

레귤레이터 IC의 부하경감 설계

김재중 · 장석원

대우일렉 품질신뢰성연구소, 한양대학교 신뢰성분석연구센터

Derating Design Approach for a Regulator IC

Jae-Jung Kim · Seog-Weon Chang

Daewoo Electronics Quality & Reliability Center, HANYANG Univ. Reliability Analysis Research Center

Abstract

This paper presents a derating design approach for reliability improvement of a regulator IC. The IC is usually used in SMPS. The main failure mechanism of interest is voltage drop due to the package delamination mainly caused by two stresses, i.e. temperature and current. The lifetime under stresses is modeled as a function of stresses and time using accelerating life testings. Quantitative and qualitative variation in lifetime according to stress variations are investigated using the modeled lifetime. Stress levels would be determined to achieve required reliability levels in the aspect of derating design for reliability.

Key Words : Regulator IC(레귤레이터 IC), Heat Dissipation(발열량), Failure Analysis(고장분석), Crack(크랙), Delamination(박리), Derating(부하경감), MTTF(평균수명)

1. 서론

부하경감은 부품의 고장률을 줄여서 신뢰성을 향상시키고자, 사용 환경 또는 동작 중에 인가된 스트레스를 정격보다 낮게 인가하는 방법으로 정의된다. 부하경감의 목적은 사용 환경 및 부품의 동작특성의 근본적인 분산에 대하여 제품을 보호하고자 하는 것이다.⁽¹⁾ 부품의 동작특성 즉, 각 부품은 같은 제조라인에서 생산되었을 지라도 동작특성은 다를 수 있다. 부품이 노후 될수록 사용 환경(특히 온도)은 부품의 물리적, 재료적 변화를 줄 수 있다. 이러한 변화는 부품의 종류나 사용된 재료에 따라 달라지지만, 최종적으로는 항상 특성 열화를 가지고 온다. 이러한 열화는 부품이 설계된 동작 조건 이상에서 사용되거나, 또는 오랜 시간동안 가혹한 조건에서 사용이 되는 경우 더욱 가속될 수 있다. 부하경감은 이미 설명한 바 있는 분산에 대하여 제품 고장을 방지하고자 하는 것이다. 특히 동작특성에서의 작은 변화가 고장률을 크게 증가시키는 것을 방지하기 위한 것이다. 요구되는 부하경감의 수준(40%, 50%, 60%등)은 설계자가 동작특성에서의 분산을 얼마나 잘 예측했는가에 따라 달라진다. 이러한 분산은 부품이 조립되기 전의 제조공정상의 분산과 보다 중요한 사용 중의 사용 환경의 분산 등이다. 두 가지 분산의 원인은 알기 어렵고, 대부분의 경우 설계당시 정확하게 정량화하는 것이 불가능하다. 따라서 공학적인 판단 및 과거 경험을 통하여 주로 그 효과를 예측하고 부하경감수준을 결정한다.⁽²⁾

반도체 부품의 경우 고장은 크게 열에 의한 고장과 전기에 의한 고장 두 가지로 나눌 수 있다. 반도체 부품의 경우 열적 원인에 의한 고장발생률은 전체의 55% 정도를 차지하는 것으로 연구되었으나⁽³⁾, 이에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 반도체 부품 중 전원회로의 주요 안정화 부품인 레귤레이터 IC(Regulator IC)의 부하경감설계를 수행한다. 부하경감설계를 위해 레귤레이터 IC의 고장 모드/메카니즘 분석, 가속수명 시험⁽⁴⁾을 통해 수명-스트레스식을 추정한다.

