

信賴性應用研究

제2권, 제1호, pp. 1-14, 2002

국산 고체 알루미늄 전해 커패시터의 가속수명시험 개발 및
국외 선진업체 제품과의 특성 비교

박정원, 이중휘

산업기술시험원

Development of Accelerated Life Tests for Solid Aluminum
Electrolyte Capacitor Made by Domestic Manufacturing Company
and Comparison of Characteristics between Domestic Products and
Foreign Advanced Products

Jung Won Park, Jung Hwi Lee

Korea Testing Laboratory

Abstact

High temperature operating test, temperature humidity test and temperature cycling were performed at various test levels for solid aluminum electrolyte capacitors made by domestic manufacturing company and foreign advanced manufacturing company. It was found that main failure mode of solid aluminum electrolyte capacitors was the decrease

of their capacitances. The decrease of their capacitances has the same pattern in these tests. Test result for comparison of characteristics between domestic products and foreign advanced products shows that domestic products have the shorter lifetime and their capacitances decrease more rapidly in high temperature operating test and temperature humidity test. Also in these tests, accelerated tests for high temperature operating test and temperature humidity test were developed.

1. 서론

디지털 기기의 수요 증가에 따라서 주파수 특성이 좋은 고체 알루미늄 전해 커패시터의 수요도 함께 증가하고 있다. 현재 국내 시장규모는 매년 50% 이상 신장하고 있으며 대만 및 중국 시장의 급격한 신장으로 세계 시장 규모는 월 2억개 수준에 이르고 있다. 국내에서는 2개 업체에서 개발 완료하여 생산을 하고 있고, 다른 업체에서는 개발 검토 초기 단계에 있으며 대부분의 시장을 일본 제조업체에서 차지하고 있는 실정이다. (현재 일본의 SANYO에서 유일하게 월 1억개 이상의 생산을 하고 있다).

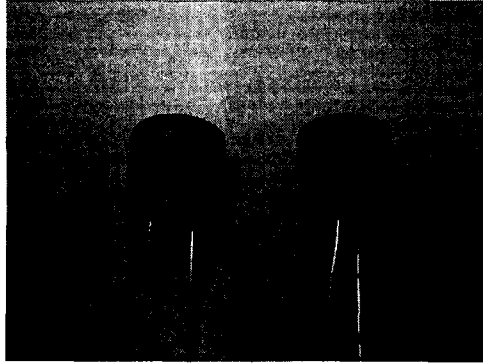
이와 같은 상황에서 국내에서 생산하는 고체 알루미늄 전해 커패시터의 경우 생산하기 시작한 기간이 짧은 상황이어서 아직 특성이 안정되지 않고, 신뢰성이 입증되지 않은 상태에서 경쟁력을 확보하는데 어려움을 겪고 있다. 또한, 제품의 신뢰성을 향상시키기 위하여 개선방법을 강구한다고 하여도 개선 효과를 평가하기 위해서는 장시간 시험해야 하기 때문에 제품의 신뢰성 향상에 많은 시간이 걸리고 있다.

본 연구에서는 고체 알루미늄 전해 커패시터의 가속시험방법을 개발하여 고체 알루미늄 전해 커패시터를 평가하는데 걸리는 시간을 단축시키고, 국산 제품과 외국 선진 업체 제품을 시험하여 두 제품사이의 특성과 신뢰성을 비교함으로써 국산 제품이 개선해야 할 사항을 제시하였다.

2. 본론

2.1 대상 부품

본 연구에서 대상으로 한 부품은 <그림 1>과 같은 고체 알루미늄 전해 커패시터로서 <표 1>과 같은 특성을 갖는다.



<그림 1> 대상 부품 사진

<표 1> 대상 부품의 특성

특성 항목	특성 값	비고
정격 전압	16 VDC	
정전용량	150 μ F	허용차 \pm 20%
유전손실율 (tan δ)	최대 0.08	
누설전류	48 μ A	
ESR (100 kHz)	28 m Ω	
허용 리플 전류	3260 mA rms	
서지 전압	18.4 VDC	
정격 사용 온도 범위	-55 $^{\circ}$ C ~ 105 $^{\circ}$ C	

2.2 시험 계획

본 연구에서는 고체 알루미늄 전해 커패시터의 신뢰성에 영향을 미치는 온도, 온습도, 온도사이클 스트레스를 이용하여 장시간 시험함으로써 대상 커패시터의 시간에 따른 특성 변화와 고장모드 및 메카니즘을 조사하였다. 각각의 스트레스에 따라서 다음과 같이 시험하였다.

