

가속수명시험을 이용한 Packaging Substrate PCB의 ECM에 대한 신뢰성 예측에 관한 연구

강대중* · 이화기**

*인하대학교 공학대학원 산업경영정보공학과 · **인하대학교 산업공학과

A Study on the Reliability Prediction about ECM of Packaging Substrate PCB by Using Accelerated Life Test

Dae-Joong Kang* · Hwa-Ki Lee**

*Graduate School of Engineering, Inha University

**Department of Industrial Engineering, Inha University

Abstract

As information-oriented industry has been developed and electronic devices has come to be smaller, lighter, multifunctional, and high speed, the components used to the devices need to be much high density and should have fine pattern due to high integration. Also, diverse reliability problems happen as user environment is getting harsher. For this reasons, establishing and securing products and components reliability comes to key factor in company's competitiveness. It makes accelerated test important to check product reliability in fast way. Out of fine pattern failure modes, failure of Electrochemical Migration(ECM) is kind of degradation of insulation resistance by electro-chemical reaction, which it comes to be accelerated by biased voltage in high temperature and high humidity environment.

In this thesis, the accelerated life test for failure caused by ECM on fine pattern substrate, 20/20 μ m pattern width/space applied by Semi Additive Process, was performed, and through this test, the investigation of failure mechanism and the life-time prediction evaluation under actual user environment was implemented. The result of accelerated test has been compared and estimated with life distribution and life stress relatively by using Minitab software and its acceleration rate was also tested. Through estimated weibull distribution, B10 life has been estimated under 95% confidence level of failure data happened in each test conditions. And the life in actual usage environment has been predicted by using generalized Eyring model considering temperature and humidity by developing Arrhenius reaction rate theory, and acceleration factors by test conditions have been calculated.

Keywords : Reliability Prediction, Accelerated Life test, Packaging Substrate PCB, Electrochemical Migration(ECM)

† Corresponding Author: Hwa Ki Lee, Dept. of Industrial Engineering, Inha University, Incheon, Korea
M · P: 010-3252-1415, E-mail : hwakilee@inha.ac.kr

Received January 8, 2013; Revision Received March 5, 2013; Accepted March 8, 2013.

1. 서론

전자부품의 경박 단소화 및 고집적화에 따라 인쇄회로기판(PCB) 내부의 회로간의 간격이 점점 줄어들게 되었다. 특히 반도체 패키징 Substrate 제조 업체의 경우 회로의 폭과 간격을 줄이기 위한 노력을 계속 하고 있으며, 2012년 현재 회로 폭/간격(Width/Spacing) 20/20 μm 이하의 미세 회로를 가공하는 기술은 이미 확보된 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 전류, 전압, 습도, 환경 등과 복합적으로 연관된 새로운 신뢰성 문제들이 인쇄회로기판 및 칩 패키지 신뢰성에 많은 영향을 주게 되었다. 특히 스마트 모바일 기기의 사용확대 및 발전과 더불어 가혹한 환경에서의 전자부품 사용이 증가되고, 이에 따라 고온 다습한 환경에 노출되는 경우가 많아지고 있다. 고온 다습한 환경에서 전압인가에 의해 전자부품이 동작하는 경우, 전자 부품 내의 금속 전극은 전기화학적으로 불안정하게 되고, 열역학적으로 안정화 되기 위해 금속 전극은 쉽게 이온화되게 된다. 이렇게 이온화된 금속은 양극과 음극 두 전극 사이에서 전도성 필라멘트를 형성하여 전자부품 및 인쇄회로기판 내 금속회로 사이에서 절연파괴를 일으키게 된다. 이러한 현상을 Electrochemical Migration(ECM)이라고 한다.[4,5,7]

ECM 현상은 양극에서 이온화된 금속이 이동하여 음극에서 성장한 덴드라이트(dendrite)가 양극전극에 연결되어 전기적 파괴가 발생하는 경우와 양극에서 성장한 전도성 양극 필라멘트(Conductive Anode Filament)에 의한 절연파괴가 있는데, 사용되는 재료, 전극 사이의 간격, 제조 공정, 온도 및 습도 등의 사용 환경에 따라 발생 경향이 달라지게 된다. 이러한 고장을 실제 사용 조건에서 예측하는 데에는 한계가 있기 때문에 보다 가혹한 조건에서의 가속 수명시험(Accelerated Life Test)을 통하여 시험 데이터를 분석하고 수명-스트레스 관계식을 추정, 이로부터 사용조건의 수명 예측을 통하여 제품 설계 및 개발이 이루어져야 높은 수준의 신뢰성 확보가 가능하다.

그러나 기존 연구에서는 ECM 발생 메커니즘에 대한 연구가 대부분이며, 현재 전자부품기기의 발전 동향과 더불어 실제 업체에서 개발 적용되고 있는 Semi-Additive Process(SAP)공법 등의 새로운 공정을 적용한 회로폭/간격 20/20 μm 이하의 미세회로 패턴에 대한 ECM 발생 메커니즘 및 수명에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 SAP 공법으로 제조한 회로폭/간격 20/20 μm 를 갖는 Packaging Substrate에 대해 다양한 온도, 습도 조건에서 가속 수명 시험을 통해