2. 레귤레이터 IC의 고장분석

2.1 레귤레이터 IC의 특징

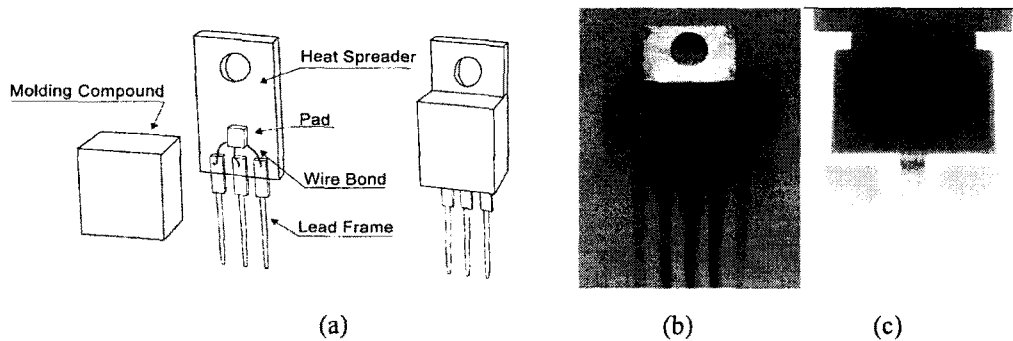
본 연구에서 선정된 레귤레이터 IC의 전체적인 형상 및 내부구조를 Figure 1. (a), (b), (c)에서 나타내었다. 그림에서 레귤레이터 IC는 패드(Pad), 리드프레임(Lead Frame), 와이어 본드(Wire Bond), 몰딩 콤파운드(Molding Compound), 히트 스프레드(Heat Spreader)로 구성된다. 패드는 전기적 신호를 단순히 처리하며 그 신호는 리드프레임을 통해 전달된다. 이 패드와 리드프레임을 연결하는 것이 와이어 본드이고 에폭시(epoxy)로 제작된 몰딩 콤파운드에 의해 이 세 가지가 보호된다.

레귤레이터 IC가 발열할 경우 패드에 많은 열이 가해지고 이를 효과적으로 방열하기 위해서 알루미늄 소재의 히트 스프레드가 뒷면에 부착되어 있다. 또한 히트 스프레드에는 필요시 히

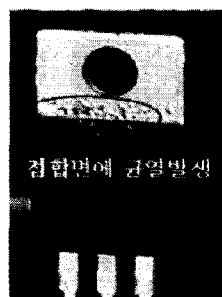
트 싱크(Heat sink) 등을 추가로 부착시키는 경우에 사용하는 볼트 체결구멍이 존재한다. 대부분의 레귤레이터 IC의 경우 히트 스프레더에 히트 싱크를 부착하여 사용하는 것이 일반적이다.⁽⁴⁾ 통상적으로 히트 싱크를 부착하지 않았을 경우의 소비전력은 2W정도이며, 히트 싱크를 부착했을 경우 20.8W정도로서 소비전력에 큰 차이를 보이고 있다.

2.2 레귤레이터 IC의 고장 모드/메카니즘

실제 레귤레이터 IC의 전기적 특성시험 도중 레귤레이터 IC의 몰딩 콤파운드와 알루미늄 히트스프레드 사이의 접합부에서 박리(delamination)가 발생한 사진을 Figure 2.에 나타내었다. 그림에서와 같은 박리현상 발생은 레귤레이터 IC를 구성하고 있는 이종물질간의 열팽창률(CTE : Coefficient of Thermal Expansion) 차이에 인하여 발생하는 것으로 판단되며, 와이어 본드, 리드프레임 및 방열판 등 큰 연성을 가지는 재료보다는 비교적 열팽창률이 작은 비금속 재료인 몰딩 콤파운드에서의 미소균열 및 크랙(Crack) 등이 발생할 수 있다.