<표 2> 고온부하시험

시험 조건	시료 수	특성 측정시간
105 $^{\circ}$ C, 정격 전압 인가	30	초기 측정, 168h, 504h, 1272h
125 $^{\circ}$ C, 정격 전압 인가	15	초기 측정, 336h, 1104h

<표 3> 온습도시험

시험 조건	시료 수	특성 측정시간
85℃, 85%	30	초기 측정, 456h, 624h, 864h, 1006h
110℃, 85%	15	초기 측정, 72h, 144h, 216h

<표 4> 온도사이클시험

시험 조건	시료 수	특성 측정시간
-55℃ ~ 105℃	10	초기 측정, 200회, 400회, 600회

<표 2>의 고온부하시험의 경우 대상 부품의 최고 허용 사용온도와 자료 조사 결과 시험이 진행된 데이터가 있어 가속성이 성립할 가능성이 있는 것으로 판단되었던 125℃의 두 조건을 시험조건으로 선택하였고, 통계적 분석의 정확성을 높이기 위하여 높은 스트레스 수준보다 낮은 스트레스 수준에 더 많은 시료 수를 할당하였다(Meeker and Hahn, 1985).

<표 3>의 온습도시험의 경우에는 최근 온습도시험조건으로 많이 적용되고 있는 85℃/85% 조건과 수증기압을 더 높여 수분을 부품 속에 단시간에 더 많이 흡수시켜 수분 흡수에 의한 고장현상을 더 가속시킬 수 있는 110℃/85%조건을 두 조건을 시험조건으로 선택하였고, 고온부하시험과 같이 통계적 분석의 정확성을 높이기 위하여 낮은 스트레스 조건에 더 많은 시료를 배분하였다. <표 4>의 온도사이클시험의 경우에는 온도가 변화함에 따라서 시험품을 구성하는 재료가 수축, 팽창하는 과정에서 열팽창계수가 다른 재료들 사이의 응력에 의하여 발생하는 고장현상을 확인하기 위하여 시험품의 사용온도 범위에서 온도사이클시험을 실시하였다.

각각의 시험에 있어서 부품의 고장 여부를 확인하기 위하여 시험 중간에 다음과 같은 측정항목을 측정하였고, 측정 결과에 대한 고장판정기준을 다음과 같이 정하였다.

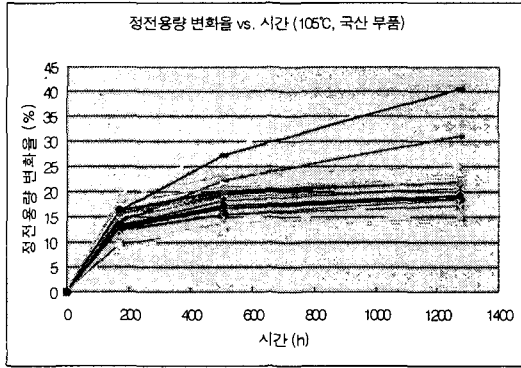
<표 5> 측정항목 및 고장판정기준

측정항목	고장판정기준
정전용량	정전용량변화율($\Delta C/C$) \leq 20%
유전손실율	0.08(초기 사양) \times 1.5 = 0.12
누설전류	48 μ A 이하

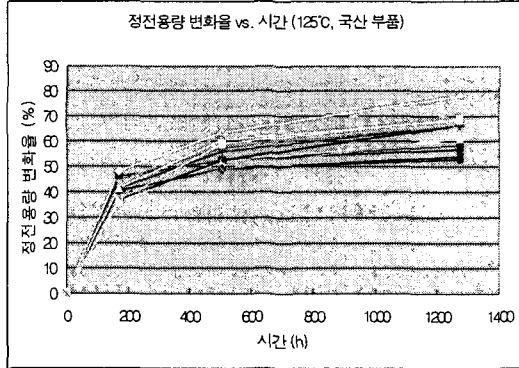
2.3 시험 결과

2.3.1 고온부하시험

고온부하시험 결과 정전용량과 유전손실율의 경우 105℃와 125℃에서 동일한 경향을 가지며 변화하였고, 125℃ 조건에서 변화량이 더 컸다(아래 그림 참조). 하지만 누설전류의 경우에는 일정한 경향이 없는 데이터가 얻어졌다.

