조 사 분 석

회로팩의 온도가속 수명시험에 관한 고찰

김창회* 양충렬** 고재상***

목 차

Ⅰ. 개 요
Ⅱ. 고장유형
Ⅲ. 가속수명시험의 종류 및 원리
Ⅳ. PBA의 가속수명시험의 조건
Ⅴ. 결 론

* 시험분석실 연구원
** 시험분석실 선임연구원
*** 시험분석실 실장

〈요 약〉

통신시스팀을 구성하는 PBA수준에 대해 운용중의 고장률 추정 및 고장형태 파악을 목적으로 실시하는 가속수명시험에 대해 서술하였다. 이를 위해 통신시스팀에서 나타나는 고장유형 및 각 기간에서의 고장률데이터 확보방법, 가속수명시험의 종류 및 원리, 시스팀을 구성하는 PBA 수준에 대한 가속수명시험조건에 대해 서술하였다.

Ⅰ. 개 요

신뢰도란 사용자의 요구조건에 부합하는 기능을 주어진 기간동안 성공적으로 수행할 수 있는 확률을 말한다. 시스팀 사용자의 만족도와 시스팀 사용기간 동안의 유지비용 및 보수에 필요한 여분의 시스팀 구성품수를 결정하

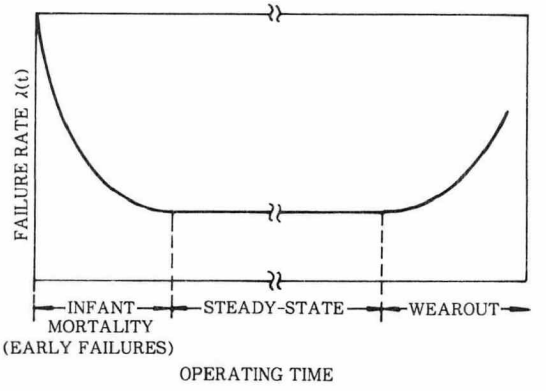
는 데 있어서 영향을 미치는 것이 시스템 신뢰도이다. 따라서 시스템의 설계단계에서부터 시스템에 대한 신뢰도 예측을 하는 것이 매우 중요한 일로 여겨진다. 만약 설계된 시스템이 신뢰도 목표치를 만족하지 못한다면 좀더 신뢰성 있는 부품을 사용하거나 시스템 Redundancy 확보 및 Burn-in 등을 실시함으로써 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

시스템 신뢰도예측에는 미국방성에서 제시한 MIL-HDBK-217의 방법을 주로 이용하고 있다. 그러나, MIL-HDBK-217의 적용인자값이 군용시스템을 중심으로 하여 결정되었기 때문에 상용시스템에 적용시 고장률이 높게 나타나는 특성이 있다. 또한 부품 및 PBA에 대해 짧은 기간 동안 운용조건보다 가혹한 스트레스를 인가하여 운용중의 고장률을 예측하는 가속수명시험이 있다.

본 고에서는 통신시스템을 구성하는 PBA에 대해 운용중의 고장률 추정 및 고장형태 파악을 목적으로 실시하는 가속수명시험에 대해 서술하고자 한다. Ⅱ장에서는 통신시스템에서 나타나는 고장유형 및 각 기간에서의 고장률 데이터 확보방법, Ⅲ장에서는 신뢰도 Bathtub 곡선에서 일정고장기간 동안의 고장률데이터를 확보하기 위해 실시하는 가속수명 시험의 종류 및 원리, Ⅳ장에서는 시스템을 구성하는 PBA 수준에 대한 가속수명 시험조건에 대해 서술한다.

Ⅱ. 고장의 유형

시스템의 신뢰도는 시스템이 시간 t까지 고장날 확률을 나타내는 누적분포 함수 F(t), 시스템이 시간 t에서의 고장날 확률을 나타내는 확률밀도 함수 f(t), 혹은 시간 t에서의 순간고장률을 나타내는 고장률함수 $\lambda(t)$로 나타낼 수 있다. 일반적으로 시스템의 운용시간에 대한 순간고장률(또는 고장률)은 아래 (그림 1)같이 Bathtub 곡선 형태를 따른다.[1]



(그림 1) 신뢰도 Bathtub 곡선

초기고장기간은 고장률이 처음은 매우 높지만 급격히 감소하는 특성을 가지고 있으며, 약 1년간 지속된다. 이 기간동안의 고장은 주로 시스템의 고유 성질에 의해 발생하는 고장이 아니고 조립과정중의 결함에 의해 발생하는 고장이 주류를 이루며 상대적으로 짧은 기간 동안 지속된다. 초기고장기간 동안의 고장률데이터는 초기 생산시스템의 신뢰도가 사용자의 요구조건을 만족시키기 위해 요구되는 설계조정, 신뢰성 시험, 스크리닝 프로그램(Screening program)에 필요한 정보를 제공한다.

