

알루미늄 전해콘덴서의 가속수명시험에 관한 실험연구

김홍진 · 전호성 · 김성득

(주)대우전자 품질경영연구소

박영택 · 진흥기 · 박찬웅

성균관대학교 산업공학과

An Experimental Study on Accelerated Life Testing for Aluminum Electrolytic Capacitors

Heung-Jin Kim · Ho-Sung Cheon · Seong-Deuk Kim

Daewoo Electronics Co., Quality & Reliability Laboratory

Young-Taek Park · Hong-Gee Jin · Chan-Woong Park

Dept. of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract

An accelerated life testing(ALT) for aluminum electrolytic capacitors is conducted and analyzed. A testing equipment, which consists of part fixtures, relay board, controller, video bridge and microcomputer, is made for the ALT. Load factors are temperature with four levels and voltage with three levels. Base on 'optimized 4:2:1 plan', 2,000 electrolytic capacitors are allocated at 12 experimental conditions(; 4 levels of temperature \times 3 levels of voltage), and the ALT is conducted. From the experimental results, an acceleration model is derived and acceleration factors are estimated. A discussion on the experimental results is included.

1. 서론

생활수준이 향상되어 소비자들이 가격보다는 품질을 더 중요시하는 경향을 보임에 따라 기업에서도 높은 품질과 신뢰성 있는 제품을 만들기 위해 노력하고 있다. 특히, 정보화 사회가 고도화됨에 따라 더욱 복잡해지고 정밀해져 가고 있는 전자제품들에 대한 신뢰성

확보의 문제가 크게 대두되고 있다. 최근 들어 제품의 범위가 확대되고 모델이 다양화됨에 따라 기술개발로 인한 신규부품이 속출하고 있다. 좋은 부품이 공급되지 않으면 좋은 제품을 기대할 수 없으므로, 부품신뢰도의 확보는 매우 중요한 과제가 된다. 부품신뢰도의 확보방법 중 하나는 신뢰성시험을 통해 낮은 신뢰도수준의 부품을 제거하는 것이다. 그러나, 신뢰성시험에 허용되는 시간이나 시험설비의 제약과 시료수의 한계, 비용 등을 고려해 볼 때, 현실적으로 가속수명시험이 필요할 경우가 적지 않다.

고신뢰도를 갖는 제품에 사용되는 부품들에 대한 수명분포나 장기적인 성능을 평가하기에는 상당한 어려움이 뒤따른다. 특히, 전자부품의 경우에는 고장률은 아주 낮고, 운용수명은 매우 길어 그 고장률을 추정하기란 매우 어렵다. 따라서 실제사용조건 하에서 고장률이 아주 낮은 이들의 부품고장률을 추정하기 위해서 시험조건을 엄격하게 하여 비교적 짧은 기간 동안에 부품고장을 일으키게 하고, 이로부터 부품이나 재료의 신뢰성에 관련된 정보를 얻기 위해 가속수명시험을 광범위하게 사용하고 있다[Meeker와 Escobar, 1993].

본 연구에서는 D선자부품(주)에서 제조한 알루미늄전해콘덴서에 대해 실제 가속수명시험을 수행하고, 이를 통하여 가속조건과 평균수명(MTTF)과의 관계를 설명할 수 있는 가속모델을 도출하고, 고장률 산출에 이용할 수 있는 가속계수(AF: Acceleration Factor)를 도출해 보기로 한다. 그리고, 가속수명시험을 실시하는 데에 따른 현실적 문제점과 어려운 점을 검토해 보기로 한다.

일반적으로 콘덴서의 경우 신뢰성시험의 시험시간은 1,000시간(= 약 42일 연속)으로 규정되어 있으나[MIL-HDBK-217E, 1986], 신뢰성시험에 허용되는 시간이나 시험설비의 제약 때문에 이 규정을 따르기는 어려운 경우가 많다. 시험시간을 단축하고자 할 경우, 시료수를 늘려 주어 총시험시간(; 시료수×시험시간)을 확보하면 되나, 신뢰성시험의 대부분이 파괴검사이므로 시료수를 늘리는 데에도 한계가 있다. 따라서, 신뢰성시험에 허용되는 시간이나 시험설비의 제약과 시료수의 한계를 고려해 볼 때, 이 문제를 해결하기 위해서는 궁극적으로 가속수명시험을 병용하는 수밖에 없다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 가속수명시험 모델

가속시험은 정상운용조건보다 더 가혹한 운용조건에서 시험을 실시하여 정상운용시의 고장률을 추정하기 위한 것으로 이 시험의 목적은 짧은 기간의 가속조건에서 부품이나 제품의 수명특성에 관한 데이터를 모아 이 데이터로부터 정상사용조건에서의 수명특성을 적절한 통계적인 모델을 사용하여 외삽법(extrapolation)으로 추정하는 데 있다. 가속시험을 적용하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다[Peck과 Trapp, 1987]:

- (i) 가속수명과 실제사용수명의 고장 메카니즘은 동일하다.
- (ii) 열화 또는 고장형태가 규칙적이거나 동일하여야 한다.
- (iii) 가속수명시험결과 구한 수명특성의 추정치는 신뢰성이 있다.

가속시험데이터로부터 가속계수를 추정하기 위해서는 적어도 두 가지 이상의 상이한 부하수준의 수명데이터가 필요하고, 이를 사용하여 정상운용조건에서의 고장률이나 평균 수명을 계산할 수 있다. 부하와 고장까지의 시간 사이에는 많은 물리·화학적 반응이 관련되며, 이 때 온도는 이러한 이화학적 반응을 가속화시키는 요인으로 작용한다. 전압, 전류 또는 습기와 같은 환경요인도 가속요인이 되기는 하지만 온도는 모든 부품에 공통적으로 적용되는 가속요인이다[한국전기통신공사, 1989].

가속시키는 방법에는 제품의 사용률(use-rate)을 증가시키는 방법과 제품의 노화율(aging-rate)을 증가시키는 방법으로 크게 나눌 수 있으며, 가속시험모델 중 대표적인 것으로는 관측시 관심대상이 고장수인 가속수명시험(accelerated life tests)과 열화정도인 가속열화시험(accelerated degradation tests)이 있다[Meeker와 Escobar, 1993].

가속시험의 부하는 사용조건보다 높은 상태에서 일정하게 유지시켜 시험하는 일정부하 시험(constant stress tests)과 부하를 시간에 따라 단계적으로 증가시키는 단계부하시험(step-stress tests)[Miller와 Nelson, 1983; Nelson, 1980], 연속적으로 증가시키는 증가부하시험(progressive-stress tests), 일정한 주기로 반복적으로 실시하는 순환부하시험(cycling-stress tests), 특정한 규칙성이 없는 임의부하시험(random-stress tests)이 있다[Nelson, 1990]. 특히 가속수명시험의 방법에는 동작의 반복회수를 증가시키거나 연속 동작을 시키는 시간가속(; 협의의 가속수명시험), 환경이나 부하를 엄격히 하여 제품을 단 시간에 강제적으로 고장시키는 부하가속, 특성모수의 수명종지점을 실제의 열화기준보다 엄격히 함으로써 수명을 단축시키는 판정가속방법이 있다[한국기계연구소, 1988].

