

알루미늄 전해 커패시터의 신뢰성 향상을 위한 Derating 설계 연구

민대준[†] · 김재중^{*} · 손영갑^{**} · 장석원^{**} · 곽계달^{***}

Derating design approach of aluminum electrolytic capacitor for reliability improvement

Dae-June Min, Jae-Jung Kim, Young-Kap Son,
Seog-Weon Chang and Kae-Dal Kwack

Key Words : Derating design(부하경감 설계), Accelerated degradation Test(가속열화시험), B₁₀ life (B₁₀수명), Dry up(드라이업), Sensitivity Analysis(민감도 분석)

Abstract

This paper presents a derating design approach for reliability improvement of an aluminum electrolytic capacitor. The capacitor, usually mounted in a printed circuit board, is used to stabilize the circuit. The main failure mechanism of interest is dry-up of the electrolyte that is mainly caused by two stresses-temperature and voltage. The lifetime under these stresses is modeled as a function of these stresses and time using accelerated life testing. Quantitative variation in the lifetime, according to variations in these stresses, is investigated to perform the derating design of the capacitor so that the stress levels are selected to achieve required reliability measures for reliability improvement. Moreover, sensitivity analysis shows which stress would be a more important factor determining the lifetime.

기호설명

℃: Temperature (섭씨온도)
V: Voltage (전압)
 η : Theta (와이블 척도모수)
 β : Beta (와이블 형상모수)
h: Failure rate (고장률)

1. 서 론

신뢰성(Reliability)는 복잡한 여러 요소가 서로 팀처럼 묶여 있어, 높은 신뢰성을 갖는다는 것은 이루어 내기 힘든 과제이다.⁽¹⁾ 이러한 신뢰성을 고려하여 설계할 때, 부하경감설계(Derating Design)는

제품의 신뢰성을 높이기 위해 부품에 걸리는 최대 스트레스 (온도, 전압, 전류)가 부품의 전격보다 낮도록 설계하여 수명을 연장시키는 기술이라 할 수 있다. 여기서 부하경감이란, 한 부품이 고장시간을 줄이기 위해 작동 한계 내에서 작동할 때, 부품에 걸리는 스트레스를 줄여 작동시키는 것을 뜻하는데, 이는 고장률을 줄이는데 실질적인 의미를 가지고 있다. 개념적으로 어떤 부품이 높은 온도와 높은 전압에서 작동한다고 가정할 때, 이 두 조건을 동시에 적용한다면, 온도나 전압 한 가지 조건을 적용하는 것보다 좋지 못하다는 것을 알 수 있다. 만약 부품이 전압한계가 최대전압의 130%까지라고 할 때, 이보다 낮은 전압으로 작동시킨다면 당연히 피로를 덜 주게 될 것이다. 결국 수명을 연장시킬 것이다. 또한 일반작용을 말할 때, 높은 온도에서 그 진행속도가 빠르다는 것을 알고 있다(Arrhenius). 열화(Degradation)를 줄이기 위해서, 다시 말해 수명을 연장하기 위해서는 작동 온도한계점보다 낮은 온도에서 부품을 구동시키는 것이 낫다고 할 수 있다. 본 연구에서는 전자회로에서 가장 기본적으로 많이 사용되는 알

[†] 민대준, 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

E-mail: daejunny@naver.com
TEL: 011-9940-2830

^{*} 대우 일렉트로닉스 품질신뢰성연구소

^{**} 한양대학교 신뢰성분석연구센터(RARC)

^{***} 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

루미늄 전해 커패시터 (이하 Al. 전해 커패시터로 칭함)를 가속열화시험을 통해 고장분석을 하여 스트레스와 B10 수명을 기준으로 한 고장률의 관계를 알아보려 한다. 정량적, 수치적 계산을 통해 두 관계를 제시함으로써, 이 결과를 통해 부하경감(Derating) 설계를 통한 신뢰성 향상을 제시하고자 한다.