Fine pattern에서의 ECM 고장 메커니즘을 확인하고, 실제 가속 수명 시험 결과를 바탕으로 Minitab 소프트웨어[14]를 이용하여 수명 분포 및 수명-Stress관계식을 추정하고 가속성 검증을 하였다. 또한 와이블 분포를 통해 각각의 시험조건에서 발생된 고장데이터의 신뢰성 척도를 추정하여 실제 사용 환경에서의 수명을 예측하고, 스트레스 인자인 온도 및 습도의 조건별 가속 계수를 산출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Packaging Substrate PCB의 제조 동향과 신뢰성 문제

PCB(Printed Circuit Board)란 여러 종류의 부품을 탑재하기 위해 페놀수지 또는 에폭시 수지로 된 평판 위에 도체회로를 형성시킨 것으로 전자부품을 전기적으로 연결하여 전원 등을 공급하는 배선의 역할과 전자부품을 기계적으로 고정시켜 주는 역할을 동시에 담당하는 전자부품이다. 용도별로는 부품실장(Mounting)용과 반도체실장용으로 구분되는데 부품실장용은 TV, 컴퓨터 등 전자기기의 부품을 장착할 목적으로 제작된 제품들을 지칭하는 것이며, 반도체를 장착하기 위한 PCB는 리드프레임(Lead Frame)을 이용하여 회로를 연결하던 형태에서 기판 형태의 'Packaging Substrate'로 발전하고 있다. 이러한 기판 형태의 사용 확대는 칩의 사이즈 소형화와 용량 및 속도 개선에 기인한 것으로, 주요 제품으로는 BGA(Ball Grid Array), CSP(Chip Scale Package), BOC(Board on Chip) 등이 있으며, 최근 전자제품 및 통신기기들의 소형화, 고성능화 추세에 따라 반도체의 집적도가 높아지면서 수요가 큰 폭으로 증가하고 있다[3].

반도체용 Packaging Substrate PCB를 생산하는 기업들은 차세대 반도체기판의 배선밀도 및 단위 면적당 접속 핀 수를 높이기 위하여 배선(회로)의 폭과 간격을 줄이기 위한, 즉 미세 회로화(피치화)의 노력을 계속하고 있다. Pattern fine화가 진행됨에 따라 pattern 형성 방법은 subtractive법에서 Semi-Additive법(SAP)으로 바뀌고 있다. SAP는 Additive 공법의 하나로써 동(Cu)이 없는 절연체상에 도전체를 선택 도금함으로써 도체 회로를 얻어 낼 수 있는 공정이다.

전자부품의 소형화와 고집적화에 따라 Fine Pattern Packaging Substrate의 금속 회로간의 간격이 점점 줄게 되어, 금속 회로간 연결에 의한 절연파괴 현상에 쉽게 노출되며, 전기적 단락(Short)을 유발함으로써 전자

제품의 치명적인 고장을 유발한다. 이는 금속 단자가 고온/다습의 가혹한 환경에 노출된 상태에서 전압이 인가됨에 따라 전기화학적으로 불안정해지기 때문이다. 이러한 가혹 조건에서, 인가된 전압에 의해 전자 부품의 금속 단자는 전기화학적으로 이온화되게 되며 양극과 음극 사이의 절연체상의 전도성 필라멘트를 형성한다. 이는 전자부품의 절연과피를 초래하게 되는데 이러한 현상이 대표적인 ECM(Electrochemical Migration) 중의 하나이며 Fine Pattern을 적용하는 반도체 Packaging Substrate PCB에 대한 신뢰성 문제로 매우 크게 부각되고 있다. 이에 따라 ECM에 대하여 기업이나 부설 연구소 등에서 제품 생산 및 출고 시 필요로 하는 신뢰성 정보를 얻기 위해서 ECM 신뢰성 기준이나, 시험 방법 등을 세우고 연구하고 있으나, 주로 ECM의 원인 및 고장 메커니즘에 대한 연구에 국한되고 있으며, 가속 수명 시험을 이용한 사용 환경에서의 수명 예측, 가속 계수 등 신뢰성 예측에 관한 연구는 부족한 현실이다.

2.2 Electrochemical Migration(ECM, 전기 화학적 마이그레이션)

ECM(Electrochemical Migration, 전기화학적 마이그레이션)현상은 전압이 인가된 상태에서 두 전극 사이에 전도성 필라멘트(filament)가 성장하여 절연과피가 일어나는 현상으로 1995년 미국의 Bell Lab에서 처음으로 발견되었다. 절연 막으로 둘러싸인 은(Ag) 전극에서 양극 전극에서 이온화 현상이, 음극 전극에서는 은(Ag)이 환원되어 필라멘트가 성장되는 것으로 절연체에 흡수된 수분이 전해액의 역할로 작용하여 두 전극 사이에 절연저항 저하가 발견된 이후 은(Ag)뿐 아니라, 금(Au), 구리(Cu), 니켈(Ni), 주석(Sn), 납(Pb) 등에서도 같은 현상이 일어나는 것이 관찰되고 있다.[1,5,6,8]

전자부품의 급속한 고성능화, 소형화에 대응하기 위해 PCB 및 전자패키지에 사용되는 금속 배선 및 접합층의 회로폭 및 간격이 점점 작아짐에 따라 절연 파괴 현상에 쉽게 노출되게 되어 ECM 신뢰성 문제는 점점 더 심각하게 대두되고 있다. 고온/다습한 가혹조건에서 인가된 전압에 의해 전자 부품의 금속 단자는 전기화학적으로 이온화 되게 되며, 두 전극 사이의 절연체상에 전도성 필라멘트를 형성하게 되는데, PCB 기판뿐 아니라 리드프레임과 기판 사이 플립칩 패키징의 솔더 사이 등 다양한 전자부품 및 재료에서 발생한다.

