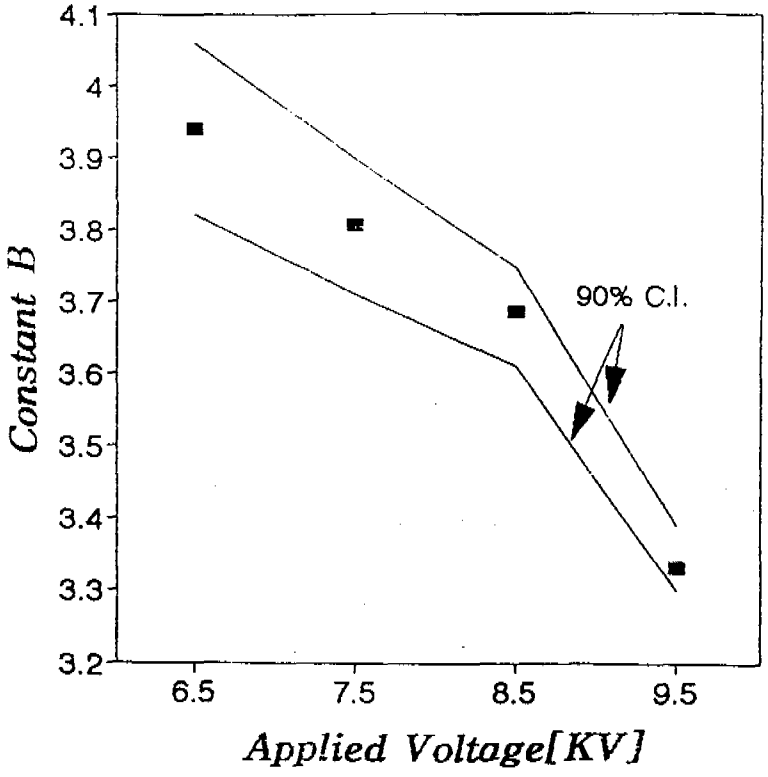

그림 10. 수명모델에서 상수 B의 전압 의존성

Fig. 10. Voltage dependency of constant B in Life model.

그림 10은 전압변화에 따른 수명상수 B의 변화와 그 90% 신뢰구간을 나타내고 있다. 그림에서 알수 있듯이 수명상수 B는 전압에 상승함에 따라 감소하고 있으며, 이는 인가전압이 높을수록 온도에 따른 수명의 변화가 더 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 인가전압이 절연파괴전압에 근접할수록 온도에 의한 영향은 적을 것으로 예측된다.

5. 결 론

이상의 결과를 분석·검토하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 수명실험을 통해 얻어진 수명데이터는 Weibull 분포로서 잘 표현할 수 있고 통계학적인 방법에 의해 Weibull 누적분포함수의 모수추정이 가능하였다. 추정결과 척도모수 α는 추정방법에 상관없이 스트레스가 증가할수록 감소하였고, 형상모수 β는 추정방법에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 스트레스와는 무관하고 데이터의 분산에만 의존하는 것으로 나타났다.
2. 제시된 수명모델은 고체절연재료의 수명을 나타내는데 적당하였으며, 수명은 스트

레스의 상승에 따라 현저히 작아지는 것으로 나타났다.

3. 수명모델의 수명상수 B는 전압에 큰 영향을 받고 있으며 전압이 높을수록 온도변화에 따른 수명의 변화는 작게 나타났고, 수명상수 n은 온도에 큰 영향을 받고 있으며 온도가 높을수록 전압변화에 따른 수명의 변화가 작게 나타났다.

따라서 본 연구에서 제시된 방법을 사용함으로써 향후 고체 절연재료의 수명을 예측할 수 있으리라 생각된다.

7. 참 고 문 헌

(1) D. R. Thmain, L. J. Bain, C. E. Antle, "Inferences on the Parameters of the Weibull Distribution", Technometrics, Vol 11, Aug 1969

(2) B. R. Billman, L. J. Bain, C. E. Antle, "Statistical Inferences from censored Weibull Samples", Technometrics, Vol 14, Nov 1972.

(3) L. Simoni " A new approach to the voltage-endurance test on electrical insulatio ", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.8, No.3, 1773.

(4) c L. Simoni" A new research into the voltage-endurance of solid dielectrics", IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol.10, No.1, 1975.

(5) N. R. Mann, K. W. Fertig, "Simplified Efficient Point and Interval Estimators for Weibull Parameters", Technometrics, Vol 17, Aug 1975.

(6) A. C. Cohen, "Multi-Censored Sampling in the Three-Parameter Weibull Distribution", Technometrics, Vol 17, Aug 1975

(7) M. Q. Meeker, W. Nelson, "Weibhll Percentile Estimates and Confidence Limits from Singly Censored Data by Maximum Likelihood", IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-25, April 1976.

(8) M. R. Wertheimer, L. Paquin, H. P. Schreiber, S. A. Boggs, "Dielectric Permittivity and Breakdown Characteristics of Polymer-Mica Composites" IEEE Conference Record of IEEE Symposium on Electrical Insulation, June 1976.

9) Y. Shibuja, S. Zoledziowski, J. H. Calderwood "Void Formation and Elecrical Breakdown in Epoxy Resin", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. PAS-96, No.1, January/February 1977.

(10) G. C. Stone, R. G. van Heeswijk "Parameter Estimation For The Weibull Distribution", IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol.1, EI-12 No.4, 1977.

(11) G. C. Stone, J. F. Lawless "The Application of Weibull Statistics to Insulation Aging Tests", IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol.1, EI-14 No.5, 1979.

(12) Diane I. Gibbons, Lonnie C. Vance "A Simulation of Estimatior for the 2-Parameter Weibull Cistribution", IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-30,

No.1, April 1981.

(13) L. Simoni "A General Appoach To The Endurance Of Electrical Insulation Under Temperature And Voltage" IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-16, No.4, August 1981.

(14) G. C. Montanari, G. Pattini, L. Simoni "The electric strenght measurement for aging evaluation in multiple stress test " 4th IEEE Symp. EI, Philadelphia, June 1982.

(15) R. M. Hill and A. K. Jonscher "The Dielectric Behavior of the Condensed Matter and its Many Body Interpretation ", Comtemp. Phys., 24, pp.77-110, 1983.

(16) G. C. Montanari "A probabilitic insulation life model for combined thermal -electrical stresses", IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol.20, No.3, 1985.

(17) G. C. Montanari "Electrical life threshold models for solid insulating materials subjected to electrical and multiple stresses", IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol. 20, No.3, 1985.

(18) S. S. Bamji, A. T. Bulinski and R. J. Densley "The Role of Polymer Interface During Tree Initiation In LDPE" IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No.4, August 1986.

(19) Dilip K. Das-Gupta "Polyethylene : Structure, Morphology, Molecular Motion and Dielectric Behavior", IEEE Electrical Insulation, Vol.10, No.3,1994.

(20) 이규철, 이종호 外 3명, "전기절연재료의 수명진단에 관한 수학적 모델에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), p.p 569~571, 1993.