가속시험결과 수집된 데이터의 종류에는 모든 시료가 고장날 때까지 시험하여 얻은 완전데이터(complete data), 여러 가지 이유로 인하여 모든 시료가 고장날 때까지 시험할 수 없을 경우의 불완전데이터(incomplete data 또는 censored data)로 나눌 수 있으며, 불완전데이터는 결측시간(censoring time)이 고정되고 고장수가 임의개인 정시종결형 단일결측데이터(singly censored data 또는 type I censoring)와 결측시간은 임의이고 고장수가 고정된 정수종결형 다중결측데이터(multiply censored data 또는 type II censoring)로 나뉘어 진다[Hahn과 Nelson, 1974; Nelson과 Kielpinski, 1976].

고장데이터를 분석하는 방법으로는 그래프를 이용한 도시적 방법(Graphical Method)과 최우추정법(MLE)과 같은 분석적 방법이 있으며, 일반적으로 많이 사용되는 고장모델로서는 물리적 모델과 통계적 모델이 있다[Peck과 Trapp, 1987]. 가속수명시험은 시험결과 얻은 데이터의 종류와 데이터의 분석방법 및 통계적 또는 물리적 적용모델에 따라 여러 가지로 분류해 볼 수 있다.

(1) 물리적 모델

물리적 모델은 부하와 부품의 물리적 반응특성 사이의 관계를 수학적으로 표현한 것으로 Arrhenius 모델, Eyring 모델, Inverse Power 모델, 10℃법칙 등이 있으며, 이들의 대표적인 성질을 나타낸 것이 <표 1>이다[한국과학기술원, 1989; Tobias와 Trindade, 1986].

〈 표 1 〉 가속수명시험의 대표적인 물리적 모델

모델명	형태	특성
Arrhenius 모델	$MTTF = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T+273}\right)$ 여기서, A : 상수 $B = \Delta H/k$ ΔH : 활성화에너지 k : Boltzman 상수 $(8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K})$ $T + 273$: 섭씨온도 T를 Kelvin 절대온도로 고친값	가속인자가 온도일 경우 자주 사용 $AF = \frac{MTTF_1}{MTTF_2} = \frac{A \cdot \exp\left(\frac{B}{T_1+273}\right)}{A \cdot \exp\left(\frac{B}{T_2+273}\right)}$ (두가지 온도조건 T_1, T_2)
Eyring 모델	$MTTF = A \cdot K^n \cdot \exp\left(\frac{B}{K}\right) \cdot \exp\left[\left(C + \frac{D}{K}\right) \cdot S_1\right]$ 여기서, A, C, D : 상수 $B = \Delta H/k$ k : Boltzman 상수 $K = T + 273$ S ₁ : 온도 이외의 다른 가속조건 함수	온도 이외의 가속인자가 포함될 경우에 사용
Inverse Power 모델	정상전압에서의 수명 가속전압에서의 수명 $= \left[\frac{\text{가속전압}}{\text{정상전압}} \right]^N$ (N 수명승수)	가속인자가 전압일 경우에 자주 사용 $AF = \left[\frac{\text{가속전압}}{\text{정상전압}} \right]^N$
10°C법칙	$MTTF = \frac{MTTF_0}{2^\alpha}$ (α : 10°C 단위의 온도차)	전자부품에 자주 사용 $AF = \frac{MTTF_0 (\text{정상온도의 수명})}{MTTF_1 (\text{가속온도의 수명})}$

Arrhenius 모델은 전자관의 음극온도, 반도체의 접합온도, 저항과 콘덴서의 표면온도 등 많은 부품과 재료에 적용된다. 〈표 1〉의 평균수명식의 양변에 자연대수를 취하면 평균수명의 자연대수값과 Kelvin 절대온도의 역수값은 선형관계가 된다. 그러므로 Arrhenius 모델이 성립하는 경우 세로축을 시간의 자연대수값으로 하고 가로축을 절대온도의 역수값으로하여 온도조건에 대한 평균수명을 타점하면 직선의 형태가 나오는데, 이를 Arrhenius plot이라 한다[Tobias와 Trindade, 1986].

Eyring 모델은 가속조건으로 온도만을 고려한 Arrhenius 모델을 일반화하여 온도 이외의 다른 가속조건(전압, 습도, 충격, 진동 등)을 포함한 모델이며, Inverse Power 모델은 전압가속시험에 사용되는 모델로서 정상전압에서의 수명을 측정하고자 하는 경우에

는 먼저 상이한 두 가속전압에서 구한 데이터를 이용하여 수명승수 N 을 구하고 이 값을 <표 1>에 있는 식에 대입하면 된다[한국전기통신공사, 1987]. 위와 같은 모델 이외에도 지금까지 알려진 것으로 10℃법칙, 승법칙 등이 있으며, <표 2>에 요약되어 있다[關西電子工業振興センター, 1990].

< 표 2 > 가속시험 일람표

모델명	형 태	대응부품, 재료, 현상
n 승 k 도 법칙	$L_2 = L_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \cdot 2^{\frac{T_1 - T_2}{k}}$	종이플라스틱 필름콘덴서 $n=4\sim6, k=10$ 자기콘덴서 $n=3, k=10$ 유리콘덴서 $n=2.5, k=20$ 박형탄탈콘덴서 $n=5, k=10$ 고체탄탈콘덴서 $n=4\sim5, k=10$ 마이카콘덴서 -, $k=50$
Miner의 선형손상법칙	$\sum_{i=1}^n N_i \cdot S_i = 1$	금속재료의 피로파괴
Coffin-Manson의 관계	$\Delta \gamma T N_f^a = \text{일정}$	금속재료의 피로파괴
1/2승법칙	\sqrt{t} 의존성	흡은, 확산현상
Electromigration	$\text{MTTF} = \frac{wt}{J^n} \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right)$ $\text{MTTF} = ad^n \text{ (} a \text{는 결정입피)}$	Al의 electromigration

(2) 통계적 모델

통계적 모델은 수명분포의 특성을 나타내는 것으로 가속시험에 많이 이용되는 분포는 정규분포, 대수정규분포, 지수분포, 와이블분포이다. 와이블분포는 형상모수(shape parameter)값에 의해 다양한 고장물형태를 표현할 수 있어 제품 및 부품의 수명분포로 널리 사용되고 있다.

단일부품에 대한 고장확률밀도함수는 정규분포로 표현되는 경우가 많은데, 이 경우 고장률은 시간이 지남에 따라 단조증가하는 전형적인 마모고장형태를 나타낸다. 대수정규분포는 정규분포와 마찬가지로 단일부품의 고장확률밀도함수를 잘 반영하지만, 특히 물리·화학적인 상호작용과 관련이 있는 반도체의 수명시험에 잘 적용되고 있으며, 시료의 크기가 충분히 크고 시험시간이 분포를 정의할 수 있을 정도로 충분히 긴 경우에 유용한 분포이다. 지수분포는 여러개의 부품이 조합되어 만들어진 제품이나 시스템의 고장확률밀도함수를 잘 반영한다. 지수분포는 두 가지 중요한 고장특성이 있는데, 개개의 고장은 우발 또는 예측할 수 없는 형태로 일어난다는 것과 고장률 또는 순간고장률은 상수이기 때문에 성능의 저하가 고장의 원인은 아니라는 것이다. 와이블분포는 지수분포를 더 융통성있게 만들기 위한 수학적 확장에서 생겨났다. 이 분포는 원래 재료의 약화로부터 측정되는 수명분포를 해석하기 위해서 제안된 분포함수지만, 재료의 약화현상 이외에도 많은 공학적인 문

제에 적용할 수 있다[Hahn과 Meeker, 1982].