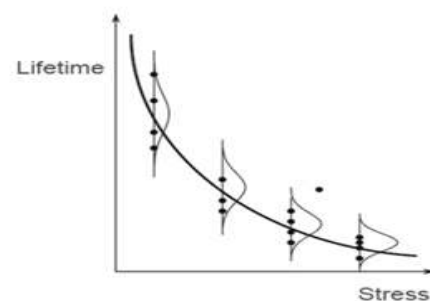
ECM 현상은 크게 두 가지 메커니즘을 통해 발생하는데, PCB등의 표면에 수지상의 형태로 성장하는 덴드

라이트(Dendrite)와 이온화된 금속이 주위의 염화물과 결합하여 양극에서 성장하는 전도성 양극 필라멘트가 있다. 표면 수지상의 형성은 양극에서 이온화된 금속이 전기장을 따라 음극 쪽으로 이동, 음극 상에 환원되어 수지상의 필라멘트를 형성하게 되며, 이렇게 형성된 필라멘트가 양극까지 자라나가 절연과피에 이르는 메커니즘이다. 그러나 전도성 양극 필라멘트는 가해진 전기장에 의해 양극의 금속이 이온화되고, Cl⁻ 등과 같은 할로겐 족 이온과 결합하여 양극에서 음극으로 전도성 염화물의 필라멘트를 형성, 절연과피에 이르게 된다. 이 두 가지가 ECM을 일으키는 주된 메커니즘이며, 전자부품 특히 PCB에서 일어나는 주요한 전기적 고장 메커니즘이다.

2.3 가속수명 시험(Accelerated Life Testing: ALT)

가속수명 시험(Accelerated Life Testing : ALT)은 높은 신뢰도를 갖는 시스템이나 부품에 대한 신뢰성을 평가 할 때, 시험시간이나 비용을 감소시키기 위하여 정상사용조건에서 얻어진 고장모드와 고장 메커니즘의 분석이 선행된 후 이를 가속시킬 수 있는 스트레스와 스트레스 수준을 통해 정상사용조건에서의 수명을 예측하는 시험이다.[10,11,12]

일정한 범위 내에서 스트레스 수준이 증가하더라도 시스템이나 부품의 고장모드와 고장메커니즘은 변화되지 않기 때문에, 고장모드와 고장메커니즘이 변화하지 않는 범위 내에서 가속수명시험을 수행할 수 있다. 다시 말해 가속 수명 시험은 사용조건 보다 가혹한 스트레스(온도, 습도, 전압 등) 수준에서 시험하여 시스템이나 부품의 고장을 가속화 시키고, 가속 조건에서 관측된 고장 데이터를 분석하여 추정된 수명-스트레스 관계식을 사용 조건으로 외삽(extrapolation)하여 사용 조건에서의 수명을 정확하게 추정하기 위한 시험이다. [Figure 1]은 가속 수명 시험의 개념을 나타낸 것이다.



[Figure 1] Concept of ALT

가속 수명 시험의 수학적 정의는 다음과 같다. Td를 사용 조건에서의 수명, Ta를 가속 조건에서의 수명이 라 하면 $T_d=AF \times T_a$ 이다. 이때 AF(accelerated factor)를 가속 계수라 한다.

2.3.1 가속 수명 시험의 실시 절차

1) 고장 메커니즘의 선정

가속 수명 시험에서 가속시킬 고장 메커니즘을 선정한다. 하나의 부품이 여러 고장 메커니즘들이 존재할 수 있지만 고장 분석을 통하여 문제가 되는 과정을 단일 고장 메커니즘으로 취급하여 선정한다.

2) 가속 스트레스의 결정

고장 메커니즘을 가속할 수 있는 스트레스를 결정한다. 고장 물리 이론에 근거하여 또는 가속 수명 시험에 대한 기존의 연구 결과를 조사하여 스트레스에 대한 정보를 수집하는 것이 필요하다. 단, 단일 스트레스가 여러 고장 메커니즘에 동시에 영향을 미칠 수 있다. 시험의 목적과 관계없는 고장 메커니즘을 도입하지 않도록 가속 스트레스가 선정되어야 한다.

3) 가속 스트레스 범위 결정

고장 메커니즘의 일치성이 성립하는, 즉 사용 조건의 고장 메커니즘이 변하지 않는 가속 스트레스의 범위를 결정한다. 가속 스트레스의 범위는 유리전이 온도, 용융 온도, 항복 강도 등 재료의 물성에 의해 결정되며, 통상 동작 한계(operating limit)와 일치한다. 만일 동작 한계를 모르면 계단형 스트레스 시험과 같은 예비 시험을 실시하여 이를 확인할 필요가 있다.

4) 시험 조건 결정

가속 스트레스 수준을 선정하거나 여러 스트레스의 수준들을 조합하여 시험 조건을 결정한다. 각 스트레스 별로 2~3개의 수준을 선정하는 것이 일반적이며, 2개 이상의 스트레스 수준들을 조합할 때 직교 배열표를 활용하여 시험 조건의 수를 최소화할 수도 있다.