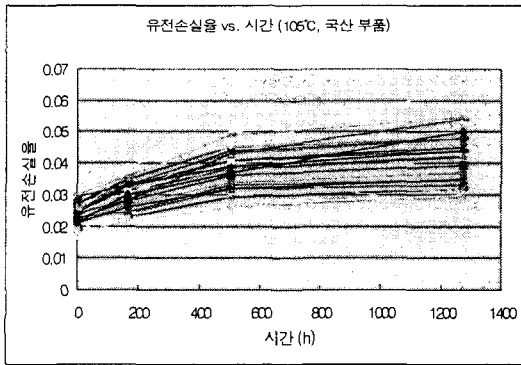


a. 105°C 경우

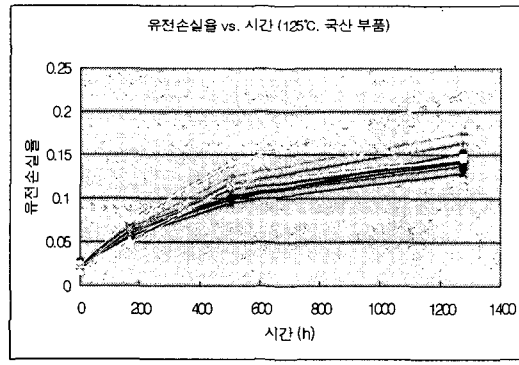


b. 125°C 경우

<그림 2> 시간에 따른 정전용량 변화 추이



a. 105°C 경우



b. 125°C 경우

<그림 3> 시간에 따른 유전손실을 변화 추이

위 그림과 같이 얻어진 특성 데이터와 <표 5>의 고장판정기준으로부터 산출한 고장데이터를 통하여 주 고장모드는 정전용량의 감소임을 알 수 있었고, 허용하는 최대 사용온도인 105°C에서의 고장률을 추정할 결과 다음과 같았다. 단, 수명분포는 고장데이터를 분석한 결과 지수분포가 적합한 것으로 나타나서 지수분포를 적용하였으며 분석은 통계분석 소프트웨어 SAS를 이용하였다.

$$\text{고장률} = 1/1608h = 62\%/1000h @ 105^\circ\text{C}$$

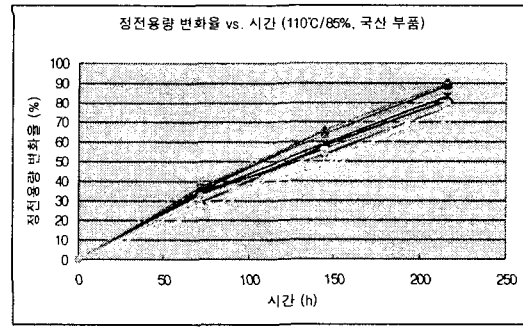
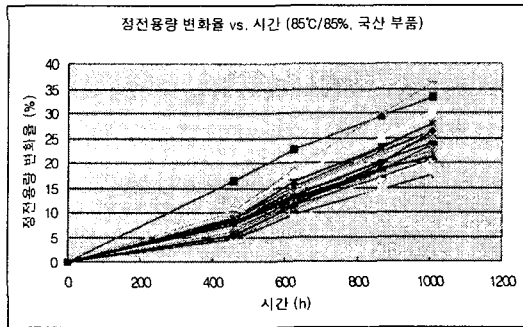
추정된 수명분포로부터 다음과 같은 수명데이터를 얻을 수 있다.

<표 6> 105°C 조건에서 제 p 백분위수(단위: 시간)

고장 확률 (p)	제 p 백분위수(h)	제 p 백분위수의 95% 신뢰하한	제 p 백분위수의 95% 신뢰상한
1	16.16	9.88	26.43
5	82.48	50.42	134.91
10	169.42	103.58	277.11
30	573.52	350.63	938.09
63	1607.96	983.06	2630.10

2.3.2 온습도시험

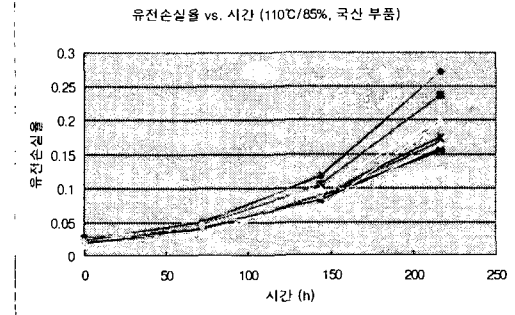
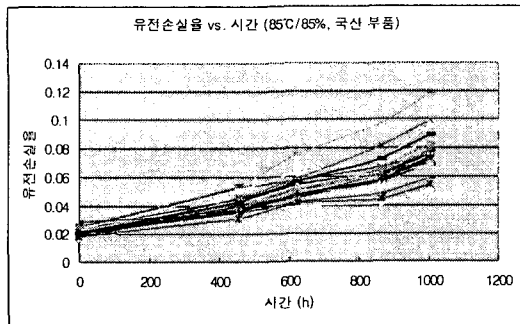
온습도시험에서도 고온부하시험과 마찬가지로 정전용량과 유전손실율의 경우 시간에 따라서 일정한 경향을 가지고 변화하였고(아래 그림 참조), 누설전류의 경우에는 일정한 경향이 없는 데이터가 얻어졌다.



a. 85°C/85% 경우

b. 110°C/85% 경우

<그림 4> 시간에 따른 정전용량 변화 추이



a. 85°C/85% 경우

b. 110°C/85% 경우

<그림 5> 시간에 따른 유전손실율 변화 추이

위 그림과 같이 얻어진 특성 데이터와 고장판정기준을 토대로 각 조건에서의 고장데이터를 산출할 수 있었고, 산출된 고장데이터로부터 온습도시험에 있어서 주된 고장모드는 정전용량의 감소임을 알 수 있었다. 허용하는 사용 온도범위 내에 있는 85°C/85% 조건에서의 고장데이터를 사용하여 수명분포를 추정한 결과 다음과 같은 수명분포가 추정되었다. 단, 수명분포는 고장데이터를 분석하여 적합한 것으로 밝혀진 와이블분포를 적용하였고, 데이터분석에는 통계분석 소프트웨어인 SAS를 이용하였다.