<Figure 1> Structure of Regulator IC : (a) Schematic diagram of composition, (b) Photo view, (c) X-ray Radiography



<Figure 2> Delamination between a molding compound and a heat spreader

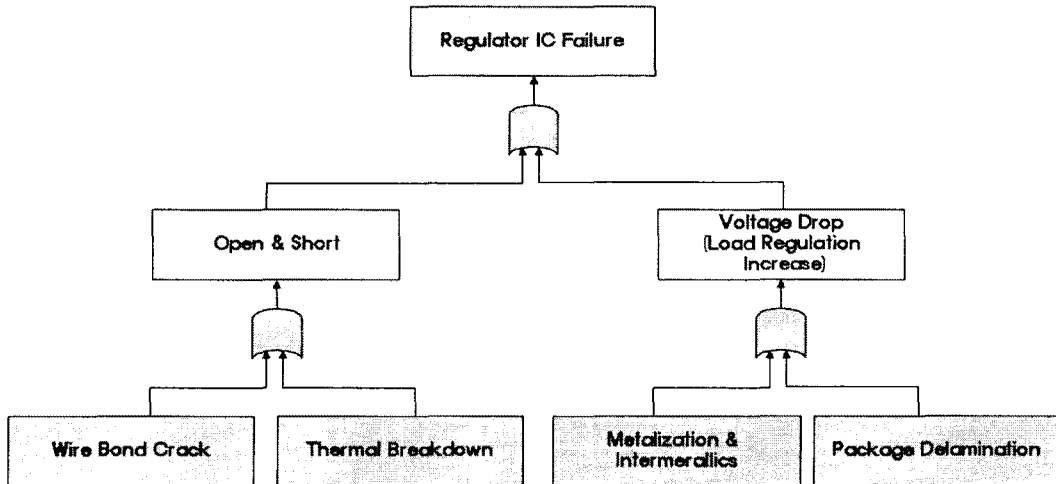
과도한 열이 발생하게 되면 재질의 열화를 가져 올 뿐 아니라 반도체 내부 패드와 몰딩콤파운드 계면들의 박리(Package Delamination)를 유발할 수도 있다. 이 계면으로 침투한 습기는 열에 의하여 증기화 되고 이때의 압력과 응력이 복합적으로 작용하여 몰딩 콤파운드의 균열 등으로 발전하게 된다. 이러한 이유로 반도체 부품의 오작동이나 작동불능이 발생하는 것이다. 아울러, 장시간 각종 스트레스(stress)를 받아 레귤레이터 IC 내부에 금속간 화합물이

형성(Metalization & Intermetallics)되어 정상적인 동작을 방해하는 경우도 고려해 볼 수 있다. 따라서 상기 세 가지 경우의 고장 메커니즘을 적용시킬 수 있다. 그러므로 레귤레이터 IC에서의 고장 모드는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 회로에서 전류가 차단되어 더 이상 출력전압을 낼 수 없는 Open & Short 상태와 출력전압이 원래의 값인 기준 출력보다 상당히 떨어진 전압을 출력하는 Voltage Drop으로 나눌 수 있다. 그러므로 고장 모드/메커니즘을 바탕으로 FTA(Fault Tree Analysis)를 나타내면 Figure 3.과 같다.