5) 시료의 수 결정과 배분

가속 수명 시험에 필요한 총 시료 수를 결정하고, 각 시험 조건에 배분한다. 시료 수는 사용 조건에서의 평균 수명 또는 B10 수명(전체 제품중 10%가 고장나는 시간) 추정의 정확성(분산)을 기준으로 하여 결정할 수 있지만, 일반적으로 데이터 분석을 위하여 필요한 5개 이상의 시료를 각 시험 조건에 배치하는 것이 바람직

하다. 시료는 각 시험 조건에 균등하게 배분하는 것보다 가속도가 낮은 조건에 더 많이 배분하는 것이 데이터 분석의 정확성을 높일 수 있다.

6) 가속 수명 시험 실시

가속 수명 시험을 실시하고, 데이터를 수집한다. 어떤 고장 메커니즘으로 한하여 고장이 발생하였는지를 확인하기 위하여 시험 중 고장 분석이 수행되어야 한다. 그리고 고장 모드와 메커니즘이 사용조건에서 발생하는지를 확인하기 위한 조사가 되어야 한다.

7) 데이터 분석 및 가속 시험 모형 개발

가속 수명 시험 모형(수명 분포와 수명-스트레스 관계)을 가정하고 데이터를 분석하여, 각 시험 조건에서의 수명 분포의 모수와 수명-스트레스 관계를 추정한다. 이때 수명 분포의 적합성과 시험 조건 사이의 가속성을 검증하는 것이 필요하다.

① 수명 분포의 모수 추정

각 시험 조건에서 수명분포의 모수를 추정한다. 추정 방법으로는 그래프에 의한 방법(graphical method), 최소 제곱법(least squares method), 최우 추정법(Maximum Likelihood Estimation method : MLE) 등이 있다. 일반적으로 최우 추정법을 이용하여 수명 분포의 모수를 추정한다. 최우 추정법은 주어진 데이터의 발생 가능성(likelihood)을 가장 크게 하는 모수를 찾아내는 방법이다. 모집단이 어떤 종류의 확률 분포를 하는지 알고 있을 때, 실제 관찰된 데이터의 발생 확률이 가장 큰 모수를 추정하는 것이다.

② 수명 분포의 적합성 검증

가속 수명 시험 모형에서 가정한 수명 분포의 적합성을 검증한다. 여기에서 분포의 적합성이란 시험 데이터가 가정한 수명 분포를 따른다고 가정할 수 있는지 통계적으로 판단하는 것이다.

분포의 적합성을 판정하는 방법은 확률 용지 위에 타점된 고장 시간 데이터들이 직선에 가깝게 놓여 있으면 수명 분포가 적합하다고 볼 수 있다. 통계학의 가설 검정 이론에 기초한 분포의 적합성 검정 방법에는 Chi-square 검정, Kolmogorov-Smirnov 검정, Anderson-Darling 검정 등이 있다.

8) 사용 조건에서의 수명과 가속 계수 추정

추정된 수명-스트레스를 사용 조건으로 외삽하여 사용 조건에서의 수명을 추정한다. 또한 사용 조건과 특정 가속 조건 사이의 가속 계수를 추정한다. 가속 계수를 알고 있으면, 가속 조건에서만 시험을 하여 사용 조건의 수명을 보증 할 수 있다.

9) 유효성 검증

수명-스트레스 관계와 가속 계수의 유효성은 지속적으로 검증되어야 한다. 유효성 검증의 한 가지 방법은 필드 데이터와 비교하는 것이다.

2.3.2 가속 수명 시험 모형(Accelerated life test model)

가속 수명 시험은 실제 사용 조건보다 가혹한 스트레스 조건(가속 조건)에서 시험하여 시료의 고장을 촉진시키고, 가속 조건에서 관측된 데이터를 분석하여 수명-스트레스 관계를 추정하며, 이를 사용 조건으로 외삽하여 사용 조건에서의 수명을 추정하기 위한 시험이다. 가속 수명 시험 데이터를 분석하여 사용 조건의 수명을 추정하기 위해 필요한 a) 수명 분포와 b) 수명-스트레스 관계(life-stress relationship)를 가속 수명 시험 모형이라 한다.[12]

일반적으로 지수, 와이블, 대수 정규 분포가 수명 분포로 널리 사용되며, 가속 수명 시험에서 널리 사용되는 수명-스트레스 관계는 아레니우스, 역승, 아이링, 일반화된 아이링 등이 있다. 한편 수명은 수명 분포를 갖는 확률 변수이므로, 수명-스트레스 관계는 분포의 모수와 스트레스의 관계로 나타낸다

1) 아레니우스 관계(Arrhenius relationship)

아레니우스 관계는 화학 반응에 의한 열화 고장을 모형화하는 수명-스트레스 관계식으로, 온도에 의한 가속 수명 시험에서 널리 사용된다. 스트레스에 의해 가속되는 수명 분포의 모수를 $\xi(T)$ 라 할 때, 아레니우스 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\xi(T) = A \cdot \exp\left\{\frac{E_a}{kT}\right\}$$

여기에서 E_a 는 활성화 에너지(activation energy)(단위: eV), k 는 볼츠만 상수(8.671 10⁻⁵eV/°C), T 는 절대 온도(섭씨 온도 + 273.16), A 는 재료의 물성과 시험 조건에 따른 상수이다. 활성화 에너지 E_a 는 반응에 고유한 상수이며, 정상 상태에서 열화 상태로 이행에 요구되는 에너지의 크기를 나타낸다. 활성화 에너지는 고장 메커니즘과 재료에 따라 다르다.