2.2 가속수명시험의 설계

가속수명시험의 설계내용 중 하나는 얼마나 많은 시료를 각 시험조건에 할당해야 하는가를 결정하는 것으로서 지금까지는 데이터가 완전한 경우와 단일결측데이터가 있는 경우에 대해 많은 연구가 행해졌다[Nelson, 1990]. 여기에는 각 시험조건에서의 시료수를 동일하게 한 전통적 계획과 각 시험조건에서의 시료수를 달리하는 최적시험계획 및 절충 계획이 있다. 이 중 최적시험계획은 설계조건(design stress; 실제사용조건)에서 가장 정확한 수명추정을 할 수 있고, 전통적 계획은 최적시험계획과 절충계획에 비해 정확성은 떨어지지만 많이 사용되어 왔다. 절충계획(compromise plans) 중에서 특히 Meeker와 Hahn(1985)이 제시한 배치계획은 최적계획보다 안정적(robust)이고 전통적 계획보다 더 효과적인 것으로 알려져 있다[Nelson, 1990].

Nelson(1972)은 완전데이터와 Arrhenius 모델에 대하여 전통적 계획과 최적시험계획을 비교하기 위한 몇 가지 방법을 제시하였다. 가속수명시험의 결과는 결국 외삽법(extrapolation)을 이용하여 정상사용조건에서의 결과들로 환원시키는데, 외삽법에는 부하에서의 외삽법과 시간에서의 외삽법이 있다. 부하의 외삽은 높은 신뢰도때문에 설계조건에서 고장이 발생하지 않거나 거의 발생하지 않을 경우에 필요하지만, 외삽의 위험률을 최소화하기 위해서는 가능한 한 설계조건에 가까운 곳에서 시험이 수행되어야 한다. 설계조건에서 멀어질수록 정상사용조건에서의 고장모드와 가속부하조건에서의 고장모드가 달라지는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 시간외삽의 경우도 마찬가지로 설계조건에서 가까운 곳에서 시험하는 경우에 필요한 방법이다. 이 방법은 고장확률이 p 인 경우 $100p$ 분위수(percentile) 고장시간을 추정하는 데에 사용된다. 따라서 이 경우에는 와이블분포나 대수정규분포와 같은 특정분포의 가정이 필요하다[Hahn, 1985].

각 부하조건에서의 기대고장수가 같을 경우에 만족할만한 외삽이 이루어지므로 저부하 조건에 더 많은 시료가 할당되어야 한다. 만일 부하조건이 세가지인 경우에 신뢰성이 있는 고장수를 갖게 하려면 최적계획에 의해 극단적인 비율이 나오기도 하는데, 몇몇 다른 비율의 가능성을 조사하여 관심의 대상이 되는 분위수(예를 들어 10 percentile)에서 추정치의 분산이 최소가 되는 비율은 4:2:1이다[Meeker와 Hahn, 1985]. 본 연구의 실험계획에서는 Meeker와 Hahn(1985)이 제시한 '최적 4:2:1 배치계획(Optimized 4:2:1 Allocation Plan)'을 사용하였다.

2.3 선행연구고찰

완전데이터와 도시적 방법을 사용한 연구는 전기장치의 절연체를 시험대상으로 Arrhenius 모델과 대수정규분포를 이용한 Nelson(1971), Inverse Power 모델과 와이블분포를 이용한 Nelson(1972), 난방장치의 온도가속에 Arrhenius 모델과 대수정규분포를 이용한 Nelson(1972)의 연구가 있으며, 분석적 방법을 사용한 것으로는 절연체에 대해 Inverse Power 모델과 와이블분포를 이용한 Nelson(1972)의 연구가 있다.

단일결측데이터의 경우 모두 절연체를 대상으로 하여 분석적 방법을 사용한 것으로 Arrhenius 모델과 정규분포 및 대수정규분포를 이용한 Nelson과 Kielpinski(1976),

Inverse Power 모델을 사용한 Nelson과 Meeker(1978)의 연구가 있으며, Hahn과 Nelson(1974)은 Arrhenius 모델과 대수정규분포를 이용하여 도시적 방법과 분석적 방법을 모두 비교하였다. 다중결측데이터의 경우에는 발전기의 계자권선(field winding)에 도시적 방법으로서 고장률타점(hazard plot)의 이론과 적용을 제시한 Nelson(1972)의 연구가 있다. 한편, Proschan과 Singpurwalla(1980)는 절연체를 대상으로 가속수명시험에 대한 기존의 모델을 사용하지 않고 베이지안 접근을 이용한 새로운 방법을 제시하였고, Nelson(1972)은 Arrhenius 모델의 가정과 데이터의 타당성을 입증하기 위해 서로 다른 절연체에 대하여 도시적 방법과 분석적 방법 모두를 사용하였다.

그리고, 알루미늄전해콘덴서에 대한 가속수명시험으로 鹽見와 原田(1979)는 정전용량과 손실각정점을 특성치로 하여 몇개의 온도와 전압에 대하여 열화량의 변화에 따른 경시적분포, 모멘트, 변동계수를 분석하였으며, 原田과 鹽見(1976)는 3개업체에서 선정된 부품에 대해 몇 가지 온도와 전압을 부하로 선택하고, 12,000 시간동안 용량변화율과 손실각정점에 대하여 고장판단기준을 각각 -30%, 300%로 하여 시험을 실시한 후 가속계수를 산출하였으며, 10℃법칙의 성립과 전압보다는 온도가 시간의 경과에 따라 특성치에 더 많은 영향을 준다는 것을 관찰하였다.

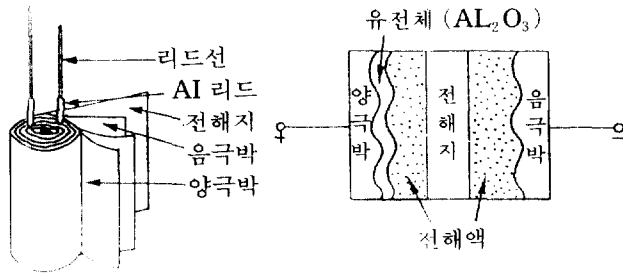
국내의 연구로는 박명규와 허강현(1991)이 적층세라믹콘덴서의 온도 및 전압부하에 대한 가속수명시험을 와이블분포와 Arrhenius 및 Inverse Power 모델을 적용하여 분석한 바 있으며, 권수호와 고영준(1991)은 몇몇 국내업체의 저항기(resistor)를 선정하여 각 업체별로 와이블분포와 Inverse Power 모델 및 Eyring 모델을 적용하여 온도와 전력부하에 대하여 분석하였다. 삼성전기 종합연구소(1992)에서는 외국 4개업체의 반도체형 세라믹콘덴서에 대해 온도와 전압을 부하로 사용하여 고온동작 및 고온고습동작시험시 고장모드와 동작수명특성을 비교하였다. 또한 한국기계연구소(1987)에서는 국내 4개업체에서 선정된 알루미늄전해콘덴서의 고장률 수준 측정과 고장형태를 분석하기 위한 신뢰성시험을 실시한 바 있다.

3. 가속수명시험 계획 및 방법

3.1 알루미늄전해콘덴서의 개요

알루미늄전해콘덴서(; 알루미늄 박형 건식 전해콘덴서)는 고순도 알루미늄을 양극으로 하고, 그 표면을 산화시켜 산화피막을 유전체로 하여 액체 또는 고체의 전해질을 산화피막에 밀접하게 형성시킨 것을 음극으로 하는 유극성 콘덴서이다. <그림 1>은 알루미늄전해콘덴서의 구조를 나타낸다. 알루미늄전해콘덴서의 특징으로는 전극으로 사용하는 알루미늄판을 조면화(凹, 凸)하여 실효면적을 확대시킬 수 있고, 유전체의 두께가 두껍기 때문에 가격이 저렴한 소형 대용량 콘덴서라 할 수 있다.