$$F(t)=1-\exp[-(t/915.14)^{7.85}]$$

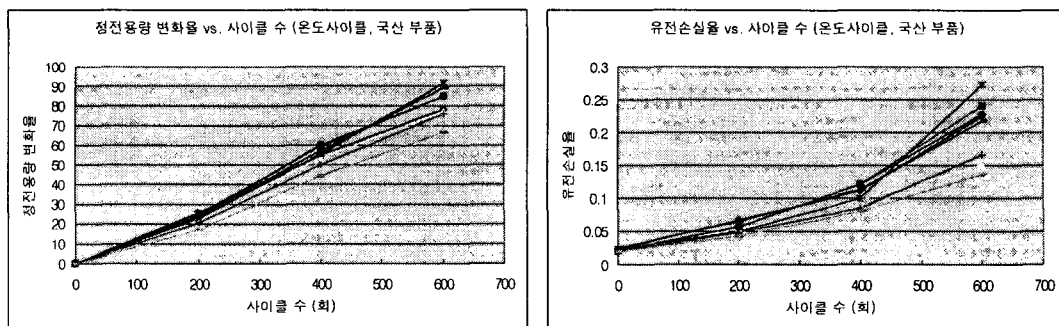
추정된 수명분포로부터 다음과 같은 수명데이터를 얻을 수 있다.

<표 7> 85°C/85% 조건에서 제 p 백분위수

고장 확률 (p)	제 p 백분위수(h)	제 p 백분위수의 95% 신뢰하한	제 p 백분위수의 95% 신뢰상한
1	509.16	405.22	639.77
5	626.73	536.11	732.66
10	686.95	606.01	778.70
30	802.46	742.54	867.22
63	915.14	868.49	964.30

2.3.3 온도사이클시험

온도사이클시험 결과 얻어진 특성 열화데이터를 그래프로 나타낸 결과 다음과 같은 그래프들이 얻어졌다.



a. 정전용량 변화율

b. 유전손실율

<그림 6> 사이클 수에 따른 특성 변화 추이

온도사이클시험에서도 주된 고장모드는 정전용량의 감소였고, 고장데이터로부터 수명분포를 추정한 결과 다음과 같은 수명분포가 추정되었다. 단, 수명분포는 와이블분포를 가정하였

다.

$$F(t)=1-\exp[-(t/161.83)^{3.72}]$$

추정된 수명분포로부터 다음과 같은 수명데이터를 얻을 수 있다.

<표 8> 온도사이클시험에 있어서 제 p 백분위수

고장 확률 (p)	제 p 백분위수(h)
1	46.95
5	72.79
10	88.34
30	122.64
63	161.83

2.4 가속시험 개발

2.3절에서 언급한 바와 같이 고체 알루미늄 전해 커패시터의 주된 고장모드는 정전용량의 감소였다. 그러므로 정전용량의 감소 현상에 초점을 맞추어 가속시험방법을 개발하였다. 정전용량이 시간에 따라서 일정한 경향을 가지고 열화되는 특성을 가지고 있음이 시험을 통하여 확인되었으므로 정전용량의 열화경향을 모델링하고, 스트레스에 따른 열화 경향을 분석함으로써 가속모델을 제시하였다.

2.4.1 온도 스트레스를 이용하는 경우

온도 스트레스를 이용하는 경우 일정한 스트레스 조건에서 정전용량이 열화되는 경향은 다음과 같은 모델을 따르는 것으로 가정하였다.

(1) 어느 한 시점에서 정전용량 변화율 $\Delta(\{\text{초기 정전용량} - t\text{시점에서의 정전용량}\} \times 100 / \text{초기 정전용량, \%})$ 는 다음과 같은 대수정규분포를 따른다.

$$f(t) = \{0.4343 / [(2\pi)^{1/2} t \sigma]\} \exp\{-[\log(t) - \mu]^2 / (2\sigma^2)\}$$

(2) 시간에 따른 정전용량 변화율의 열화 추이는 다음과 같은 일반적인 화학반응 모델을 따른다(塩見弘 외, 1985).

$$\Delta_{0.5}(t) = (Kt)^\beta$$

단, $\Delta_{0.5}(t)$ 는 t 시점에서의 정전용량 변화율의 중앙값(median), K 는 반응속도 상수, t 는 시간, β 는 상수이다. 이 모델의 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같은 선형모델이 얻어진다.