2. 부하경감설계(Derating Design)

2.1 부하경감(Derating)의 정의

부하경감이란, 부품에 작용하는 스트레스를 줄이거나, 스트레스에 따른 부품이 동작할 수 있는 정격한계를 높게 하는 것을 말한다. 부하경감의 방법은 부품의 종류, 동작환경, 부품의 응용에 따른 한계레벨에 의존한다. 부하경감의 3 가지 단계로 구성되어 있다. 첫째, 부품의 한계레벨이 결정되어야 한다. 이것은 예상치 못하는 환경 조건, 응용 그리고 기능이 결정되어야 한다. 둘째, 특정 실제 부품에 가해지는 스트레스에 대한 정보가 계산되어야 한다(ex. 온도, 전압). 마지막으로 실제적인 부품의 수치와 부하경감의 조건에 대해서 확인되어야 한다.⁽⁶⁾

2.2 부하경감(Derating)의 개념

부품에 대한 신뢰성을 강화하기 위해 주어진 규격이나 능력 내에서 부품에 인가되는 부하의 수준을 제한하는 것이 부하경감(Derating)이다. 이것은 주로 전자부품에서 많이 응용되며, 모든 부품의 부하경감은 절대적인 최대치에 의해 행해진다. 전압, 전류, 전력 등은 전형적인 부하경감의 인자이다. 예를 들면, 정격 동작온도가 70 도라면 이의 50% 감소된 환경에서 동작을 시킨다면, 제품의 수명시간을 연장시킬 수 있을 것이다. 특히 열(Temperature)이라는 스트레스 인자는 전기전자 부품만 아니라 기계 및 재료에서도 고장을 발생시키는 중요한 인자이다. 이러한 인자들과 수명의 관계를 알아내어 전자부품에 가해지는 스트레스 인자들을 제어함으로써 수명을 증대하는 것이 부하경감설계(Derating Design)이다.

2.3 부하경감(Derating)의 예

전자부품의 설계 시 부하경감(Derating)을 고려하여 설계하여 설계한 예를 보면, 실제로 기계적인 혹은 전기적인 스트레스를 줄임으로써 수명을 크게 늘릴 수 있다는 것을 알 수 있다. DC-DC 컨버터를 설계할 때 부하경감설계(Derating Design)이 적용된다. 여러 가지 스트레스 요소 중 열이 가장

Table 1 Examples of Derating

Component	Maximum Specification		50% Derated		Ratio
	Operating condition	Failure rate/time	Operating condition	Failure rate/time	
Transistor	Power	2u	50% power	0.55u	3.6:1
Carbon Resistor	Power	0.06u	50% power	0.01u	6:1
Transformer	Ambient 110 °C	11u	Ambient 60 °C	0.5u	22:1
Motor Bearings	100,000rpm	32u	5,000rpm	8u	4:1

큰 영향을 미친다. 부품에 전달되는 전기적 스트레스로 인한 부품의 온도 상승은 수명에 영향을 준다. 전형적인 부하경감설계(Derating Design)는 이러한 전기적인 스트레스 동시에 열을 감소시키며, 정확한 최적의 부하경감레벨(Derating level)을 찾아 적용 시키는 것이다. 여기서 말하는 최적의 부하경감레벨이란, 부품의 고장률을 가장 최소화하는 레벨을 말한다. 예를 들면, 세라믹 커패시터(Ceramic Capacitor)는 최대정격의 60%의 전압과 동작최대온도에서 10°C 감소된 온도($T_d = T_{max} - 10^\circ C$)로 동작환경을 조정한다면, 고장률을 낮출 수 있는 좋은 부하경감(Derating)이라고 할 수 있다.⁽²⁾

Table 1 은 각 부품 (Transistor, Carbon resistor, Transformer, Motor Bearings)을 예로 하여 부하경감을 하였을 경우의 각각 고장 감소율을 나타내고 있다. 트랜스포머(Transformer)의 경우, 작동조건온도를 주위온도(Ambient temperature)110 도에서 사용했을 경우와 부하경감이 적용된 사용환경, 즉 주위온도 60°C와 비교했을 경우, 부하경감을 고려한 사용 환경의 트랜스포머의 고장률이 약 22 배로 감소했음을 알 수 있다.⁽⁴⁾