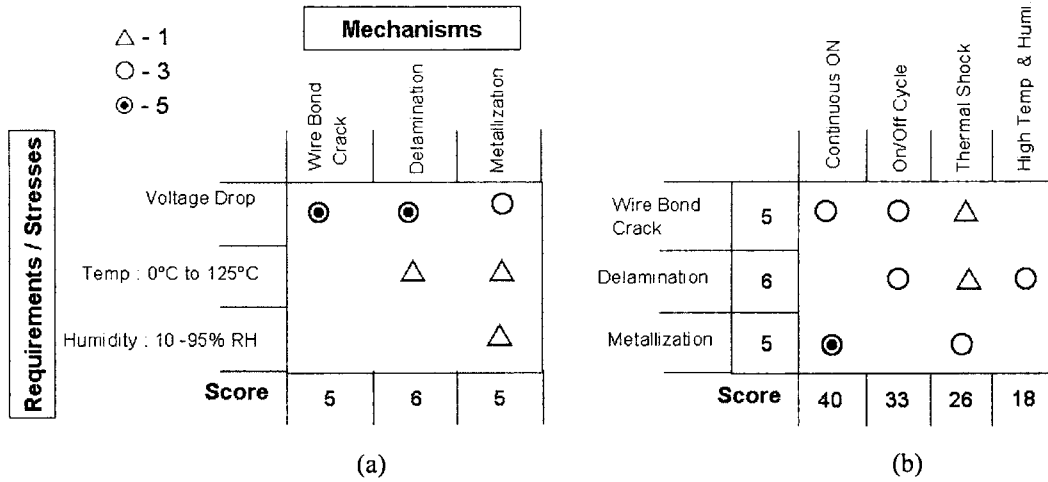
3. 가속수명시험

3.1 2단계 품질기능전개

FTA를 이용하여 2단계 품질기능전개(2-Stage Quality Function Deployment, QFD)를 Figure 4.에 나타내었다. 그림 4의 (a)에서는 요구환경 및 조건과 고장 메커니즘의 관계를 분석하였고, (b)에서는 고장모드 및 메커니즘과 시험방법과의 관계에 대하여 분석하였다. 그리고 각 항목에 대한 점수를 계산하여 효과적인 가속수명시험 방법을 결정하였다. QFD의 분석결과와 같이 고온에서 연속동작에 의한 가속수명시험이 가장 적합하다고 판단하였다.



<Figure 3> FTA of regulator IC



<Figure 4> QFD : (a) Matrix 1 - Mode / Mechanism, (b) Matrix 2 - Test Method

3.2 시료선정 및 고장판정기준

가속수명시험에 사용된 시료(KIA7805)는 일반적으로 7V ~ 20V사이의 입력전압(Vi)에 대하여 균일한 5V의 출력전압(Vo)을 얻을 수 있도록 설계되었으며, 이때 부품의 동작을 위해서는 최소 4.2mA의 대기전류(Iq)가 필요하며 일반적인 동작조건에서의 동작허용전류(Io)는 5.0mA ~ 1A이다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

이와 같은 시료의 전기적 특성 하에서 시료의 고장판정기준은 출력전압 또는 대기전류에 대한 고장판단 조건 중 한 가지 이상을 만족시키는 경우이며, 이를 Table 1에 나타내었다. 이는 시료의 출력전압의 경우 4.8V보다 작거나 5.2V보다 큰 경우 또는 대기전류가 4.2mA보다 작은 경우이다. 대기전류는 시료인 레귤레이터 IC가 동작하기 위한 최소한의 전류를 의미하며 4.2mA 이하의 전류를 소비하는 것은 시료에 고장이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

<Table 1> Specifications and criterions

Item	Range	Criterion
Input Voltage	$7V \leq V_i \leq 20V$	
Output Voltage	$V_o = 5V$	$V_o < 4.8V$ or $V_o > 5.2V$
Operating Current	$5.0 \text{ mA} \leq I_o \leq 1.0 \text{ A}$	
Quiescent Current	$I_q = 4.2mA$	$I_q < 4.2mA$

3.3 가속인자 및 수준의 결정

가속수명시험을 위한 온도 및 전류의 세부조건을 Table 2에 나타내었다. 표에서 온도는 125°C, 140°C로 전류는 0.5A, 1A로 선정하였으며, 최고온도는 레귤레이터 IC가 TOP(Thermal Overload Protection)가 발생되지 않는 온도에서 선정하였다. 일반적으로 레