$$\ln \Delta_{0.5}(t) = \beta \ln K + \beta \ln t$$

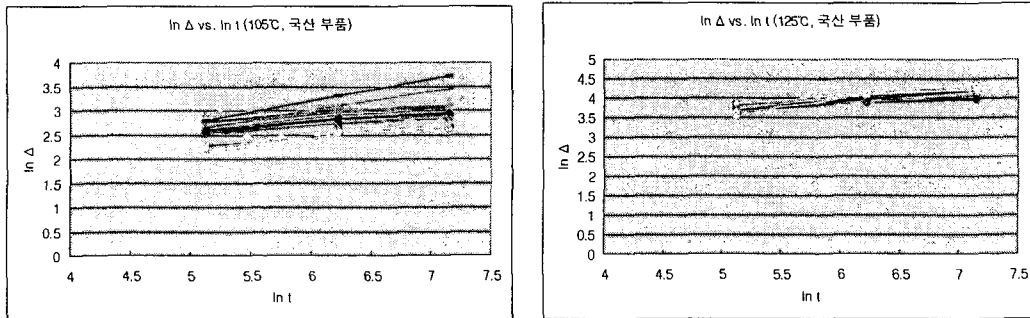
$$\rightarrow y = a + bx$$

(3) (2)의 화학반응 모델에서 반응속도 상수 K 는 온도에 의존하며, 다음과 같은 아레니우스 관계식을 따른다.

$$K = A \exp(-E/kT)$$

단, E 는 활성화에너지(eV), k 는 볼츠만 상수(8.617×10^{-5} eV/K), T 는 절대온도(K), A 는 상수이다.

시간에 따른 정전용량 변화율의 변화 추이에 대한 모델이 적합한지 확인하기 위하여 $\ln \Delta$ 와 $\ln t$ 의 관계를 그래프로 나타낸 결과 다음과 같았다. 이 그래프로부터 $\ln \Delta$ 와 $\ln t$ 의 관계는 선형관계에 있음을 알 수 있다.

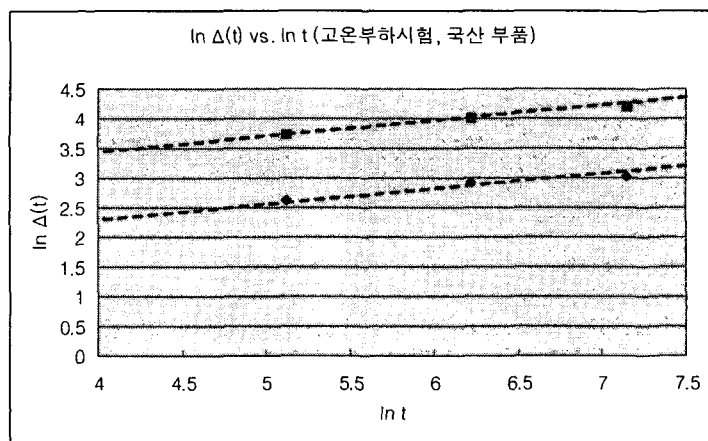


a. 105°C 조건

b. 125°C 조건

<그림 7> 고온부하시험에서의 $\ln \Delta$ 와 $\ln t$ 의 관계

각 조건의 측정시점별 중앙값 $\ln \Delta_{0.5}(t)$ 을 구하여 조건 별 $\ln \Delta_{0.5}(t)$ 와 $\ln t$ 의 관계를 한 그래프에 나타내면 다음과 같다.



<그림 8> $\ln \Delta_{0.5}(t)$ 와 $\ln t$ 의 관계

위 그림에서 보면 조건별 기울기 β 는 시험조건에 의존하지 않는 것으로 판단되므로 시험조건 별로 기울기가 동일하다는 제약 하에서 각 조건 별 y절편을 추정하였다. 이와 같은 추정을 위하여 더미 변수를 이용하여 조건 별 열화경향을 다음과 같이 모델링하였다.

$$y = a+bx = c+ds+bx$$

단, s 는 105°C 조건의 경우 0의 값을 가지며, 125°C 조건의 경우 1을 갖는 더미 변수이다.

통계분석 소프트웨어 SAS를 이용하여 모델의 파라미터 c, d, b를 추정된 결과 다음과 같은 값이 얻어졌다.

<표 9> 모델의 파라미터 추정 결과

c	d	b	R ²
1.474	1.111	0.224	0.997

위 표로부터 조건 별로 시간에 따른 정전용량 변화율의 변화 추이는 다음과 같은 모델을 따름을 알 수 있었다.

<표 10> 시험조건 별 시간에 따른 정전용량 변화율의 열화 모델

시험 조건	열화 모델	추정된 모델
105℃	$\ln \Delta_{0.5}(t) = \beta \ln K + \beta \ln t$	$\ln \Delta_{0.5}(t) = 0.224 \ln 720.539 + 0.224 \ln t$
125℃		$\ln \Delta_{0.5}(t) = 0.224 \ln 102744 + 0.224 \ln t$

위 표에서 추정된 모델로부터 온도 변화에 따른 열화모델, 즉, 아레니우스 관계식을 추정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ln K &= \ln A + (-E/1000 \cdot k) \times (1000/T) \\ &\rightarrow y = a + b x \\ &\rightarrow y = 105.284 - 37.310x \\ &\therefore E = 3.215 \end{aligned}$$

이로부터 105℃ 조건과 125℃ 조건 사이의 가속계수(AF)는 다음과 같다.

$$AF = \exp[(3.215/k) \cdot (1/378 - 1/398)] \approx 143$$

그러므로 105℃에서의 1000시간 시험은 125℃에서 7시간만 실시하면 동일한 시험 효과를 낼 수 있다.