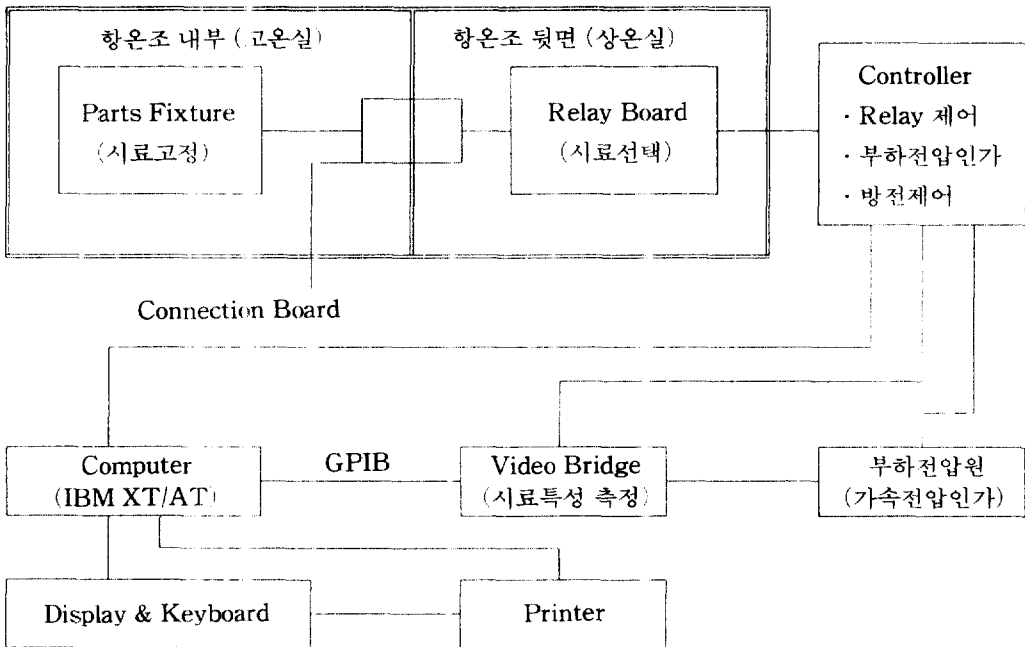
본 연구에서는 알루미늄전해콘덴서 중에서 국내 D전자(주)에서 많이 사용하고 있는 공칭정전용량 1 μ F, 정격전압 50V, 사용온도범위 -40℃ ~ 85℃인 규격을 시험대상으로 하였다.



〈 그림 1 〉 알루미늄 전해콘덴서의 구조

3.2 가속수명시험장치

정상조건 이상의 가혹한 조건을 부여하는 가속수명시험은 통상적인 정격시험장치로는 곤란하다. 가속시험 중인 다량의 시료들에 대해 정해진 시점마다 특성치를 자동적으로 측정하고 해석하기 위하여 국내 D전자(주)에서 개발한 가속시험장치를 사용하였다. 〈그림 3.2〉는 가속시험장치의 기본구조를 나타낸 것이다.



〈 그림 2 〉 가속수명 장치의 기본구조

가속수명시험장치의 각 블럭별 기능 및 세부구조를 보면 다음과 같다.

① Parts Fixture

항온조 내부에 장착되는 Parts Fixture는 Parts Holder가 부착된 에폭시 프린트기판으로 구성되어 있다. 한 개의 기판에는 50개의 시료를 부착할 수 있으며, 각 기판에는 시료의 탈착을 용이하게 하기 위하여 Guide 및 손잡이가 부착되어 있다. 항온실 내에는 10개의 Parts Fixture가 장착되어 있는데, 1개의 Parts Fixture에는 50개의 시료를 부착할 수 있으므로 가속시험장치 내에 총 500개의 시료가 장착될 수 있다.

② Relay Board

시료의 특성을 측정하기 위하여 시료 중 어느 하나를 선택해 주는 역할을 한다. Relay Board는 500개의 4P2T Relay와 이를 구동하기 위한 회로로 구성되는데, 가속전압원으로 부터의 인가전압을 각 시료에 전달하는 역할도 겸하게 된다.

③ Connection Board

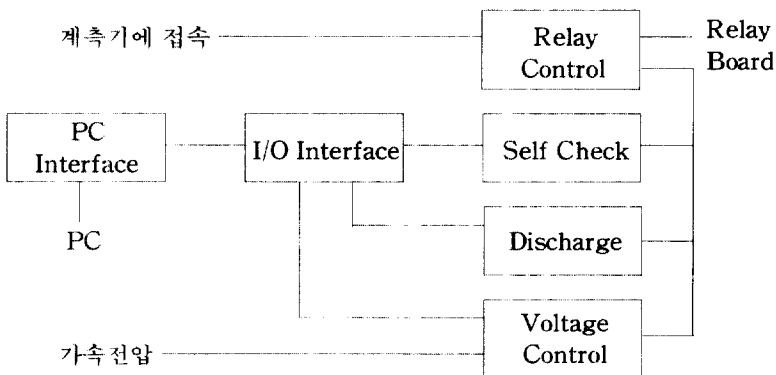
항온실(고온실)의 Parts Fixture와 뒷면 상온실의 Relay Board를 전기적으로 접속시키기 위한 접속용 기판이다. 접속용 패턴이 있는 기판의 양쪽 끝에 Fixture 및 Relay Board를 삽입하기 위한 Connector를 부착하고, 이 Connector를 제외한 기판부분은 상온실과 고온실 사이의 벽 내부에 절연시켜 삽입되어 있다.

④ Controller

Relay Board에 대한 일련의 제어를 행하는 부분으로 다음의 기능들을 수행한다.

- (i) PC와의 Interface 통신에 의한 동작지령 수신
- (ii) Relay 선택신호의 발생으로 Relay Board를 제어
- (iii) 가속전압인가 ON/OFF제어 (; 시험중 ON, 측정시 OFF)
- (iv) 시료의 특성측정에 앞서 시료 충전전하의 방전
- (v) 장비의 자체검사기능 지원

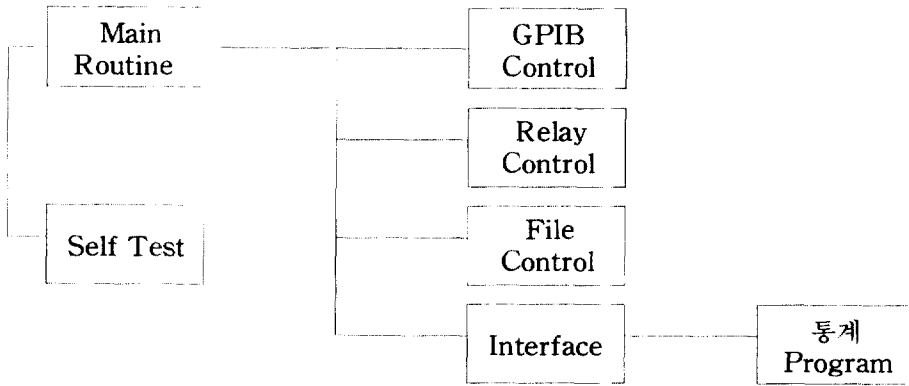
〈그림 3〉은 Controller의 Block Diagram을 나타낸 것이다.