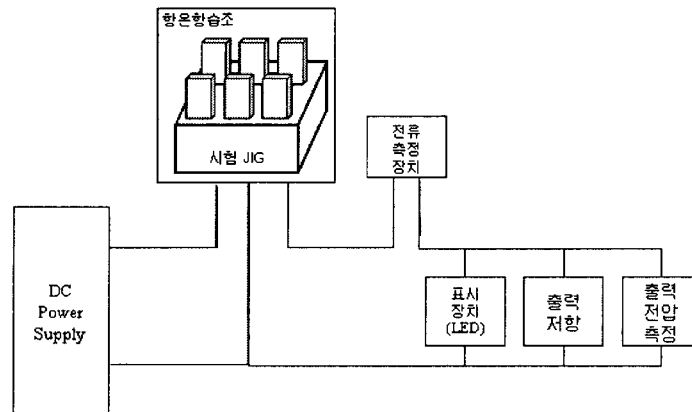
레귤레이터 IC는 150°C를 넘어서면 내부적으로 보호회로를 동작시켜 소자를 보호하게 되는데 이를 TOP라고 한다. TOP가 동작하게 되면 레귤레이터 IC가 정상적으로 동작하지 않고 출력 전압을 강하시켜 작동하기 때문에 적절한 시험을 수행해 나갈 수가 없어 주의해야 한다. 또한 시료는 각각의 경우 10개로 하여 조건별로 수행되었다.

<Table 2> Test Matrix

Run \ Factor	Temperature (°C)	Current (A)	No. of Sample
1	125 °C	0.5 A	10
2	125 °C	1 A	10
3	140 °C	0.5 A	10
4	140 °C	1 A	10

3.4 시험장치

본 연구에서 사용한 가속시험장치의 개략도를 Figure 5에 나타내었다. 레귤레이터 IC 시료에 전력을 공급하기 위한 DC Power Supply와 실제 시료에 가해지는 전기회로의 부하를 대신하기 위하여 5W, 5Ω급 시멘트 저항을 연결하여 전류부하를 조절하였다. 시료의 고장 모드를 확인하기 위한발광 다이오드의 동작을 위해서 300Ω의 저항을 연결하였다. 항온/항습조에 레귤레이터 IC 시료를 고정하는 시험 Jig가 들어가고 시료의 작동상태를 확인하기 위한 발광 다이오드 표시 장치는 외부에 연결되어 있다.



<Figure 5> Experimental Diagram for ALT

3.5 시험의 수행

가속 시험 전 시료 40개에 대한 전기 특성(출력 전압 및 대기전류)을 측정하였으며, 가속 시험에서는 9V의 DC전압을 시료에 인가하였다. 또한, 시험에서는 연속동작에 의한 열화가 레귤

레이터 IC에 어떤 영향을 미치는지 주기적으로 발광 다이오드 표시장치를 통해 확인하고, 출력전압/전류 및 대기전류를 측정하여 고장 여부를 판별 하였다.

3.6 시험결과

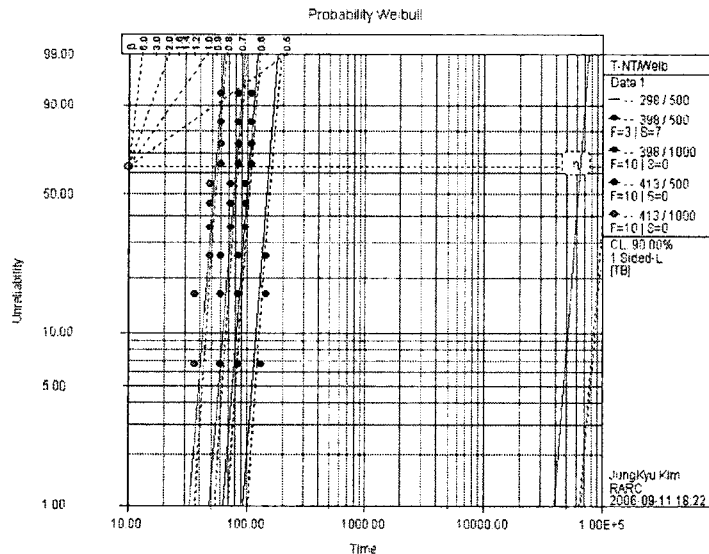
3.6.1 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검토

가속수명시험을 통하여 수집된 데이터에 적합한 수명분포를 가정하기 위하여 와이불 분포, 지수 분포, 대수정규 분포의 우도함수(likelihood function)값을 Table 3에서 비교한 결과 우도함수 값이 가장 큰 와이불 분포가 가장 적합한 수명분포로 나타났다.