초기고장기간 동안의 고장률데이터에 관한 정보는 현장운용 데이터로부터 확보할 수 있

다. 왜냐하면 초기고장기간이 약 1년이고 시스팀이 운용되기 시작한 시점으로부터 시스팀에 대한 신뢰도 추적기간이 보통 2~3년 동안은 계속된다고 보기 때문이다.[2]

일정고장기간(Long-term failure rate period)은 시스팀이 초기고장기간을 지나 안정상태로 들어선 단계이기 때문에 고장률이 낮고 오랜기간동안 일정한 고장률 분포를 나타내는 특성이 있다. 이 기간 동안의 고장은 조립과 정중의 결함에 의해서도 발생하지만 시스팀 및 시스팀을 구성하는 구성품들의 고유성질에 의해 주로 발생한다. 이 기간 동안의 고장률 데이터는 일반운용조건을 이용하여 오랜기간(시스팀의 서비스 기간) 동안 시스팀을 동작시켜 고장데이터를 얻는다는 것은 거의 불가능하다. 왜냐하면 새로운 시스팀에 대한 신뢰도 추적기간이 시스팀이 운용되기 시작한 시점으로 부터 보통은 2~3년을 경과하지 않고, 만약 신뢰도 추적기간을 서비스기간 동안 계속 확장한다면 상당한 비용이 소모되기 때문이다. 따라서 운용환경조건보다 가혹한 조건을 이용하는 가속수명 시험을 단기간(일반적으로 1000시간)에 실시하여 시험조건에서의 고장률데이터를 확보함으로써 운용조건에서의 고장률데이터를 산출할 수 있다.

Ⅲ. 가속수명 시험의 종류 및 원리

1. 종 류

가속수명 시험은 부품의 고장을 유발하는 스트레스를 실제 운용조건보다 높게 인가함으로써 실제 운용기간보다 짧은 시험기간으로 수명 및 고장률을 추정하기 위한 시험이다. 고장을 유발하는 스트레스 종류로는 온도, 전기적인 특성인자(전압, 전류, 전력), 압력, 진동 및 이들을 조합한 인자들이 있다. 그러나 압력, 진동 및 이들을 조합한 인자에 대해서는 고장률 모델정립이 어렵다.

전기적인 특성인자에 관한 고장률 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다. 즉 P_1 스트레스 수준에서의 고장률은 λ_1, P_2 스트레스 수준에서의 고장률을 λ_2라고 하면 가속인자 즉 각 스트레스 수준에서의 고장이 발생한 시간의 비(고장률의 비) $S(P_2, P_1)$는

$$S(P_2, P_1) = \lambda_2/\lambda_1 = \exp[m(P_2 - P_1)] \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 m : MIL-HDBK-217D의 스트레스 상수

P_1, P_2 : 전기적 스트레스 수준
저항인 경우 P_1, P_2는 소모전력
커패시터인 경우 P_1, P_2는 전압
스위치인 경우 P_1, P_2는 전류

이다.[2] 그러나, 회로팩수준 이상의 시스팀 구성수준에 대한 가속수명 시험시 시험시료에 대해 각 구성부품별로 인가되는 전기적인 스트레스인자가 다르기 때문에 회로팩에 대한 가속인자 등을 정의하기가 어렵다. 따라서 전기적인 스트레스에 의한 가속수명시험은 부품수준에 대해서는 어려움이 없으나, 회로팩 이상의 시스팀구성수준에 대해서는 힘들다.