〈 그림 3 〉 Controller Block Diagram

⑤ Software

사용자의 요구에 의해 각 시료에 대한 특성을 자동적으로 측정하는 부분으로 Main Menu 및 측정 Procedure 등을 수행한다. 또한 자동계측된 자료로부터 고장수 계수, 평균 수명 추정, 가속계수 산출 등이 자동적으로 수행된다. <그림 4>는 Software의 Block Diagram을 나타낸 것이다.



< 그림 4 > Software Block Diagram

가속수명시험장치의 가속시험 적용이 가능한 부품은 저항, 콘덴서, 코일 등 2단자 형태의 모든 부품이며, 주요기능으로서 다음과 같은 것이 있다.

- (i) 최대 500개까지의 시료에 대한 시험 및 자동측정을 할 수 있다.
- (ii) GPIB(general purpose interface bus) 통신기능이 있는 모든 계측기와 접속하여 사용이 가능하다.
- (iii) 시험시간의 경과에 따른 특성치의 경시변화분석 및 통계기능을 수행한다.
- (iv) 평균수명추정 및 가속계수산출 등의 연산기능을 수행한다.
- (v) 와이블 고장해석 Software와 Interface가 가능하다.

3.3 가속수명시험의 실험계획

(1) 시료 및 특성인자의 선택

본 연구에서는 D전자부품(주)에서 생산한 알루미늄전해콘덴서 중 가전제품에 많이 사용되고 있는 공칭정전용량 1μF, 정격전압 50V, 사용온도범위 -40℃ ~ 85℃를 가속수명시험의 대상으로 하였다. 그리고, 콘덴서의 특성인자에는 정전용량(Capacitance), 손실각정점(Tangent of Loss Angle: Tanδ), 누설전류(Leakage Current), 임피던스(Impedance)내 전압(Voltage Proof), 제3고조파 왜곡(Harmonic Distortion)[한국전기통신공사, 1987]등이 있으나, 본 연구에서 선택한 특성인자는 일반적으로 가장 문제가 되는 정전용량변화율과 손실각정점이다.

(2) 가속수준, 시료수의 배분 및 시험시간의 결정

가속수준 및 시료수의 배분은 앞장의 2.2절에서 소개한 가속수명시험의 설계방법인

Meeker와 Hahn의 '최적 4:2:1 배치계획'을 참고로 하여 결정하였으며, 가속요인으로 온도와 전압 두 가지를 고려하여 다음과 같은 실험계획을 수립하였다.

① 가속수준의 결정

온도와 전압 각각에 대하여 다음과 같은 3가지 가속수준을 결정하였다.

(i) 85℃, 107℃, 125℃

(ii) 50V, 75V, 100V

② 시료수의 배분

가속시험장치 내에 부품을 장착하는 Parts Fixture 단위로 전압이 인가될 수 있도록 설계되어 있으며, 시험장치 내의 온도는 하나의 일정한 온도로 고정된다. 따라서, 가속시험장치 내에 장착할 수 있는 총 500개의 시료를 온도 및 전압별로 완전한 4:2:1의 비율이 되도록 배분할 수 없으므로 전압의 경우 가능한 한 4:2:1에 근사하도록 시료수를 배분하고자 하였다. 또한 시험장치 내의 온도는 한가지 수준으로 고정시켜야 하므로, 시험온도별로 시료수를 차등배분할 수가 없었다. 이러한 현실적 제약 때문에 온도수준에 따른 4:2:1 배치계획은 온도수준에 따라 시료수를 배분하는 대신, 각 온도수준별로 시험시간을 4:2:1로 배분해 줌으로써 최적배치계획에 가깝도록 하였다. <표 3>에서 볼 수 있듯이 본 시험에서는 3개의 가속온도조건별로 각 500개씩, 총 1500개의 시료를 시험하기로 계획하였다.

< 표 3 > 가속수준에 따른 시료의 배분 (단위 : 개)

온도수준	전압수준			계
	50V	75V	100V	
85℃	250	150	100	500
107℃	250	150	100	500
125℃	250	150	100	500
계	750	450	300	1500

③ 시험시간의 결정

가속온도별 시험시간의 결정은 총시험시간(; 시료수×시험시간)이 약 4:2:1이 될 수 있도록 다음의 <표 4>와 같이 결정하였다.

< 표 4 > 가속온도별 시험시간 및 측정시간 (단위 : 시간)

시험온도	시험시간	특성치 측정시간
85℃	1800	120, 360, 480, 600, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800
107℃	1000	120, 480, 600, 800, 1000
125℃	480	120, 240, 360, 480

(3) 특성치의 측정절차

시험도중 각 측정시간에서는 측정특성인 정전용량과 손실각정접 값을 측정하게 되는데, 그 절차는 다음과 같다.

절차 0 : 콘덴서를 완전히 방전시킨 후 표준온도상태에서 특성치를 측정하여 불량품을 제거한다.

절차 1 : 표준온도상태에서 정전용량의 초기치를 측정한다.

절차 2 : 정해진 가속조건을 인가한 후 24시간째에 고온시험상태에서의 특성치의 값을 측정한다. (이 시점에서 고장이 발생된 불량품은 고장해석용 데이터에서 제거한다.)

절차 3 : 정해진 가속조건으로 다음 측정시점까지 방치한다.

절차 4 : 측정시간이 되면 콘덴서를 완전히 방전시키고 고온시험상태에서의 정전용량과 손실각정접 값을 측정한다.

절차 5 : 표준온도상태로 방치하여 표준온도상태에서의 정전용량과 손실각정접 값을 측정한다.

절차 5가 끝나면 다시 절차 3, 4, 5를 최종 측정시간까지 반복하여 특성치(정전용량과 손실각정접)를 측정한다.

(4) 고장판단기준

측정된 특성치(정전용량 및 손실각정접)에 대한 고장판단기준은 D전자(주)의 전해콘덴서 승인원에 지정된 고장판단기준인 다음의 <표 5>를 사용하였다.

< 표 5 > 고장판단기준 (: 1 μ F, 50V 알루미늄전해콘덴서의 경우)

특성	초기측정시	고온부하시험시
정전용량	1 μ F \pm 20% 이상	초기측정값의 \pm 20% 이상
손실각정접	Tan δ > 기준값(0.1)의 100%	Tan δ > 기준값(0.1)의 150%

(5) 추가 보완시험

① 가속수준의 추가

앞서 소개한 3가지 온도가속수준(85 $^{\circ}$ C, 107 $^{\circ}$ C, 125 $^{\circ}$ C)에 따라 실제 시험을 수행하고 이를 분석한 결과, 가속요인이 온도일 경우 일반적으로 성립된다고 널리 알려져 있는 Arrhenius법칙이 성립되지 않는 것을 관찰할 수 있었다[박영택, 1992]. 이 법칙이 성립하는 어떠한 온도범위가 존재하는가 알기 위하여 115 $^{\circ}$ C에서 500개의 시료를 800시간동안 추가시험을 실시하기로 하였다.

② 고장판단기준의 추가

본 시험수행결과 경시특성은 시간이 지남에 따라 열화되고 있는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있었으나, 앞서 지정한 고장판단기준에 의해서는 고장으로 판정되는 것이 거의 없어서 고장해석에 어려움이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고장판단기준을 정전용량

허용변화율은 20%에서 10%로, 손실각정점의 허용변화율은 150%에서 100%로 엄격하게 한 판정가속방법을 도입하여 결과분석이 보완될 수 있도록 하였다.