레귤레이터 IC의 가속수명시험에서 관측된 고장시간을 시험조건별로 와이불 확률용지에 타점한 것을 Figure 6에 나타냈다. 그림에서 각 시험조건별 데이터들이 직선에 가깝게 배치되어 있고 각 시험조건의 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타난 것을 볼 수 있으며, 이로부터 와이불 분포가 적합하고, 시험조건 사이에 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.

<Table 3> Conformance results of life distributions

Distribution	Weibull	Exponential	Lognormal
Likelihood Function	-127.6614	-180.6604	-128.6951



<Figure 6> Weibull probability plots

3.6.2 가속수명시험 모델

레귤레이터 IC의 수명을 2개의 가속변수인 온도-전류 모델을 적용하였다. 온도가 레귤레이터 IC 수명에 미치는 가속시험 모형은 알려진 것이 없지만 대체로 온도가 올라갈수록 수명이 감소한다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 레귤레이터 IC의 수명분포를, 척도모수(η), 온도(T), 전류(I) 사이의 관계식으로 아래의 식 (1)과 같이 가정하였다.

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

3.6.3 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계식

와이블 분포와 식 (1)의 수명-스트레스 관계식을 가정하고, 소프트웨어 ALTA를 이용하여 가속수명시험 데이터를 분석한 결과, 각 파라미터 값들은 $\beta=9.21$, $B=7168.94$, $C=7.85 \times 10^{-5}$, $n=0.57$ 이다. 따라서, 레귤레이터 IC 시험에 의한 수명-스트레스 관계식과 B10 수명식을 다음과 같이 각각 추정될 수 있다.

$$\eta(T, I) = \frac{7.8515 \cdot 10^{-5}}{T^{0.5674} \cdot e^{(-7168.9380/I)}} \quad (2)$$

$$B_{10} = \eta[-\ln(1-0.1)]^{1/\beta} \quad (3)$$

4. 부하경감설계(Derating Design)

4.1 B10 수명

상기 식 (3)를 이용하여 스트레스 인자인 전류 및 온도에 대하여 레귤레이터 IC의 B10 수명의 관계를 Figure 7 (a), (b)에 각각 나타내었다.

그림 (a)는 일반적인 레귤레이터 IC의 동작 전류인 100mA ~ 200mA일 경우 레귤레이터 IC의 온도가 50°C~150°C로 변화할 때에 따른 B10 수명이고, 그림 (b)는 일반동작시 레귤레이터 IC의 온도 90°C ~ 125°C에서 레귤레이터 IC에 흐르는 전류가 100mA~1A로 변화할 때의 B10 수명이다. 그림에서 알 수 있듯이 레귤레이터의 온도 및 전류가 상승할수록 레귤레이터 IC의 수명은 지수함수적으로 감소되는 경향을 보이며, 아울러 레귤레이터 IC에 흐르는 전류가 200mA인 경우 레귤레이터 IC의 온도를 90°C에서 60°C로 부하를 경감하여 사용하게 되면 수명이 1390hr에서 8237hr로 수명이 약 6배정도 증가됨을 알 수 있다. 또한, 그림 (b)

에서 레귤레이터 IC의 온도가 90℃인 경우 전류를 600mA서 200mA로 부하를 경감하여 사용하면 수명이 745hr에서 1390hr로 수명이 약 2배정도 증가됨을 확인할 수 있다.