다음으로 스트레스인자로 온도(T)를 이용하는 고장률 모델은 아래와 같이 Arrhenius 식으로 표현된다.[3]

$$R = dG(t)/dt = A \times \exp(-E_a/KT) \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

여기서 R : 반응속도(Reaction rate)

E_a : 활성화 에너지(eV)

K : Boltzmann 상수

(8.617×10^{-5}eV/K)

T : 절대온도(K)

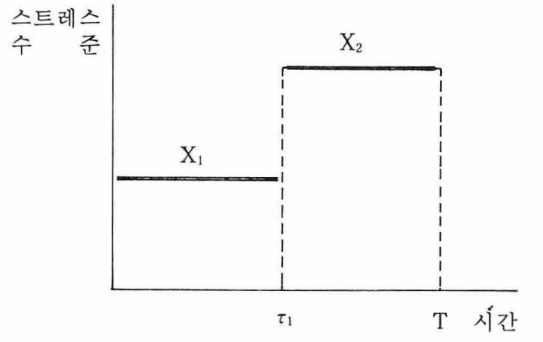
A : 상수

Arrhenius 식은 전자부품내에서 잠재적 고장메카니즘을 활성화시키기 위해 필요한 에너지(활성화에너지)에 의해 온도의 함수로 가속되는 반응속도를 나타내는 것이다. 즉 T_1 온도에서의 고장률을 λ_1, T_2 온도에서의 고장률을 λ_2라고 하면 가속인자 즉 각 스트레스 수준에서의 고장이 발생한 시간의 비(고장률의 비) $A(T_2, T_1)$은

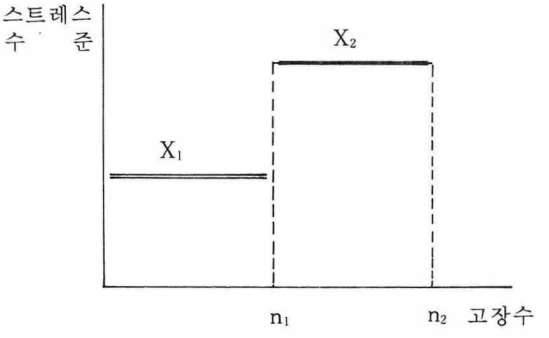
$$A(T_2, T_1) = \lambda_2/\lambda_1 = \exp[Ea/K \times (1/T_1 - 1/T_2)] \cdots (3)$$

이다.

또한 가속수명시험은 스트레스를 인가하는 방법에 따라 두가지 종류로 구분될 수 있다. 가속된 일정수준의 스트레스를 인가하는 Constant-stress 가속수명시험과 시료에 인가되는 스트레스 수준이 일정하지 않고 단계적으로 증가하는 Step-stress 가속수명시험이 있다.[4] Step-stress 가속수명시험에는 다음과 같이 Time-step 스트레스 가속수명시험과 Failure-step 스트레스 가속수명시험이 있다. Time-step 스트레스 가속수명시험은 일정한 스트레스 수준 X_1을 주어진 시간 τ_1 동안 인가하고 나서 스트레스 수준을 $X_2(X_2 > X_1)$로 변화시켜 모든 시료가 고장이 나거나 혹은 주어진 시간 T 동안 시험하는 방법이며, Failure-step 스트레스 가속수명시험은 n_1개의 고장이 발생하는 시점 τ까지 스트레스 수준 X_1을 유지하고 나서 τ이후부터는 X_2의 스트레스 수준을 인가하여 n_2개의 고장이 발생하는 시점 T까지 시험을 실시하는 방법이다.[5]



(1) Time-step 스트레스



(2) Failure-step 스트레스

(그림 2) Step-stress 가속수명시험

2. 원 리

Step-stress 가속수명시험은 시험수행시 시험시료의 동작을 계속 모니터하면서 고장을 관찰해야 하기 때문에 시험장치를 구성하기가 어렵고 시험기간 등과 관련하여 시험계획 수립에 어려움이 있다. 또한 앞에서 서술한 바

와 같이 가속인자를 전기적인 특성인자, 압력, 진동 등으로 선택하는 데 있어서 어려움이 있으므로 여기서는 가속인자를 온도로 하고 일정수준의 스트레스를 시험기간 동안 인가하는 Constant-stress 온도 가속수명시험에 대해서 서술하고자 한다. 식 (2)에서 T는 전자부품의 접합온도(T_J)이며,

$$T_J = T_A + \Theta_{JA} \times P_d \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서 T_J : 접합(Junction) 온도(℃)

T_A : 주위(Ambient) 온도(℃)

Θ_{JA} : 주위온도에 대한 열저항(℃/W)

P_d : 소모전력(W)