3. 알루미늄 전해 커패시터의 고장분석

3.1 Al. 전해 커패시터의 고장모드 및 메커니즘

본문에서는 실제로 많은 전자제품에 사용되는 가장 기본적인 부품인 Al. 전해 커패시터를 시료로 하여 부하경감을 제시하고자 한다. Al. 전해 커패시터는 피막복귀 성능이 우수한 전해액을 이용하고 있다. 따라서 피막의 결점부에 대해서 신속하게 피막을 생성하기 때문에 쇼트 또는 파손이란 파국적인 고장에 이르는 것은 드물다.⁽⁵⁾ 시간이 지남에 따라 전해액이 서서히 밀봉 고무에서 투과되면서 특성불량이 나타나게 되는데 이러한 불량은 정전용량이 점차 감소하는 열화적 고장이 대부분이다.

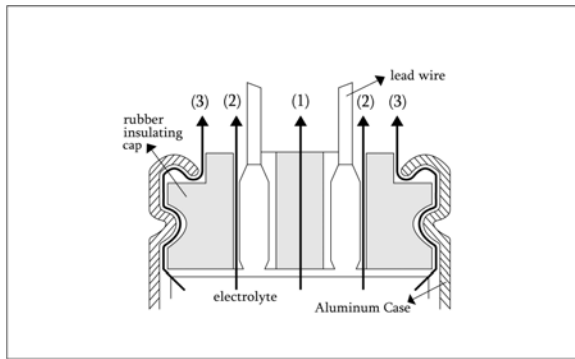


Fig. 1 Permeation path of an electrolyte

Al 전해 커패시터의 고장 메커니즘, 즉 열화에 의한 정전용량의 감소는 전해액의 증발이 가장 큰 요인이다. Al 전해 커패시터의 양 극이 알루미늄 판과 전해액에 의한 산화피막이 되므로 단면적은 알루미늄 판에 전해액이 얼마나 확산되는가에 의해 결정된다. 결국 전해액의 양이 적을수록 확산되는 면적은 작아지고, 이것은 정전용량의 감소로 나타나게 된다. 정전용량의 감소, 즉 전해액의 Dry up 이 주 고장 메커니즘이라 할 수 있으며, 확산 메커니즘은 Fig.1 에 나타내었다. (1)의 경우 밀봉 고무체 속으로의 투과이며, (2)는 밀봉고무와 리드 선 틈새에서의 누설, (3)의 경우는 밀봉고무와 알루미늄 케이스 틈새에서의 누설로서 확산 메커니즘을 설명하고 있다. Al 전해 커패시터의 고장분석 결과, 주요고장모드는 정전용량의 감소, 그 주된 메커니즘은 전해액의 Dry up 이다.⁽⁵⁾

4. 가속열화시험.

Al 전해 커패시터의 주 고장 메커니즘을 전해액의 dry up 으로 가정하여, Al 전해 커패시터의 성능 열화 고장에 대한 수명과 스트레스의 관계를 알아내기 위하여 가속열화시험을 수행하였다. 전해액의 dry up 정도를 살펴 보면서 커패시터의 무게와 성능을 분석함으로써 결론을 도출할 것이다.

4.1 시료선정 및 고장판정기준

시험시료는 전압, 정전용량, 사용온도가 각각 25V, 2200uF, 85°C인 Al 전해 커패시터이며, 고장판정기준은 초기치 대비 정전용량 20% 감소를 고장으로 판정하였다. 시료의 전기적 특성과 고장판정기준을 Table 2 에 나타내었다.⁽³⁾

4.2 가속인자 및 수준의 결정

가속열화시험에서는 재료의 물성이 변하지 않고, 고장모드와 메커니즘이 사용조건과 동일하도록 최대의 스트레스 수준을 주는 것이 중요하다.