아레니우스 관계에서 가속 계수는 다음과 같다.

$$AF = \frac{\xi(T_d)}{\xi(T_a)} = \exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_a}\right)\right]$$

여기에서 T_d 는 사용 조건에서의 수명,
 T_a 는 가속 조건에서의 수명.

2) 일반화된 아이링 관계(Generalization Eyring relationship)

일반화된 아이링 관계는 온도와 다른 스트레스(습도, 전압, 전류 등)를 함께 인가하는 가속 수명 시험에서 사용되는 수명-스트레스 관계식이다. 일반화된 아이링 관계에서 수명 분포의 모수 $\xi(T)$ 와 절대 온도(T), 온도 이외의 스트레스(V)의 관계는 다음과 같다. 여기에서 A, B, C, D 는 재료, 구조 및 시험 방법 등에 따른 상수이다.

$$\xi(T, V) = \left(\frac{A}{T}\right) \cdot \exp\left[\frac{B}{kT}\right] \cdot \exp\left[V \left[C + \left(\frac{D}{kT}\right)\right]\right]$$

2.3.4 가속 수명 시험법

ECM에 대한 가속 수명 시험을 위해 고려해야 할 사항으로는 다음과 같은 항목에 대한 구체적 정의가 제시되어야 한다. ①무엇을 평가할 것인가?(재료, 공정) ②시험 조건(온도, 상대습도, 전압, 시간) ③시험장비 ④시료 수와 판정기준 ⑤평가 방법

또한 시험을 수행하는데 있어 평가하는 방법에는 제품의 특성이나 시험규격, 제조회사에 따라 여러 가지 시험방법이 있다. 예를 들어 물방울 시험(water drop test)은 초가속 시험조건으로 수지상이 수초에서 몇 분 사이에 국부적으로 발생, 성장한다. 그러나 동일한 시험을 환경시험용 항온항습 챔버를 이용하여 하는 경우 수지상의 성장속도는 매우 느리다. 따라서 제품에 따라 적절한 시험방법을 적용하여야 할 것이다. 다음은 각종 ECM을 평가 하기 위한 가속 시험 규격에 대해 정리하였다.[2,5,7]

1) 항온항습을 이용한 시험 방법

IPC-TM 650. Method 2.6.14에서 제안하는 시험 방법으로 항온항습챔버를 사용하여 민감도를 평가하는 방법이며 “Resistance to electrochemical migration, Polymer solder mask”에 대한 시험이다. 이 시험은 높은 인가전압을 사용하므로 전압이 가속되는 조건이며, 물방울 시험방법에 비해 장시간 소요된다.

-시험목적: Polymer solder mask에서 전기화학적 이온 마이그레이션에 대한 저항성 평가

-시험조건:

- 1) 85°C, 90%RH, 500HR, 10V bias
- 2) 85°C, 85%RH, 168HR, 100V bias

-시료: IPC B-25A

-시료수: 3개

- 평가기준: 누설전류를 저항으로 변환하여 발생시간을 측정
- 평가방법: 누설전류를 측정하여 평가하고, 육안검사로 필라멘트 성장을 검사

2) 불포화형 가압시험

고온에서 습도 제어가 가능한 챔버를 이용하여, 주로 반도체 Package에서 이용하는 시험방법이다. 수분을 EMC(Epoxy Mold compound)와 같은 플라스틱으로 봉재된 시료에 침투시키기 위하여 가압을 이용하는 방법으로 항온항습을 이용한 시험보다 온도, 습도에 대한 스트레스가 가혹한 조건이다. JEDEC 규격인 JESD22-A110C “Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test(HAST)”의 시험 조건은 아래 <Table 1>과 같다.

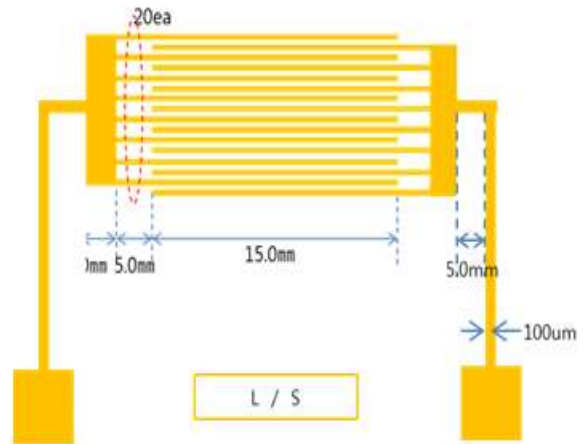
<Table 1> Highly Accelerated Stress Test

Temperature(°C)	Humidity (%)	Temperature(°C)	Pressure	Durati on(hr)
130±2	85±5	124.7	230	96
110±2	85±5	105.2	122	264

위에서 설명한 바와 같이 여러 가속 시험이 제안되고 있지만 가장 중요한 것은 제품의 사용 환경 조건에 적절히 맞아야 하며, 과도한 오버 스트레스가 인가되면 제품의 신뢰성 평가를 위한 시험의 목적에 일치하지 않을 수 있기 때문에 주의해야 한다. 따라서 본 연구의 실험 조건은 위의 내용 중에서 Packaging Substrate의 특성에 맞도록 항온 항습 조건(85°C /85%RH)과 불포화형 가압시험 조건을 고려하여 결정하였다.