4. 실험결과분석

4.1 분석내용의 개요

알루미늄전해콘덴서의 가속수명시험에서 측정된 특성치는 정전용량과 손실각정점이다. 고장판단기준은 앞장의 <표 5>에서 소개한 바와 같이 정전용량은 초기값에 대한 변화율, 손실각정점은 기준값에 대한 백분율을 이용하여 분석하게 되는데, 특성치의 측정이 시험온도(; 고온)상태와 표준온도(; 25℃)상태의 두 가지 온도에서 이루어졌으므로 이들 각각에 대해서 분석하기로 한다.

가속수명시험데이터를 이용하여 본 연구에서 분석할 내용이 <표 6>에 요약되어 있다.

(표 6) 가속수명시험의 분석내용

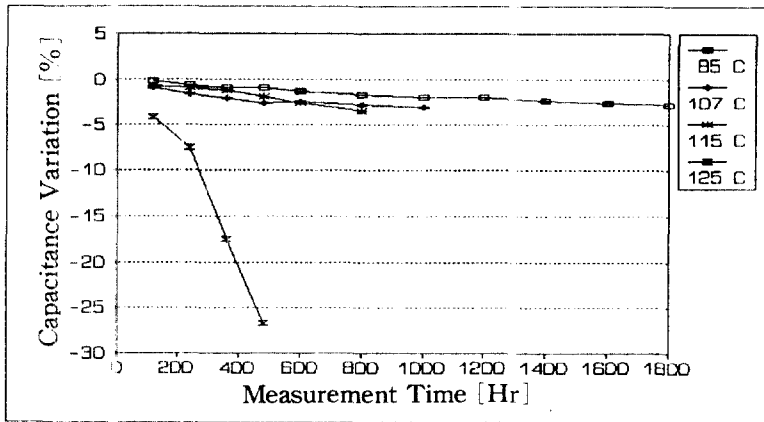
분석내용	설 명
경시특성의 분석	특성치(; 정전용량과 손실각정점)가 가속조건 하에서 시간에 따라 어떤 형태로 변하는지 파악함으로써, 부품의 실사용시 발생하게 되는 열화경향을 이해한다.
평균수명의 추정	가속조건별로 평균수명을 추정하고, 이를 가속모델의 도출 및 가속계수 산출에 이용한다.
가속모델 도출	가속조건과 평균수명과의 관계를 설명할 수 있는 회귀식을 도출함으로써, 가속 시험결과의 응용성을 높인다.
가속계수 산출	가속조건별 가속계수를 산출함으로써, 수명시험 및 고장률 산출에 소요되는 시간을 단축한다.

4.2 경시특성의 분석

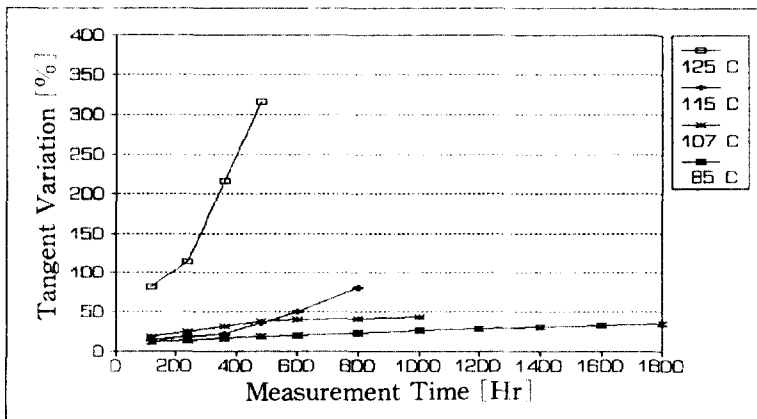
각 가속수준 하에서 시간경과에 따른 정전용량 및 손실각정점의 변화율에 관한 자료로부터 다음과 같은 사실을 관찰할 수 있었다[박영택, 1992].

- (i) 시간경과에 따라 특성치(; 정전용량 및 손실각정점) 변화율의 평균치 및 표준편차는 증가하며, 온도가 높아질수록 증가속도가 커진다.
- (ii) 전압은 특성치 변화율에 거의 영향을 주지 않는다.
- (iii) 시험온도(; 고온)에서 측정된 특성치의 변화율보다 표준온도(; 25℃)로 내려서 측정된 특성치의 변화율이 상대적으로 크다.

<그림 5>와 <그림 6>은 표준온도에서 측정된 가속온도별 경시특성을 요약한 그래프이다. 전압조건이 경시특성에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었으므로[박영택, 1992], 인가전압을 무시하고 시험온도가 같은 시료들의 특성치를 토대로 작성한 것이 <그림 5>와 <그림 6>이다.



〈 그림 5 〉 시험온도별 정전용량변화율의 경시특성 (; 25℃ 측정치)



〈 그림 6 〉 시험온도별 손실각정점변화율의 경시특성 (; 25℃ 측정치)

4.3 평균수명의 추정

평균수명의 추정에는 일반적으로 와이블확률용지가 널리 사용되고 있으나, 와이블확률용지를 사용하기 위해서는 비교적 많은 고장데이터가 필요하다. 실험결과 높은 온도수준을 제외하고는 고장수가 극히 적었기 때문에, 평균수명의 추정을 위해 와이블해석을 하는 대신 지수분포의 평균수명추정방법을 사용하기로 한다[박영택, 1992]. 일반적으로 전자부품의 경우 마모고장이 없으므로, 수명분포함수로서 지수분포가 널리 이용되고 있다.

고장모드, 고장판단기준 및 측정온도에 따른 평균수명의 추정치 중 D전자(주)의 고장판단기준인 정전용량변화율 20%, 손실각정점변화율 150%에 대한 평균수명의 추정치가 〈표 7〉에 요약되어 있다. 이 표에서 나타낸 평균수명은 정전용량 또는 손실각정점의 허용범위를 초과한 고장시까지의 평균시간을 나타낸다. 이 경우에도 경시특성에 영향을 주지 않는 것으로 판단된 전압조건을 무시하고 시험온도가 동일한 시료들을 모아서 계산하였다.

〈 표 7 〉 정전용량 또는 손실각정점의 허용범위를 초과한 고장까지의 평균수명
(; 고장판단기준은 정전용량변화율 20%, 손실각정점변화율 150%)

시험온도	표준온도(; 25℃) 측정시	시험온도(; 고온) 측정시
85℃	2.0×10^6	1.8×10^6
107℃	9.6×10^4	1.0×10^6
115℃	6.5×10^3	1.3×10^5
125℃	3.2×10^2	7.7×10^3

〈표 7〉에서 시험온도(; 고온) 측정시의 평균수명이 표준온도에서 측정한 것보다 대체로 크게 나온 것은 시험온도에서 측정한 경시특성이 보다 안정되게 나온 것에 비추어 볼 때 당연한 결과이다.

4.4 가속모델의 도출

전자부품의 수명은 거의 대부분이 사용온도의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 사용온도와 평균수명의 관계를 나타내기 위해 많이 사용되고 있는 Arrhenius 가속모델에서는 평균수명의 대수값(; $\log(\text{MTTF})$)과 사용되는 절대온도의 역수값(; $1/(T+273)^\circ\text{K}$) 사이에는 선형적인 비례관계가 성립한다는 것을 가정하고 있다. Arrhenius Plot은 가로축을 $1/(T+273)^\circ\text{K}$ 로, 세로축을 $\ln(\text{MTTF})$ 로 정해진 그래프용지 위에 사용온도($T^\circ\text{C}$)에 따른 평균수명(MTTF)을 타점한 것을 말한다. 따라서, Arrhenius Plot이 직선으로 나올 경우 Arrhenius 가속모델이 성립한다고 볼 수 있다.