로 표현된다. 만일 전자부품이 보관중이거나 동작중이라도 소모전력이 매우 적은 경우 접합온도 T_J는 주위온도 T_A와 같다. 식 (2)에 따라 T_J가 T_{J1}에서 T_{J2}로 변할 경우 두 온도에서의 부품의 반응속도비는 식 (5)와 같다.

$$R_1/R_2 = \exp[(E_a/K) \times (T_{J2}^{-1} - T_{J1}^{-1})] \quad \cdots (5)$$

여기서 R_1, R_2 : T_{J1}, T_{J2}에서의 반응속도

T_{J1}, T_{J2} : 주위온도 T_1, T_2에서의 부품의 접합온도(K)

식 (5)에서 R_1, R_2는 온도 T_{J1}, T_{J2}에서 부품 반응속도 즉 그 온도에서의 부품고장률을 나타낸다. T_J가 T_{J1}에서 T_{J2}로 변할 경우 가속인자(AF)는 각 온도에서의 고장이 발생한 시간의 비 즉 고장률의 비로 나타낼 수 있다. 즉,

$$AF = \lambda_{T1}/\lambda_{T2} = \exp[(E_a/k) \times (T_{J2}^{-1} - T_{J1}^{-1})] \quad \cdots (6)$$

예를 들면 전자부품의 활성화에너지가 0.7eV이고 전자부품의 소모전력이 작아 접합온도 T_J가 주위온도 T_A와 같다고 한다면 가속인자는 식 (6)에서 255가 된다(운용시 주위온도 : 40℃, 시험시 주위온도 : 125℃). 이 가속인자는 주위온도 40℃에서의 100,000시간 운용이 125℃에서 392시간 시험하는 것과 대응되는 것을 의미한다. 그리고 식 (6)로부터 T_2를 운용시의 주위온도, T_1을 가속수명 시험시의 주위온도라고 하면 운용시의 고장률 λ_{T2}는 $\lambda_{T2} = \lambda_{T1}/AF$으로부터 얻을 수 있다. 즉 가속수명시험온도에서의 고장률 데이터를 가지고 운용온도에서의 고장률을 산출해낼 수 있다. 따라서 Constant-stress 온도가속수명시험이란 운용시의 온도보다 높은 온도를 일정기간(시험기간) 동안 스트레스로 인가하여 짧은 시험기간의 고장률 데이터로부터 시험기간보다 긴 운용기간 동안의 고장률을 추정하는 시험이다.

Ⅳ. PBA의 가속수명시험 조건

여기서는 Ⅲ장에서 서술한 Constant-stress 온도가속수명시험의 원리를 바탕으로 하여 전자부품으로 이루어진 PBA에 대해, PBA에서의 활성화에너지 환산방법, 가속수명시험 조건 즉, 시험온도, 시험기간 및 시료수에 대해 서술한다.

1. 활성화 에너지

가. 가중평균에 의한 방법

PBA를 구성하는 각 부품의 가속인자 가중평균치를 이용하여 PBA의 가속인자를 구하

고, 이 가속인자를 이용하여 식 (6)의 Arrhenius 식으로부터 PBA의 활성화에너지를 환산하는 방법이다.[6] PBA가 〈표 1〉의 칼럼 1과 같이 5종의 소자로 구성되었다고 가정하자 (저항 커패시터 등의 수동소자 제외).

칼럼 2는 각 부품의 게이트 수, 메모리 비트 수, 혹은 트랜지스터 수를 나타내며, 칼럼 3은 MIL-HDBK-217D로부터 인용한 부품이 복잡도를 나타내는 복잡성인자이다. 그리고 칼럼 4는 부품이 고온 스트레스를 받았을 때 고장을 일으키는 고장메카니즘을 나타내며, 칼럼 5는 PBA에 사용된 각 부품의 개수를 나타낸다. 칼럼 6은 가속수명시험 동안 각 부품의 가속인자 가중치를 계산하는 데 사용되며 다음식으로 부터 계산된다.