2.4.2 온습도 스트레스를 이용하는 경우

온습도 스트레스를 이용하는 경우도 온도 스트레스를 이용하는 경우와 마찬가지로 분석하여 일정한 스트레스 조건에서 정전용량이 열화되는 경향은 다음과 같은 모델을 따르는 것으로 밝혀졌다.

<표 11> 시험조건 별 시간에 따른 정전용량 변화율의 열화 모델

시험 조건	열화 모델	추정된 모델
85℃/85%	$\ln \Delta_{0.5}(t) = \beta \ln K + \beta \ln t$	$\ln \Delta_{0.5}(t) = 1.056 \ln 0.019 + 1.056 \ln t$
110℃/85%		$\ln \Delta_{0.5}(t) = 1.056 \ln 0.329 + 1.056 \ln t$

위 표에서 추정된 모델로부터 온도 변화에 따른 열화모델, 즉, 아레니우스 관계식을 추정하면 다음과 같다.

$$\ln K = \ln A + (-E/1000 \cdot k) \times (1000/T)$$

$$\rightarrow y = a + b x$$

$$\rightarrow y = 39.842 - 15.686x$$

$$\therefore E = 1.352$$

이로부터 85℃/85%조건과 110℃/85% 사이의 가속계수(AF)는 다음과 같다.

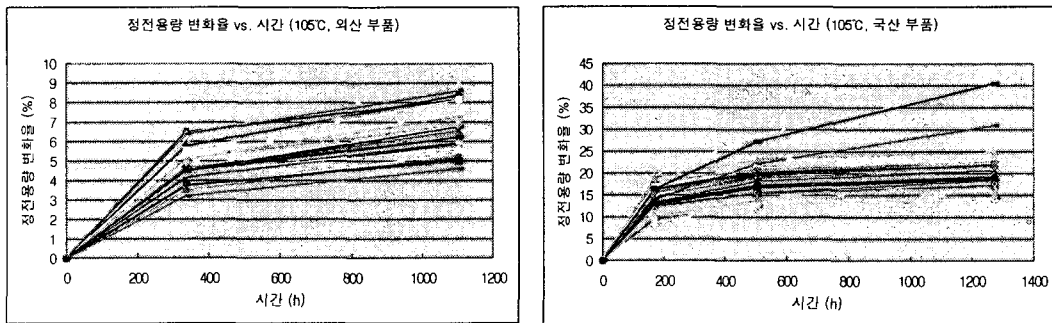
$$AF = \exp[(E/k) \cdot (1/358 - 1/383)] \approx 17$$

그러므로 85℃/85%에서의 1000시간 시험은 110℃/85%에서 59시간만 실시하면 동일한 시험 효과를 낼 수 있게 된다.

2.5 국외 제조업체 부품과의 특성 및 신뢰성 비교

국의 제조업체 부품과의 특성 및 신뢰성을 비교하기 위하여 세계에서 가장 점유율이 높은 일본의 고체 알루미늄 전해 커패시터 업체 부품을 구입하여 국산 부품에 대하여 실시한 고온부하시험, 온습도시험, 온도싸이클시험을 동일한 조건에서 진행하였다.

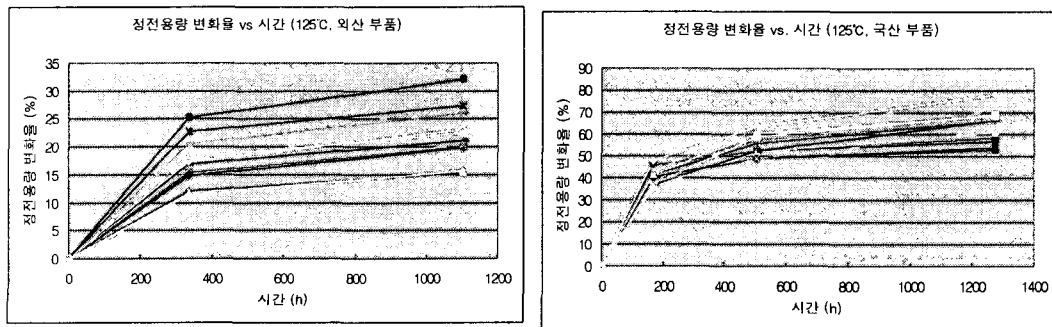
시험 결과 외산 고체 알루미늄 전해 커패시터에 있어서도 주된 고장모드가 정전용량의 감소였으며 시간에 따른 정전용량의 변화는 다음과 같은 경향을 나타내었다. 국산 부품과의 비교를 위하여 국산 부품의 정전용량 변화와 함께 나타내었다.