평균수명의 추정치를 토대로 작성한 Arrhenius Plot들을 보면 타점치들이 직선상에 떨어지지 않으므로 널리 알려진 Arrhenius 가속모델이 그대로 성립한다고 보기는 어려웠다 [박영택, 1992]. 따라서 본 연구에서는 Arrhenius 가속모델을 무리하게 가정하지 않고, Arrhenius Plot상의 타점치들을 가까이 지나는 곡선의 회귀식(regression curve)을 도출하기로 하였다.

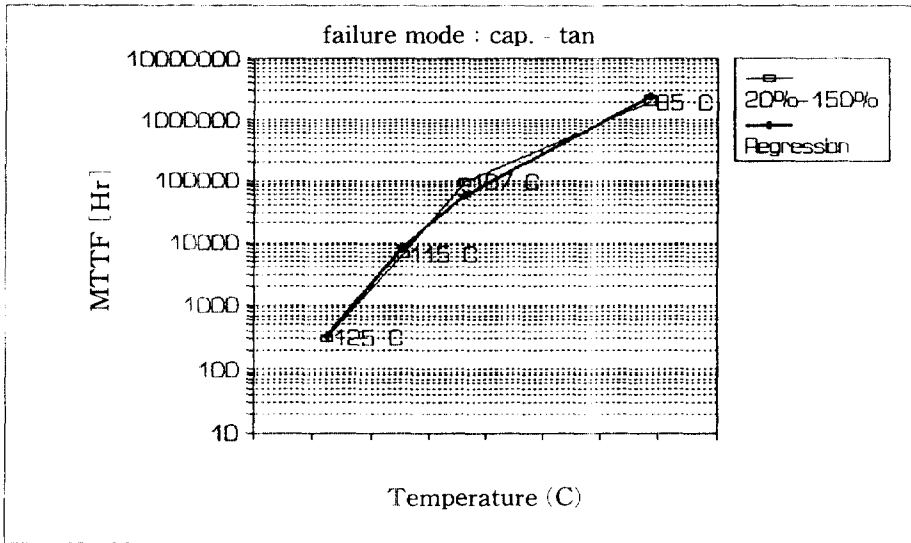
표준온도(; 25℃)에서 측정한 특성치를 D전자(주)의 고장판단기준(; 정전용량변화율 20%, 손실각정점변화율 150%)을 적용한 Arrhenius Plot과 회귀곡선은 〈그림 7〉과 같다. 이 경우 최소자승법을 이용해 구한 회귀곡선은

$$\ln(\text{MTTF}) = 70.4 + 7.1 \ln \left(\frac{1}{(T+273)} - 0.0024 \right)$$

즉,

$$\text{MTTF} = \exp \left[70.4 + 7.1 \ln \left(\frac{1}{(T+273)} - 0.0024 \right) \right]$$

와 같이 표현된다. 이 회귀식의 결정계수(R^2)는 0.99로서 높게 나타났다.



〈 그림 7 〉 Arrhenius Plot과 회귀곡선 (; 25°C 측정, 고장판단기준: 용량변화율 20%, 손실각정점변화율 150%)

4.5 가속계수의 산출

가속계수(AF: Acceleration Factor)란 정상조건 하에서의 평균수명과 가속조건 하에서의 평균수명의 비율을 나타내는 것으로서, 이 값은 가속성이 성립하는 범위 (; 일반적으로 고장메카니즘이 유지됨으로써 고장모드가 변하지 않는 범위) 내에서 가속수명시험에 의해 시험시간을 몇 배나 단축시킬 수 있는가를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{가속계수(AF)} &= \frac{\text{표준온도에서의 평균수명(MTTF}_0\text{)}}{\text{가속온도에서의 평균수명(MTTF)}} \\ &= \frac{\exp [70.4 + 7.1 \ln (\frac{1}{(T_0 + 273)} - 0.0024)]}{\exp [70.4 + 7.1 \ln (\frac{1}{(T + 273)} - 0.0024)]} \end{aligned}$$

(표준온도 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 를 대입하면)

$$= \frac{1.4 \times 10^9}{\exp [70.4 + 7.1 \ln (\frac{1}{(T + 273)} - 0.0024)]}$$

이 식을 이용하여 여러 가지 사용온도(T °C)에 대하여 평균수명과 가속계수를 산출해 놓은 것이 〈표 8〉이다.

〈 표 8 〉 가속요인이 온도일 경우의 가속계수(AF)표

(평균수명의 단위 : 시간)

온도(℃)	평균수명	가속계수	온도(℃)	평균수명	가속계수
25	1.4×10^9	1.0	70	1.7×10^7	82
30	8.9×10^8	1.6	75	9.3×10^6	151
35	5.8×10^8	2.4	80	4.9×10^6	286
40	3.7×10^8	3.8	85	2.5×10^6	560
45	2.3×10^8	6.1	90	1.2×10^6	1,167
50	1.4×10^8	10	95	5.4×10^5	2,592
55	8.7×10^7	16	100	2.3×10^5	6,087
60	5.2×10^7	27	105	8.8×10^4	15,909
65	3.0×10^7	47	110	3.0×10^4	46,667

5. 결론 및 토의

오늘날 세계적 수준(world-class level)의 기업들은 지금까지 통용되어 오던 합격품질 수준(AQL) 대신 완전무결(ZD)을 품질표준으로 삼을 정도로 품질에 대한 요건을 까다롭게 하고 있다. 부품이 좋지 못하면 제품도 좋을 수 없다는 평범하고도 중요한 사실을 상거래 불 때, 부품의 신뢰성확보는 좋은 제품의 전제조건임을 알 수 있다.

오늘날과 같은 부품의 고품질화 추세 하에서 부품의 신뢰성평가를 신속하게 수행하기 위해서는 가속수명시험의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 알루미늄전해콘덴서에 대한 가속수명시험의 실시 및 분석내용을 다루었다. 실험결과로부터 가속모델을 도출하였다. 본 실험의 결과는 다음과 같은 두 가지 중요한 점을 보여주고 있다:

① 가속조건이 온도일 경우 성립한다고 널리 알려져 있는 Arrhenius 모델이나, 전자부품에 잘 적용된다고 알려져 있는 10℃법칙이 본 실험결과에서는 적용되지 않았다. 따라서 일반적으로 알려져 있는 가속모델들을 전자부품이 마이크로일렉트로닉스화 되어 가는 오늘날에도 검증없이 그대로 적용하는 것은 현실적으로 무리가 있을 수 있다.

② 대부분의 전자부품에 대한 규격에서는 1,000시간 작동시 고장이 없을 것이라는 것을 요구하고 있으나, 본 실험의 대상이 된 콘덴서는 가속조건 하에서도 거의 고장나지 않았다. 따라서 전자부품을 가져다 쓰는 Set-Maker의 경우에는 전자부품의 수명이 얼마인가 하는 것보다는 불량품을 사전에 어떻게 제거하는가 하는 것이 현실적으로 중요하다. 따라서 불량품제거를 위한 사전 선별(screening)이 상당히 중요하다는 것을 알 수 있다. 본 실험결과를 통해 볼 때 가전제품의 경우 제품고장의 40%이상이 부품불량 때문이라는 종래의 상식이 이미 옛말일 가능성이 상당히 높으며, Set-Maker에서 사전 선별을 강화하고

제조불량을 철저히 예방할 수 있다면 제품고장을 대폭 줄이는 것이 현실적으로 가능하다는 것을 짐작할 수 있다.