3. Packaging Substrate에 대한 가속 수명 실험

실험용 시편은 IPC에서 추천하는 빗살무늬 콤 패턴(comb pattern) 디자인을 이용하였으며, FC-BGA에 적용되는 Primer layer를 사용하고 미세 회로 공법인 SAP(semi-additive process)를 적용하여 회로 폭/간격은 20/20µm, 15/15µm, 10/10µm의 3종류로 제작하였으며 평가 회로 부분은 DFSR(dry film solder resist)로 절연을 하여 [Figure 2]와 같이 제작 하였다. 제작된 시료의 회로/간격의 확인을 위해 SEM(전자현미경) 분석을 통해 검증하였다.



[Figure 2] Design of Sample

시험 조건은 ECM 가속 모델 및 수명 연구를 위해 가속 스트레스 인자인 온도, 습도를 고려하고, IPC(The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit) 및 JEDEC(Joint Electron Device Engineering Council)의 시험 규격을 참고하여 <Table 2>와 같이 결정하였다. 온도, 습도 외의 인자인 인가전압은 15V, 측정 전압은 50V로 동일 조건으로 인가하였다. 연속 절연 저항 측정 시스템을 이용하여 연속적으로 절연 저항을 측정하였고 각 조건 별로 1,000시간 진행하였으며 시료 수는 각 조건 별로 20개의 시편에 대한 시험을 진행하였다. 단, 시험조건 1과 5는 동일 조건이므로 한번의 시험만 진행하였다.

<Table 2> Accelerated Test Condition on Stresses

온도가속			습도가속		
조건	온도	습도	조건	습도	온도
1	85°C	85%RH	4	80%RH	85°C
2	110°C		5	85%RH	
3	130°C		6	90%RH	

고장 판정 기준은 연속하여 절연저항 값을 측정하여 ECM발생으로 인한 초기 저항치 대비 1 지수 이상 절연 열화되거나, 1MΩ 이하의 값이 측정되는 시간을 고장 발생 시간으로 규정하였다. 단 시험 중 절연저항 값이 회복되는 것은 고장에서 제외하였다.

ECM을 위한 실험은 환경 조건을 인가하기 위한 환경챔버와 실시간 절연저항을 측정하는 장비로 구성하였다. 환경챔버는 고온 고습용 환경시험 챔버와 가속 스트레스에 따른 가혹한 환경을 위한 초가속 스트레스

시험 챔버(high accelerated stress test : HAST) 시스템을 사용하였다. 실시간 절연저항 측정 및 저항 값을 모니터링 하기 위한 장비는 일본 ESPEC社의 Ion Migration Evaluation System(AMI)을 사용하였다. 시험 챔버와 절연저항 측정 시스템과의 연결된 모양은 [Figure 3]과 같다.



[Figure 3] Chamber, HAST Chamber and AMI

4. 실험 결과 및 신뢰도 예측

4.1 시험 결과

4.1.1 ECM 발생시간 측정 결과

시험 결과는 가속시험 조건을 수행하는 동안 Ion migration evaluation system으로 실시간으로 매 6분마다 회로간 절연저항을 측정하였다. 초기 절연저항 값은 $1.0 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^9 \Omega$ 수준으로 유사하게 측정되었다. 절연저항이 고장 정의 기준 이하로 감소되는 경우를 ECM발생시간으로 기록하였다. 시험 조건1(85°C/85%RH)의 실험 결과 약 700시간 경과 후에 최초 고장이 발생하였으며 시험 기간인 1,000시간 동안 20개의 시료 중에서 7개만 고장 발생하였다. 나머지 시험 조건에서는 20개 시료 모두 1,000시간 동안 고장이 발생하였다. 시험 조건 별로 시료 모두 고장이 발생한 경우는 시험을 중단하였다. 6가지 조건의 가속시험을 통해 구한 결과는 <Table 3>과 <Table 4>와 같이 정리하였다.(단, 시험 조건 1와 5는 스트레스가 동일하기 때문에 1회 시험으로 조건1의 결과를 조건5에 동일하게 적용하였다.)

<Table 3> Failure Time on Temperature

온도 가속에 따른 고장 시간 (hr)			
	조건1	조건2	조건3
No.	85°C / 85%RH	110°C / 85%RH	130°C / 85%RH
1	729.6	254.9	124.3
2	744.6	268.4	129.6
3	799.8	278.5	134.8
4	853.2	289.2	170.2
5	914.5	291.4	176.8
6	974.9	304.2	193.9
7	992.3	311.3	201.2
8	1000	326.7	208.5
9	1000	337.1	210.0
10	1000	352.7	213.4
11	1000	378.1	219.5
12	1000	389.1	229.7
13	1000	421.6	234.0
14	1000	424.3	236.0
15	1000	430.7	240.2
16	1000	437.2	244.8
17	1000	441.4	248.2
18	1000	460.8	254.8
19	1000	473.5	255.9
20	1000	484.5	261.9