a. 외국 업체 부품

b. 국산 부품

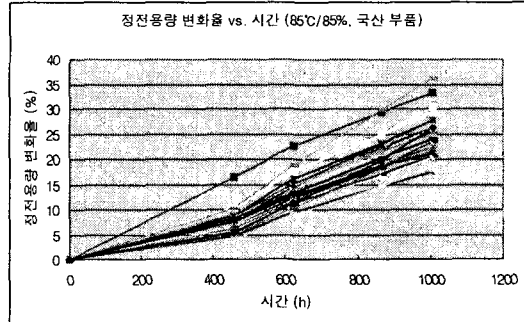
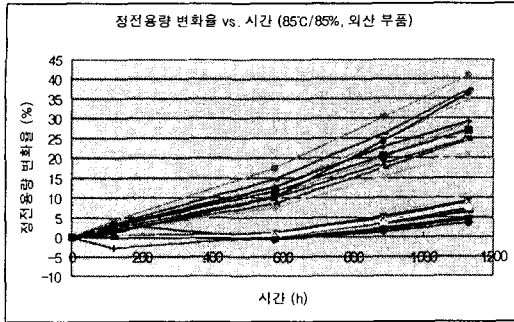
<그림 9> 시간에 따른 정전용량 변화 경향 (고온부하시험 105℃ 조건)



a. 외국 업체 부품

b. 국산 부품

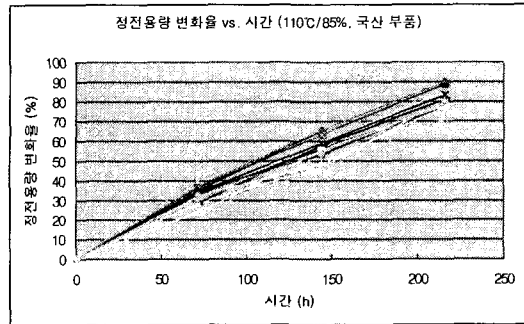
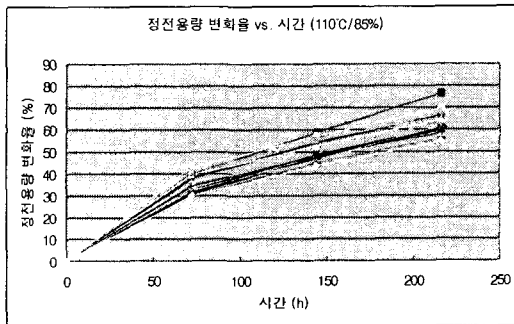
<그림 10> 시간에 따른 정전용량 변화 경향 (고온부하시험 125℃ 조건)



a. 외국 업체 부품

b. 국산 부품

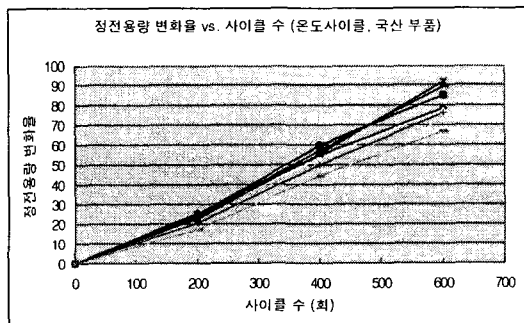
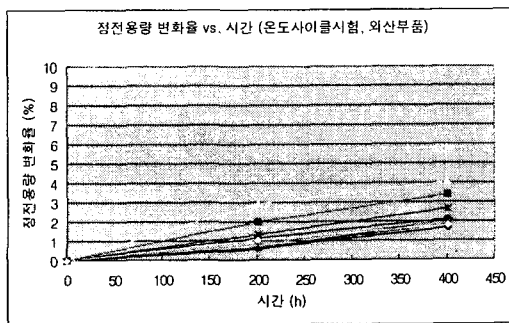
<그림 11> 시간에 따른 정전용량 변화 경향 (온습도시험 85°C/85% 조건)



a. 외국 업체 부품

b. 국산 부품

<그림 12> 시간에 따른 정전용량 변화 경향 (온습도시험 110°C/85% 조건)



a. 외국 업체 부품

b. 국산 부품

<그림 13> 시간에 따른 정전용량 변화 경향 (온도사이클시험)

위 그림과 같이 얻어진 정전용량 변화율 데이터로부터 알 수 있듯이 국산 부품의 경우 모

든 시험에 있어서 시간에 따른 정전용량의 감소가 외산 부품보다 매우 크게 나타났다. 외산 부품의 고장데이터를 분석한 결과 다음과 같은 고장률 및 수명분포가 추정되었다. 국산 부품과 비교하기 위하여 국산 부품에서 추정된 고장률 및 수명분포를 함께 나타내었다.