가속시험모델은 실제사용시의 고장메카니즘과 가속시험시의 고장메카니즘이 동일하다는 것을 가정하고 있으나, 이러한 가정이 성립되고 있는지를 검증하기 위해서는 고장의 물리적 해석이 뒷받침되어야 한다. 본 연구의 시험결과 가속조건에 따라 고장모드의 변화가 관찰되지 않았으므로 뚜렷한 고장메카니즘의 변화는 없었던 것으로 생각되나, 시험시간의 경과에 따라 특성치 변화율의 평균과 표준편차는 증가하며 온도가 높아질수록 증가속도가 커지는 것도 관찰할 수 있었다. 본 연구는 부품을 가져다 쓰는 Set-Maker의 입장에서 시험한 것이므로 고장물리에 대한 해석까지는 다루지 못하였으나, 이러한 문제에 대해서는 전자부품메이커에서 연구해 주어야 할 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서는 가속모델 도출 및 평균수명추정시 Arrhenius 모델을 사용하지 않았는데 그 이유는 다음과 같다. Arrhenius 확률용지의 시간축이 로그눈금(log scale)이기 때문에 외삽시 약간의 오차도 실제시간으로 환산하면 몇십배, 몇백배의 추정오차로 연결되기 때문이다. 또한 Arrhenius 법칙이 널리 인용되기는 하지만 그것이 이론적으로 근거를 갖는 모델이 아니라 하나의 경험적 관찰이라는 사실도 고려하였다.

본 실험은 알루미늄전해콘덴서 하나를 대상으로 한 통계적 모델의 적용에 관한 연구라는 한계가 있다. 가속수명시험의 대상을 넓히고, 고장의 통계적 모델과 물리적 모델에 관한 연구가 병행된다면 가속수명시험의 현실적용이 보편화될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 권수호, 고영준(1991), "저항기의 가속수명시험 데이터의 해석," 「제1회 한국신뢰성보전성심포지움 발표문집」, pp. 131-138.
- [2] 삼성전기(주)종합연구소(1992), "반도체형 세라믹 콘덴서의 가속시험과 고장해석" [제2회 한국신뢰성보전성심포지움 발표문집], pp. 243-252.
- [3] 박명규, 허강현(1991), "적층 세라믹 콘덴서(MLCC)의 가속수명 시험방법의 연구" 「제1회 한국신뢰성·보전성심포지움 발표문집」, pp. 111-127.
- [4] 박영택(1992), 「대우전자 가속시험 응용기술 및 최적 부품선정기술개발」, 대우전자 연구보고서.
- [5] 한국과학기술원(1989), 「GK-ALTAD 가속수명시험 데이터 해석용 소프트웨어: 이론 및 교육교재」, 한국과학기술원 응용통계실험실 연구보고서.
- [6] 한국기계연구소(1987), 「전자부품의 신뢰성과 고장형태에 관한 연구」, 한국기계연구소 부설 기업기술지원센터 연구보고서.
- [7] 한국기계연구소(1988), 「전자부품의 신뢰성과 고장형태 연구」, 한국기계연구소 부설 기업기술지원센터 연구보고서.
- [8] 한국전기통신공사 품질표준서 - 0101(1987), 「전자부품의 신뢰도 예측」.
- [9] 한국전기통신공사 품질핸드북 - 1601(1989), 「가속시험의 일반원칙 및 분석절차」.
- [10] Hahn, G. J. and Meeker, Jr. W. Q. (1982), "Pitfalls and Practical Consideration

- in Product Life Analysis- Part I: Basic Concepts and Dangers of Extrapolation," *Journal of Quality Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 144-152.
- [11] Hahn, G. J. and Nelson, W. (1974), "A Comparison of Methods for Analyzing Censored Life Data to Estimate Relationships Between Stress and Product Life," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-23, No. 1, pp. 2-11.
- [12] Meeker, W. Q. and Escobar, A. (1993), "A Review of Recent Research and Current Issues in Accelerated Testing," *International Statistical Review*, pp. 147-168.
- [13] Meeker, W. Q., and Hahn, G. J. (1985), "How to Plan an Accelerated Life Test-Some Practical Guidelines," *The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques*.
- [14] Miller, R., Nelson, W. (1983), "Optimum Sample Step-Stress Plans for Accelerated Life Testing," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-32, No. 1, pp. 59-65.
- [15] MIL-HDBK-217E(1986), *Reliability Prediction of Electronic Equipment*.
- [16] Nelson, W. (1980), "Accelerated Life Testing - Step-Stress Models and Data Analysis," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-29, No. 2, pp. 103-108.
- [17] Nelson, W. (1990), *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc.
- [18] Nelson, W. (1971), "Analysis of Accelerated Life Test Data-Part I: The Arrhenius Model and Graphical Methods," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. Vol. EI-6, No. 4, pp. 165-181.
- [19] Nelson, W. (1972), "Analysis of Accelerated Life Test Data-Part II: Numerical Methods and Test Planning," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. Vol. EI-7, No. 1 pp. 36-55.
- [20] Nelson, W. (1972), "Analysis of Accelerated Life Test Data-Part III: Product Comparisons and Checks on the Validity of the Model and Data," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. Vol. EI-7, No. 2, pp. 99-119.
- [21] Nelson, W. (1975), "Analysis of Accelerated Life Test Data-Least Squares Methods for the Inverse Power Law Model," *IEEE Transactions on Reliability*. Vol. R-24, No. 2, pp. 103-107.
- [22] Nelson, W. (1972), "A Short Life Test for Comparing a Sample with Previous Accelerated Test Results," *Technometrics*, Vol. 14, No. 1, pp. 175-185.
- [23] Nelson, W. (1972), "Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data With the Inverse Power Law Model," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-21, No. 1, pp. 2-11.
- [24] Nelson, W., Kielpinski, T. J. (1976), "Theory for Optimum Censored Accelerated Life Tests for Normal and Lognormal Life Distributions," *Technometrics*, Vol. 18, No. 1, pp. 105-114.

- [25] Nelson, W. and Meeker, W. Q. (1978), "Theory for Optimum Accelerated Censored Life Tests for Weibull and Extreme Value Distributions." *Technometrics*, Vol. 20, No. 2, pp. 171-177.
- [26] Nelson, W. (1972), "Theory and Applications of Hazard Plotting for Censored Failure Data." *Technometrics*, Vol. 14, No. 4, pp. 945-966.
- [27] Peck, D. S. and Trapp, O. D. (1987), *Accelerated Testing Handbook*. Technology Associates.
- [28] Proschan, F. and Singpurwalla, N. D. (1980), "A New Approach to Inference from Accelerated Life Tests," *IEEE Transaction on Reliability*, Vol. R-29, No. 2, pp. 98-102.
- [29] Tobias, P. A. and Trindade, D. C. (1986), *Applied Reliability*. Van Nostrand Reinhold Co.
- [30] 關西電子工業振興センター-信賴性分科會編(1990), 「故障をゼロにする信賴性技術」, 日科技連.
- [31] 鹽見 弘, 原田友七(1979), "劣化にともなう特性値分布の検討例, 電解コンデンサの加速壽命實驗の場合(Ⅱ)," 「電子技術總合研究所彙報」, 第43巻, 第4號.
- [32] 原田友七, 鹽見 弘(1976), "アルミニウム電解コンデンサの壽命加速とその加速係數について," 「電子技術總合研究所彙報」, 第40巻, 第9號, pp. 43-63.