4.2 민감도(Sensitivity) 분석

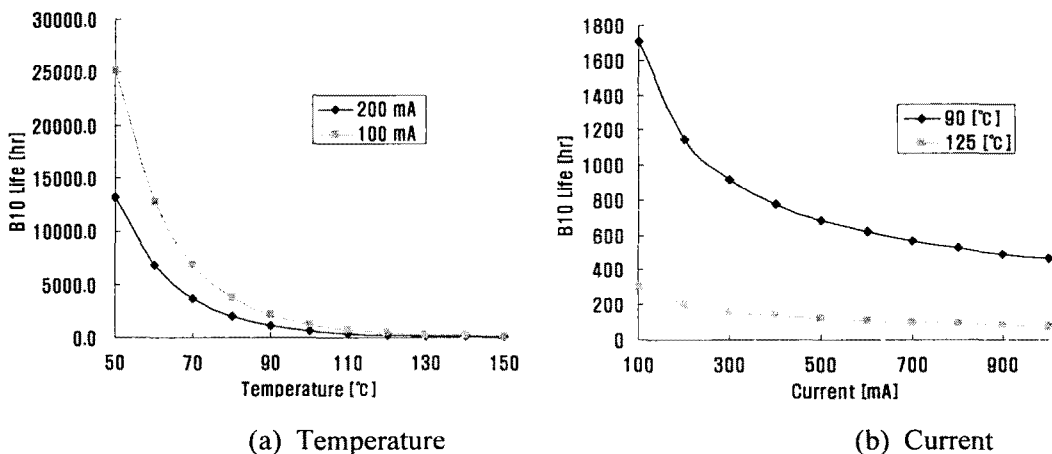
강건 설계에서 사용되고 있는 민감도(sensitivity) 모델은 설계 시스템의 설계 변수의 변화에 대한 시스템 응답의 변화를 나타낸다. 민감도 모델들 중 가장 많이 사용되고 있는 것은 정규화된 민감도이다. 정규화된 민감도(normalized sensitivity)는 설계 변수의 백분율 변화에 대한 시스템 응답의 백분율 변화를 나타낸다. 따라서 시스템을 구성하는 모든 설계 변수들의 변화에 대한 시스템 영향도를 비교 평가할 수 있고 각 변수들에 대한 영향도 등급을 고찰할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 레귤레이터 IC의 수명에 영향을 미치는 스트레스인 온도와 전류에 대하여 민감도 분석을 실시하였다.

수명과 온도에 대한 민감도 분석식과 수명과 전류에 대한 민감도 분석식을 식 (4)와 식 (5)에 각각 나타내었다.

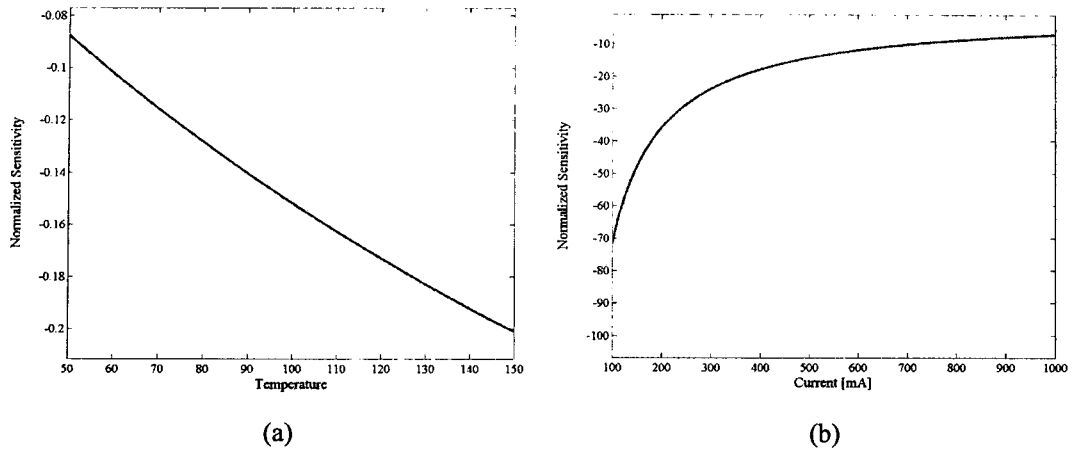
$$S_{Temperature}^{B_{10}} = \frac{dB_{10}}{dT} \cdot \frac{T}{B_{10}} \tag{4}$$