<표 12> 외국 업체 부품과 국산 부품의 신뢰성 비교

시험의 종류	외국 업체 부품	국산 부품
고온부하시험 105℃	고장률 (지수분포 적용)	고장률 (지수분포 적용)
	10%/1000h@105℃	62%/1000h @ 105℃
온습도시험 85℃/85%	수명분포 (와이블분포 적용)	수명분포 (와이블분포 적용)
	$F(t)=1-\exp[-(t/1190.50)^{3.50}]$	$F(t)=1-\exp[-(t/915.14)^{7.85}]$
온도사이클시험	수명분포 (와이블분포 적용)	수명분포 (와이블분포 적용)
	- *	$F(t)=1-\exp[-(t/161.83)^{3.72}]$

* 고장이 발생하지 않음

이로부터 105℃ 조건에서는 평균수명을 기준으로 외산 부품이 국산 부품에 비하여 약 6배 긴 수명을 가짐을 알 수 있고, 85℃/85% 조건에서는 B10 수명을 기준으로 국산 부품의 경우 686.95h이고, 외산 부품의 경우 673.33h으로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 온도사이클 시험에서는 외산 부품이 고장이 발생하지 않아서 정량적으로 수명을 비교하기는 어려우나 열화 경향을 볼 때 국산 부품의 경우 정전용량의 감소가 상대적으로 매우 큼을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 주파수 특성이 좋아서 디지털 기기의 수요 증가에 따라서 함께 수요가 증가되고 있는 국산 고체 알루미늄 전해 커패시터에 대하여 여러 가지 스트레스를 적용한 다양한 시험을 통하여 고장모드 및 메카니즘을 파악하고, 파악된 고장메카니즘을 가속하여 시험시간을 단축할 수 있는 가속시험방법을 개발하였다. 또한, 국외의 선진 제조업체에서 생산한 고체 알루미늄 전해 커패시터에 대하여 동일한 시험을 하여 국산 부품과 특성 및 신뢰성을 비교하였다.

국산 고체 알루미늄 전해 커패시터의 고장모드 및 고장메카니즘을 파악하기 위하여 고온부하시험, 온습도시험, 온도사이클시험한 결과 주된 고장모드는 정전용량 감소인 것으로 밝혀졌고, 시간에 따른 정전용량의 감소는 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 일정한 경향을 갖는 정전용량의 열화데이터를 분석하여 다음과 같은 열화모델을 산출하였다.

(1) 온도 스트레스를 인가한 경우

105℃ 조건의 경우: $L = (720.539 \times t)^{0.224}$, 125℃ 조건의 경우: $L = (102,744 \times t)^{0.224}$

(2) 온습도 스트레스를 인가한 경우

85℃/85% 조건의 경우: $L = (0.019 \times t)^{1.056}$, 110℃/85% 조건의 경우: $L = (0.329 \times t)^{1.056}$

시험시간을 단축할 수 있는 가속시험방법을 개발하기 위하여 시험에 장시간이 소요되는 고온부하시험과 온습도시험에 대하여 각각 기존의 시험조건과 더 가혹한 조건의 두 조건에서 시험하였는데, 시험 결과 고온부하시험의 경우 105℃와 125℃사이의 가속계수가 143, 85℃/85%와 110℃/85%사이의 가속계수가 17인 것으로 분석되었다. 그러므로 105℃에서의 1000시간 시험은 125℃에서 7시간만 실시하면 동일한 시험 효과를 낼 수 있고, 85℃/85%에서의 1000시간 시험은 110℃/85%에서 59시간만 실시하면 동일한 시험 효과를 낼 수 있게 된다. 국외의 선진 제조업체에서 생산한 부품과 비교하기 위하여 세계에서 가장 점유율이 높은 일본의 고체 알루미늄 전해 커패시터 제조업체의 부품을 시험하였는데, 시험 결과 얻어진 데이터를 국산부품과 비교한 결과 온습도시험의 경우 시간에 따른 특성의 변화에 있어서 큰 차이가 없었으나 고온부하시험과 온도사이클시험의 경우에는 신뢰성이 크게 차이나는 것으로 밝혀졌다. 고온부하시험의 경우 105℃를 기준할 때 국산 부품의 경우 고장률이 62%/1000h으로 외산 부품 10%/1000h에 비하여 약 6배 정도 높은 것으로 나타났고, 온도사이클시험의 경우 대상 부품의 허용 사용온도 범위인 -50℃에서 105℃의 범위에서 온도를 400사이클동안 변화시킨 결과 외산 부품은 10개 중 한 개도 고장이 발생하지 않았으나 국산 부품의 경우에는 200사이클 내에 10개 중 8개의 고장이 발생하였다. 이로부터 국산 부품이 외산 부품에 비하여 고온 및 온도 변화에 대한 내성이 약함을 알 수 있었다. 향후 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 고온 및 온도변화에 노출되었을 때의 특성 안정성을 향상시키는 방안에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Meeker, W.Q. and Hahn, G.J.(1985), *How to plan an accelerated life test - Some Practical Guideline*, ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Volume. 10.
- [2] 塩見弘 외 (1985), 信頼性試験-總論・部品, 日科技連.