〈표 1〉 가속인자 계산요소

Device description	Number of active elements	C_l complexity factor(%)	Activation energy	Times used	Normalized C_l(%)	Weighted C_l(%)	Acceleration factor	Contribution
Logic, bipolar	4	0.185	0.96	4	0.394	1.576	284	4.476
Comparator	40	2.59	0.80	1	5.510	5.51	111	6.116
Memory 4KCMOS	4096	7.35	0.80	4	15.638	62.552	111	69.433
μ-Processor NMOS	23300	9.8	0.40	1	20.851	20.851	10.5	2.189
Communication Controller NMOS	3300	4.7	0.69	1	10	10	58	5.8

$$C_{1jn} = \frac{C_j}{\sum_j N_j C_j}$$

여기서, C_{1jn} : 부품 j의 normalized complexity factor

C_j : 부품 j의 complexity factor

N_j : 부품 j의 사용개수

칼럼 7은 각 부품이 PBA에 미치는 누적복잡도를 나타내며 칼럼 5와 칼럼 6의 곱으로 구할 수 있다. 칼럼 8은 각 부품에 대한 가속인자를 나타내며, 운용시의 부품의 접합온도를 65℃, 시험시의 접합온도를 135℃로 가정하면 식 (6)의 Arrhenius 식으로 구할 수 있다.

칼럼 9는 각 부품의 PBA 가속인자에 대한 기여도를 나타내며, 칼럼 7과 칼럼 8의 곱으로 구할 수 있다. PBA에 대한 가속인자는 칼럼 9의 합으로 구해지며, 최종적으로 PBA의 가속인자는 88이다. 이 가속인자를 가지고 식 (6)의 Arrhenius식으로부터 활성화에너지를 구하면 된다. 그러나 이 방법은 각 부품에 대한 Active element 개수 및 각 부품에 대한 활성화에너지를 파악하기가 어렵다.

나. 최저 활성화에너지 선택방법

PBA를 구성하는 부품들의 활성화에너지를 관찰한 후 가장 낮은 활성화에너지 값을 PBA의 활성화에너지로 이용하는 것이다.[7] 이는 가속수명시험후 운용온도에서의 고장률데이터 환산시 좀더 엄격한 고장률데이터를 확보하기

때문에 가능하다. 일반적으로 통신시스템에서 PBA를 구성하는 부품들의 활성화에너지는 0.7eV보다 크므로[8-11], PBA의 활성화에너지를 0.7eV로 적용하게 된다.

2. 시험조건

가. 시험온도

저항, 커패시터등의 수동소자는 PBA의 고장률에 거의 영향을 미치지 않는다.[6] 실리콘 소자의 최대허용 접합온도는 175℃이다.[15] 식(4)에 의해 IC의 접합온도는 주위온도와 패키지 열저항, 소모전력에 의해 결정되지만 일반적으로 소모전력은 10^{-1} 수준이고 패키지 열저항은 10^{1} 수준이므로 IC의 접합온도는 주위온도보다 10℃ 이상 높지 않다. 일반적으로 반도체 IC소자에 대한 가속수명시험온도가 125℃이며,[12-14] 이 시험온도에서의 IC의 접합온도는 135℃를 초과하지 않으므로 이는 실리콘 소자의 최대허용접합온도 범위내에 있다. 그리고 PBA를 구성하는 소자들이 대부분은 반도체 IC이기 때문에 PBA에 대한 시험온도는 125℃로 정하는게 타당하다.

나. 시험기간

통신시스템의 서비스운용기간을 10년으로 본다면[2], PBA의 가속인자를 이용하여 식(6)의 Arrhenius 식으로부터 시험기간을 산출해 낼수 있다. PBA의 가속인자는 1절에서 서술한 활성화에너지 0.7eV, 운용온도 및 시험온도를 이용하여 식 (6)의 Arrhenius 식으로부터 구할 수 있다. 만약 PBA의 가속인자가 90이라면, 1000시간동안 가속수명시험을 실시하는 것이 운용온도에서 약 10년간 운용하는 것에 대응된다.

3. 시료수

시료수 결정에 있어서는 시험데이터의 신뢰성과 시료를 준비하는 데 소요되는 시험비용 사이에 절충이 이루어져야 한다. Hart[6]는 시료수결정을 위해 MIL-STD-781C 방법을 이용하여 1000시간 가속수명시험하는 데 필요한 시료수를 30개로 산출했다. 또한 Gorski는 Chi-square 분포 및 누적포아송분포함수를 이용하고 MTBF 추정을 위해 60% LCL(Lower statistical Confidence Limit)을 선택하였다. 추정 MTBF, LCL, 가속인자 및 시험기간동안 3개의 고장을 허용하는 필요조건을 만족하기 위하여 시료수를 30개로 하였다.