Table 2 Electrical Specification & Criterion

Parameter	Range	Criterion
Capacitance	$-10\% \leq C \leq 10\%$	$-20\% \leq C \leq 20\%$
Dielectric loss rate	$\text{Tan } \delta \leq 10\%$	$\text{Tan } \delta \leq 5\%$
Insulation resistance	Over 10,000M Ω	Over 2,000M Ω
Dielectric strength	No Flashover and Insulation Breakdown	

Table 3 Test Matrix

Run & Factor	Temp (°C)	Voltage (DCV)	No. of Sample
1	100	25	30
2	120	25	30
3	120	25	30
4	100	25	30

Table 4 Conformance result of life distribution

Life Distribution	Weibull	Exponential	Lognormal
Likelihood function	-525.94415	-708.51331	-539.67071

온도 및 전압의 최대 스트레스 수준을 결정하기 위하여 최고사용온도보다 높은 온도에서 전압을 인가하여 Al 전해 커패시터의 성능열화시험을 수행하였다. 전압은 정격의 120%, 온도는 120°C로 결정하였고, 낮은 수준의 스트레스 수준은 기술적 판단에 따라 정격전압, 온도는 100°C로 결정하였다. 가속열화시험조건은 Table 2 와 같이 선정하였으며, 30 초 간격으로 충,방전 시험을 병행하였다.

4.3 시험장치 및 시험방법

Al 전해 커패시터의 가속열화시험을 수행하기 위한 시험은 DC Power Supply, Timer, Load Resister, 실험 Jig, 항온조로 하며, Timer 에서 전압의 충,방전을 조절하며, 전원 On 후 30 초 동안 공급되는 DC 25V(또는 30V) 전압에 의해서 Capacitor 에 전하를 충전하게 된다. 전원 On 후 30 초 동안 커패시터에 충전되어 있던 전하는 Load Resister 로 흘러 들어가 방전되게 되고 이러한 과정을 반복하게 된다. 시험방법을 Table 4 에 표현하였다. 시험에서는 각 측정시간에서 측정 특성인 정전용량과 손실률, 무게를 측정하였고, 고장판정이 난 시료는 제거하여 따로 보관한다.

4.4 가속열화시험 모델

Al 전해 커패시터의 수명과 2 개의 가속 변수인 온도와 전압에 대하여 온도-전압 모델을 적용하였다. 온도가 Al 전해 커패시터 수명에 미치는

가속시험 모형은 알려진 것이 없지만 온도가 증가하면 수명이 감소한다는 사실이 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 AI. 전해 커패시터의 수명분포를 온도-전압로 가정하고, 척도모수(η), 온도(T), 전압(V) 사이의 관계식을 아래의 식 (1)과 같은 온도-전압 모델로 가정하였다.

$$\eta(T, V) = \frac{C}{V^n \cdot e^{(-B/T)}} \quad (1)$$

4.4.1 와이블형상모수와 수명-스트레스 관계식

와이블 분포와 식(1)의 수명 스트레스 관계식을 가정하고, 소프트웨어 ALTA 를 이용하여 가속열화 시험 데이터를 분석한 결과는 다음과 같다.

$$\beta = 8.0802, B = 5413.3677, C = 0.5603, n = 2.5981$$

따라서 AI. 전해 커패시터 성능열화에 의한 수명-스트레스관계식과 고장률-스트레스 관계식은 각각 식(2) 와 식 (3)과 같이 추정될 수 있다.

$$\eta(T, V) = \frac{0.5603}{V^{2.5981} \cdot e^{(-5413.3677/T)}} \quad (2)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$B_{10} = \eta \cdot [-\ln(1 - p)]^{1/\beta} \quad (4)$$