$$S_{Current}^{B_{10}} = \frac{dB_{10}}{dI} \cdot \frac{I}{B_{10}} \tag{5}$$

수명과 스트레스에 대한 민감도 분석식인 식 (4) 및 식 (5)에 대한 결과를 Figure 8 (a), (b)에 나타내었다. 그림 (a)는 온도에 대한, 그림 (b) 전류에 대한 민감도 관계이다. 그림 (a)에서는 온도에 대한 수명(B10 수명)에 대한 민감도 결과그래프로서 온도 증가에 따른 수명 감소율이 -0.085%에서 -0.2%로 온도증가에 따라 수명감소율을 그래프가 일정하게 증가하는 것을 알수가 있다. 그림 (b)는 전류증가에 따른 B10 수명의 민감도 분석 결과값으로서 전류 100mA에서 500mA 구간에서 수명율이 급격이 감소하다가 600mA 이상에서는 수명감소율이 일정하게 감소함을 알 수가 있고 수명 감소율은 -7.0%에서 -9%로 전류 1A에서 1%의 전류변화에 대하여 수명감소율은 9%임을 알 수가 있었다.



<Figure 7> Predicted B10 Life : (a) B10 Life vs. Temperature, (b) B10 Life vs. Current



<Figure 8> Sensitivity analysis : (a) Sensitivity over temperature change,
(b) Sensitivity over Current change

결과적으로, 레귤레이터 IC에 대한 민감도 분석결과 온도에 대한 민감도 결과값보다 전류변화에 대한 수명의 민감도 결과값이 상대적으로 큰 값으로 나타남은 온도보다도 전류변화에 대하여 수명의 영향이 크다는 사실을 알 수가 있다. 이로써 레귤레이터 IC에 대한 신뢰성 설계시의 스트레스를 고려한 적정수준의 결정단계에서는 온도보다는 전류를 고려한 신뢰성 설계가 이루어져야 함을 알 수가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 전자제품의 여러 분야에서 다양하게 이용되는 레귤레이터 IC의 가속수명시험을 다루었다. 레귤레이터 IC의 고장분석 결과 Package Delamination에 의한 Voltage Drop이 주된 고장 메커니즘으로 판명되었으며, 가속수명시험에서는 스트레스를 온도 및 전류로 선정하여 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계식과 B10 수명식을 추정하였다. 아울러 레귤레이터 IC의 수명은 온도가 높아질수록 또한 전류의 세기가 커질수록 지수적으로 감소하는 관계로 나타났다.

또한 스트레스에 대한 민감도 분석 결과 온도 변화에 대한 수명의 특성변화가 크다는 것을 알 수 있었고, 이를 고려한 신뢰성 향상을 위한 부하경감 설계시 온도와 전류의 적절한 스트레스 수준을 결정할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Tian, X., "Design for reliability and implementation on power converters," 2005, Reliability and Maintainability Symposium, Annual Proceedings, Jan. 24-27, pp. 89-95.
- (2) Edson, B. and Tian, X., "A Prediction Based Design-for-Reliability Tool," 2004, Reliability and Maintainability Symposium, Annual Proceedings, Jan. 26-29, pp. 412-417.
- (3) Kim, J. W., 2000, "Reliability and Failure Analysis for Electronic Components," Daewoo Electronics Co., Ltd.
- (4) Kim, H. J., Cheon, H. S., Kim, S. D., Park, Y. T., Jin, H. G. and Park, C. W., 1995, "An Experimental Study on Accelerated Life Testing for Aluminum Electrolytic Capacitors," The Korean Society for Quality Management, Vol. 23, No. 4, pp. 128-129.
- (5) Jeon, D. S., 2005, "On the Thermal Reliability Analysis of Thermal Overstress in a Positive Voltage Regulator," Master Degree Paper, Hanyang Univ., pp. 3-4.
- (6) Technical Data, "TO-220 Plastic-Encapsulate Voltage Regulator," KI SEMICONDUCTOR Co., pp. 1.