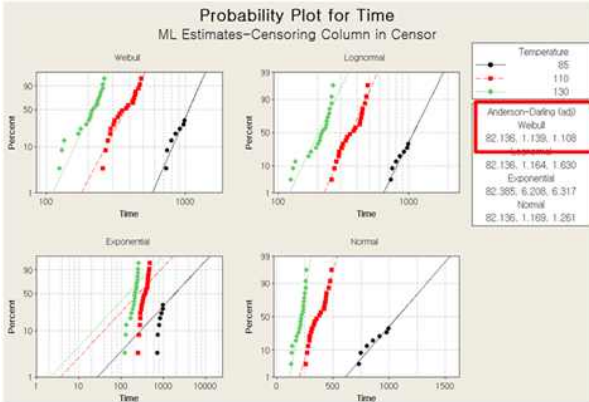
<Table 4> Failure Time on Humidity

습도 가속에 따른 고장 시간 (hr)			
	조건4	조건5	조건6
No.	110°C / 80%RH	110°C / 85%RH	110°C / 90%RH
1	304.8	254.9	194.5
2	317.2	268.4	197.6
3	341.5	278.5	205.4
4	349.7	289.2	212.3
5	375.1	291.4	220.7
6	411.6	304.2	222.3
7	413.9	311.3	224.5
8	424.3	326.7	249.5
9	425.7	337.1	256.8
10	445.6	352.7	270.4
11	458.4	378.1	282.7
12	470.5	389.1	288.7
13	480.3	421.6	294.6
14	497.5	424.3	307.1
15	527.4	430.7	318.3
16	545.2	437.2	324.1
17	549.8	441.4	338.7
18	556.7	460.8	345.4
19	561.9	473.5	358.9
20	567.2	484.5	362.2

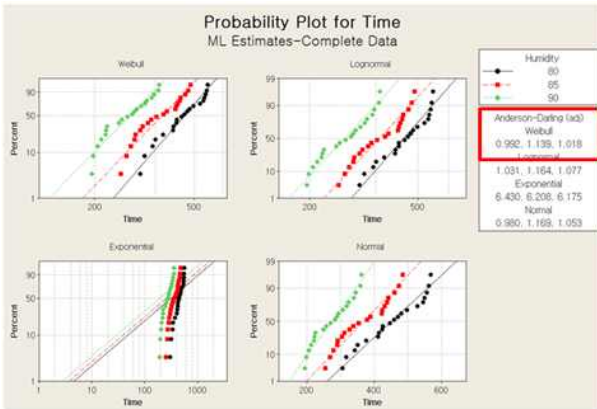
4.1.2 고장 데이터 분석 결과

1) 분포의 적합성 검정

가속수명 시험의 결과를 온도, 습도 각각 가속 스트레스 수준 별로 Minitab 소프트웨어의 Anderson-Darling 검정 방법을 이용하여 수명 및 고장 분포에 대한 분포 적합성을 검증 하였으며, 그 결과 온도, 습도에 대한 검증은 [Figure 4]와 [Figure 5]와 같이 Anderson-Darling 값이 가장 작은 분포인 와이블 분포가 가장 적합한 것으로 판단되었다.



[Figure 4] Anderson-Darling Fitness Test on Temperature



[Figure 5] Anderson-Darling Fitness Test on Humidity

2) 수명 분포의 모수 추정 및 가속성 검증

각 시험 조건에서의 모수를 추정하기 위해 가속 수명 시험에서 주로 사용되는 최우 추정법을 이용하였다. 그 결과 각 시험 조건에서 발생된 고장 데이터의 신뢰도 95%에서 B10수명(전체 시료 중 10%가 고장 나는 시간) 및 형상 모수(β)와 척도 모수(α)를 <Table 5>와 <Table 6>과와 같이 추정하였다.

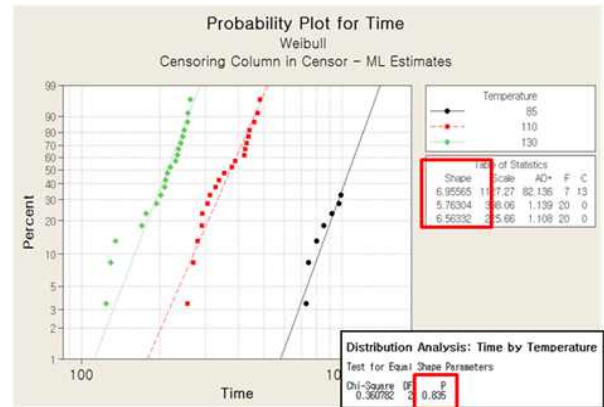
<Table 5> Life Time Parameter on Temperature

온도가속 시험 조건	B10수명	형상모수(β)	척도모수(α)
85°C, 85%RH	815.679	6.956	1127.27
110°C, 85%RH	269.376	5.763	398.06
130°C, 85%RH	160.158	6.563	225.66

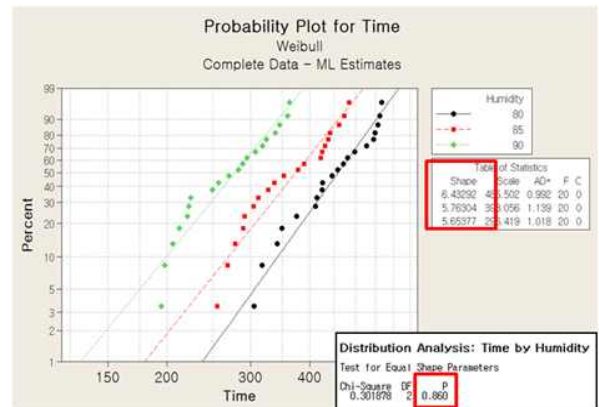
<Table 6> Life Time Parameter on Humidity

습도가속 시험 조건	B10수명	형상모수(β)	척도모수(α)
110°C, 80%RH	342.189	6.433	485.502
110°C, 85%RH	269.376	5.763	398.056
110°C, 90%RH	199.087	5.653	296.419

또한 가속 시험 조건 사이의 가속성 성립 여부를 검증하였다. 가속성이 성립하면 와이블 확률 용지에 표시된 각각의 가속 조건의 수명 분포 추정선의 기울기(와이블 분포에서의 형상모수(β))가 같게 된다. 따라서 확률 용지에 표시된 각 시험 조건의 회귀선이 평행하면, 가속성이 성립한다고 판단한다. 본 시험의 data를 Minitab 소프트웨어를 이용하여 분석한 결과, [Figure 6]과 [Figure 7]과 같이 형상 모수(수명 자료 기울기)가 유사(평행)하게 관찰되어 가속성이 성립한다고 할 수 있다. 또한 소프트웨어에서 자동으로 계산되어 지는 P-Value값이 유의수준보다 높기 때문에 가속성이 성립한다고 판단할 수 있다[14].