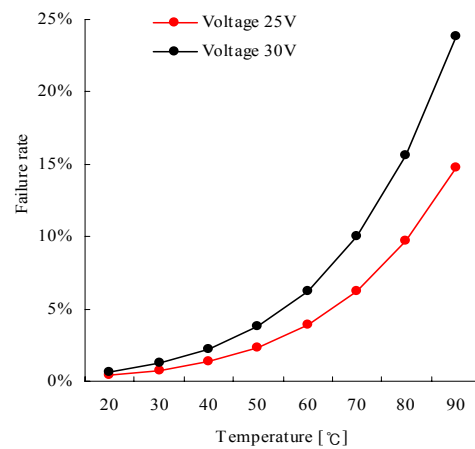
또한 이를 통하여 스트레스와 따른 와이블 분포에서의 식(3) 고장률 함수 $h(t)$ 로 변환하여 식(4)로 나타낼 수 있다. 여기서 t 는 B_{10} 수명을 기준으로 구하였다. B_{10} 수명식은 식(4)로 표기된다. B_{10} 의 경우 p 값이 0.1 일 경우를 말한다.

4.4.2 시험 결과의 해석

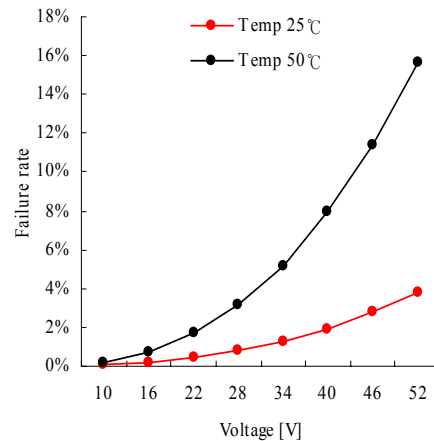
온도, 전압에 대한 수명-스트레스 관계식과 고장률에 대한 식을 각각 식 (2)과 식 (3)으로 나타내었다. AI. 전해 커패시터의 가속열화시험 결과, 고장모드는 정전용량의 감소 즉, 열화고장으로 확인되었다. 또한, 고장모드에 대한 메커니즘은 온도 상승에 의한 전해액의 Dry Up 이라는 것을 알 수 있었다. 수명-스트레스 및 가속계수에 대한 결과로는 AI. 전해 커패시터는 온도와 전압이 상승할수록 고장발생 시간이 단축됨을 알 수 있다. 이는 상온에서 고온으로 이르는 구간, 그리고 낮은 전압에서 높은 전압으로 이르는 구간에서 고장메커니즘이 변하지 않는 범위 내에서 적용될 수 있다. 수명-스트레스 및 가속계수에 대한 관계식을 이용하여, 와이블 분포 관계식을 적용하여, B_{10} 수명 및 이에 대한 고장률을 구하였다.

4.5 스트레스에 따른 고장률과 B_{10} 수명

시험결과를 통해 각 온도와 전압 스트레스에 대한 고장률을 B_{10} 수명을 기준으로 수식적 관계식을 얻을 수 있었다. 여기서 B_{10} 수명은 누적 고장률이 10%인 시간을 말한다. 즉 100 개의 제품 중 10%의 제품, 10 개의 제품이 고장 날 때까지의 시간을 뜻한다. 고장 신뢰성보증 수준 및 고장의 치명도에 다른 수명값들을 사용할 수 있지만, 본문에서는 보통 산업계에서 사용되는 수준의 B_{10} 을 기준으로 고장시간으로 사용하여 고장률을 계산하였다.