V. 결 론

본 고에서는 시스템의 운용시간에 대한 고장률을 나타내는 Bathtub 모델에서 일정고장기간중의 시스템 운용중 고장률을 예측하는 시험방법중의 하나인 온도가속수명시험의 원리에 대하여 기술하였다. 온도가속수명시험은 운용온도보다 높은 온도를 스트레스로 인가하여 실제운용시간보다 짧은 시간내에 고장률데이터를 확보함으로써, 운용기간동안의 시스템의 고장률을 추정할 수 있다.

또한 이를 바탕으로 통신시스템을 구성하는

PBA 수준에 대한 온도가속수명시험조건을 기술하였다. 시험온도에 있어서는 일반적으로 PBA를 구성하는 부품들 대부분이 반도체 IC이기 때문에 실리콘소자의 최대허용접합온도 및 반도체 IC에 대한 온도가속수명시험온도를 근거로 하여 125℃를 제시하였다. 또한 PBA의 활성화에너지로는 오차는 있으나 좀더 엄격한 고장률데이터 제시라는 측면에서 0.7eV를 PBA의 활성화에너지로 제시하였다. 시험기간에 있어서는 시스팀의 서비스운용기간을 10년으로 가정하고 PBA 가속인자를 고려하여 1000시간 정도로 나타내었다. 그러나 이는 PBA 가속인자의 크기에 따라 어느 정도 차이는 생길 수 있다. 시험시료수는 참고문헌을 근거로 하여 30개를 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Special Report SR-TSY-000385, *Bell Communications Research Reliability Manual*, Bell Communications Research, Jun. 1986.
2. D. P. Holcomb, J. C. North, "An Infant Mortality and Long-Term Failure Rate Model for Electronic Equipment", AT & T Technical Journal, Vol. 64. No. 1, pp 15-31, Jan. 1985.
3. D. M. Barry, D. C. Vontas, "Statistical Reliability and Failure Arrhenius Models for Temperature Stressed Transistors", Reliability in Electrical and Electronic Components and Systems, pp 239-242, 1982.
4. R. Miller, W. Nelson, "Optimum Simple Step Stress Plans for Accelerated Life Testing", IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-32, No. 1, pp 59-65, Apr. 1983.
5. D. S. Bae, M. S. Kim, S. H. Lee, "Optimum Simple Step-Stress Accelerated Life Tests with Censoring", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 38, No. 5, pp 528-532 Dec. 1989.
6. L. Hart, "Reliability of an Electronic Assembly : A Case History". IEEE Trans, on Reliability, Vol. R-36, No. 4, pp 385-389, Oct. 1987.
7. L. Hart, "Reliability of Modified Designs : A Bayes Analysis of an Accelerated Test of Electronic Assemblies", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 39, No. 2, pp 140-143, Jun. 1990.
8. T. Tatsuzawa, S. Madokoro, S. Hagiwara, "Si Nodule Formation in Al-Si Metallization", Proc. Int'l Reliability Physics Symp., pp 138-141, 1985.
9. J. Partridge, G. Littlefield, "Aluminium Electromigration Parameters", Proc. Int'l Reliability Physics Symp., pp 119-125, 1985.
10. W. J. Minford, "Accelerated Life Testing and Reliability of High K Multilayer Ceramic Capacitors", IEEE Trans. on Components, Hybrids, Manufacturing Technology, Vol. CHMT-5, pp 297-300, Sep.

1982.

11. I. K. Yoo, L. C. Evans, F. W. Stephenson, "Electronical Conduction Mechanisms of Barium-titanate-based Thick-film Capacitors", IEEE Trans. on Components, Hybrids, Manufacturing Technology, Vol. CHMT-10, pp 274-282, Jun. 1987.

12. AMD Company, "General Plastic Package Reliability Study", Apr. 1989.

13. M. Stitch, G. M. Johnson, etc, "Microcircuit Accelerated Testing Using High Temperature Operating Tests", IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-24, No. 4, Oct. 1975.

14. R. Bortignon, A. Gallesio, A. Piccirillo, "Reliability Studies on ECL 100K Devices", Reliability in Electrical and Electronic Componts and Systems, pp 243-248, 1982.

15. R. T. Anderson, Reliability Design Handbook, IIT Research Institute, pp 135-169 Mar. 1976.

16. 김창희, 오행석, et al., 5340-92-TAR-001, "IC 패키지 성능분석", 한국전자통신연구소, Jan. 1992.