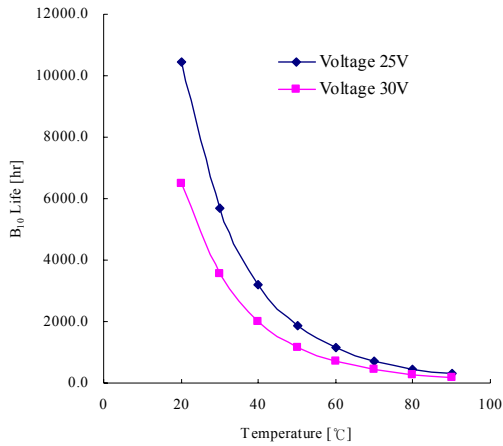


(a) Failure rate vs. Temperature

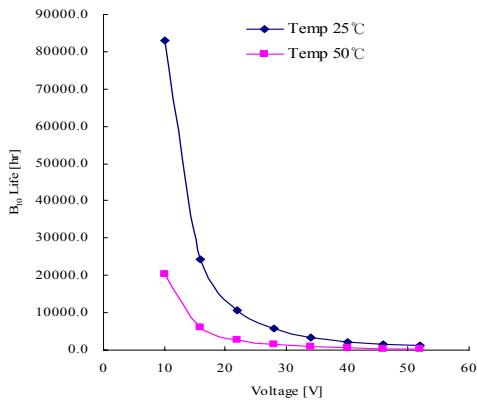


(b) Failure rate vs. Voltage

Fig. 2 Relationship between stresses and failure rate



(a) B₁₀ life vs. Temperature



(b) B₁₀ life vs. Voltage

Fig. 3 Relationship between stresses and B₁₀ life

먼저, 인가되는 전압은 25V, 50V로 일정한 전압을 유지한 상태라고 가정하여, 온도가 커패시터의 수명에 미치는 영향을 그래프 Fig. 2 (a)를 통해 나타내었다. 온도가 점점 상승하면서 지수 함수적으로 고장률은 증가하였다. 또한 25V를 인가하였을 때와 50V를 인가하였을 때의 두 경우를 비교하여 볼 때 후자의 고장률이 더욱더 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 온도의 증가를 고려해볼 때, 높은 전압보다는 50%의 낮은 전압을 인가해 줌으로써 고장률의 증가폭을 크게 낮출 수 있음을 제시해 준다. 또한 균일한 온도 25°C, 40°C라고 가정하고, 전압 상승이 미치는 수명에 대한 영향을 그래프 Fig. 2 (b)로 나타내었다. 전압이 점점 상승함에 따라서 커패시터의 고장률 역시 지수 함수적으로 증가하였다. 같은 전압이 인가된 경우에서, 고온인 50°C인 경우는 고장률이 25도인 환경에 비해 높았다. 전압이 34V를 인가하였을 경우 50°C의 50% 감소된 25°C의 환경에서 사용 시에는 B₁₀ 수명에 대한 고장률을 약 6% 감소시킬 수 있다고 추정한다. B₁₀ 수명 역시, Fig 3 (a)와 (b)를 볼 때, 온도 상승 과 전압 상승으로 인해 B₁₀ 수명 값

이 하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 결론적으로 온도와 전압으로 인한 두 스트레스가 고장률 상승, 곧 B₁₀ 수명을 단축 시킨다고 할 수 있다.

4.6 수명-스트레스 민감도 분석

위의 결과를 분석해 볼 때, 온도와 전압이 수명에 미치는 영향을 알아보았다. 하지만 두 가지 요소중 커패시터의 수명에 더 큰 영향을 미치는 것을 알아내기 위해 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 실시하였다. 민감도 분석은 두 스트레스를 두고, 어느 것을 조절하는 것이 더 수명에 대해서 큰 영향을 주는가에 대한 분석이다. 각 스트레스에 대한 B₁₀ 수명의 정규화된 민감도를 계산한 식은 식(5)과 같다. 두 스트레스 인자의 민감도를 계산하여 Fig 4에 나타내었다. 먼저 전압 변화에 따른 B₁₀ 수명의 민감도를 보면, 전압이 단계별로 6V씩 상승될 때, 그에 따른 수명의 변화율이 일정한 반면 온도가 변함에 따라 B₁₀ 수명은 다르게 변화하였다. 다시 말해, 일정 온도 상승 시에는, 이에 따른 수명 변화가 크게 일어난다는 의미이며, 곧 온도에 작은 변함을 줌으로써 전압 변화에 비해 수명을 크게 조절할 수 있다고 말할 수 있다. 이처럼 온도 스트레스 변화에 따른 수명 변화율이 크다면, 전압 변화에 따른 변화율보다 상대적으로 민감하다고 보고, 제품의 신뢰성을 고려하여 볼 때에, 온도를 조절하는 것이 효율적이라 판단된다.

$$S_{B_{10}}^{Voltage} = \left(\frac{\partial B_{10}}{\partial V} \right) \cdot \frac{V}{B_{10}} \quad (5)$$

$$S_{B_{10}}^{Temperature} = \left(\frac{\partial B_{10}}{\partial T} \right) \cdot \frac{T}{B_{10}}$$

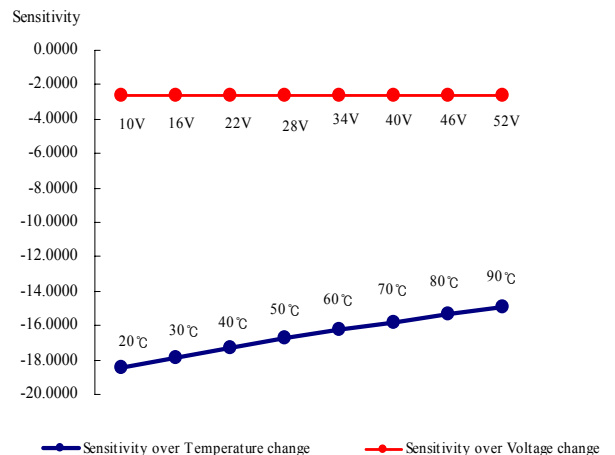


Fig.4 Sensitivity of two stresses

5. 결 론

본 연구에서는 여러 분야에 다양하게 이용되고 있는 Al. 전해 커패시터의 가속열화시험과 이를 고려한 부하경감설계에 대해 다루었다. 고장분석 결과 주요 고장 메커니즘은 전해액의 Dry Up 에 의한 정전 용량의 감소로 확인되었으며, 실 사용 조건을 반영하여 전압, 온도를 동시에 고려한 가속열화시험을 설계하고 실시하였다. 와이블 분포와 일반화된 선형모형을 가정하고 데이터를 분석하여 수명-스트레스 관계식을 추정하였고, 이를 이용하여 B_{10} 수명에 대한 고장률을 구하였다. 온도상승과 전압상승이 제품의 수명에 미치는 영향을 알 수 있었고, 이에 대한 관계 그래프를 제시함으로써 설계자는 알루미늄 커패시터의 설계 시 이 데이터를 고려하여 부품의 수명증대를 고려한 derating 설계를 할 수 있다. 또한 민감도 분석을 통하여 온도변화에 따른 스트레스가 수명 변화에 상대적으로 더 영향이 있다는 것을 알아내었다.

후 기

본 연구는 과학 기술부 특정연구과제 “전자부품 신뢰성 설계기술 개발사업”(2004-04396)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Xijin Tian PH.D., Hewlett-Packard Company, 2005, “Design-for-reliability and Implementation on Power Converters”
- (2) Bruce Edson, Hewlett-Packard, Roseville Cijin Tian, Hewlett-Packard, Fort Collins, 2004, “A prediction Based Design-for-reliability Tool”
- (3) Kim, D. G., Park, J. W., 1996, “Accelerated Test for Multilayer Ceramic Chip Capacitors” *The Sixth Reliability Maintenance Symposium*, pp.33~39
- (4) 산업자원부 기술표준원, 2003, “신뢰성용어 해설서” pp130
- (5) Kim, H. J., Cheon, H. S., Kim, S. D., Park, Y. T., Jin, H. G. and Park, C. W., 1995 Dec., “An Experimental Study on Accelerated Life Testing for Aluminum Electrolytic Capacitors,” *The Korean Society for Quality Management*, Vol. 23, No. 4, pp. 128~147.
- (6) Michael pecht, Richard Cogan, Mechanical Engineering Department University of Maryland College park, 1989, “Intelligent derating for reliabili