[Figure 6] Weibull Acceleration Test on Temperature

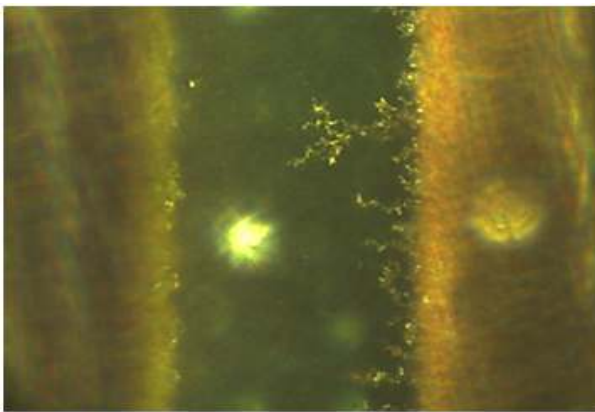


[Figure 7] Weibull Acceleration Test on Humidity

4.2 고장 분석

ECM 가속 수명 시험 및 와이블 분석을 통해 가속성 성립을 확인 후 고장 발생 시료에 대한 고장 분석을 실시하였다. 고장 분석은 고장 발생된 시료에 대한 회로/간격 사이에서의 dendrite 발생을 관찰함으로써, ECM의 발생에 대한 검증을 수행하였다. 분석방법은 광학현미경을 이용하여, 시료 표면의 회로 사이에서 형성된 dendrite의 형태를 관찰 및 분석하였고, dendrite가 관찰된 일부 시료는 전자 현미경 (SEM: Scanning Electron Microscopy)과 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)를 이용하여 정밀 분석 및 성분 분석하였다. 고장 분석 결과 모든 시료에서 [Figure 8]과 같이 회로와 회로 사이에서 침상(Tree like dendrite)의Cu가 발생된 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서 본 절연 저항의 감소가 dendrite 형성에 의한 것임을 확인 할 수 있었다.

Dendrite 형성의 메커니즘을 확인 해보기 위해 EDX를 이용하여 여러 시료에서 발생한 dendrite의 성분을 분석한 결과 동일하게 Cu성분을 확인 할 수 있었다. 즉, 각각의 가속 시험 조건 사이에 동일한 메커니즘인 ECM중 dendrite growth에 의한 고장이 발생되었음을 확인하였다.



[Figure 8] Dendrite

4.3 사용 수명 예측

4.3.1 일반화된 아이링식을 이용한 모델링

Electrochemical Migration에 의한 절연 저항 열화는 아레니우스 반응속도론을 발전시켜 온도, 습도, 전압 이외의 스트레스의 영향도 고려한 식(1)과 같은 일반화된 아이링(Eyring)식을 가정한다[12].

$$\xi(T, V) = \left(\frac{A}{T}\right) \cdot \exp\left[\frac{B}{kT}\right] \cdot \exp\left[V\left[C + \left(\frac{D}{kT}\right)\right]\right] \quad (1)$$

A,B,C,D는 재료 및 시험에 따른 상수
 T: 절대온도
 V: 온도 이외의 스트레스

이때 스트레스로 온도, 습도를 고려한 수명은 다음 식(2) 같이 표현될 수 있다[7].

$$L(T, RH) = \left[C \times \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right)\right] \times \left[D \times \exp\left(\frac{f}{RH}\right)\right] \quad (2)$$

L: 수명
 C,D: 비례정수
 Ea: 온도 계수(상수, 활성화에너지)
 f: 습도 계수(상수)
 k: 볼츠만 상수(8.61710⁻⁵eV/K)
 T: 절대 온도
 RH: 상대 습도

또한, 위의 식은 아레니우스 모델 × 아레니우스 모델 형태의 식으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 위의 식(2)로부터 각각의 습도 및 온도에 의한 상수를 구하기 위해 실사용 조건과 시험조건을 동일하게 할 경우 다음과 같은 온도계수를 도출하는 식(3)과 습도계수를 구하기 위한 식(4)을 도출할 수 있다.

$$K = \exp\left(f\left(\frac{1}{RH_{field}} - \frac{1}{RH_{test}}\right)\right) \quad (3)$$

$$K = \exp\left(\frac{Ea}{k}\left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right) \quad (4)$$

가속시험과 실사용 조건에서 부여된 스트레스의 비율, 가속계수(AF)는 고장 시간의 비율이고, 실사용 조건하에서의 제품의 사용시간 수 L(field)에 해당하는 스트레스 시간은 다음의 식(5)과 같이 표현될 수 있으며, 이 식으로부터 ECM에 대한 수명 L과 가속계수(AF)를 도출할 수 있다.

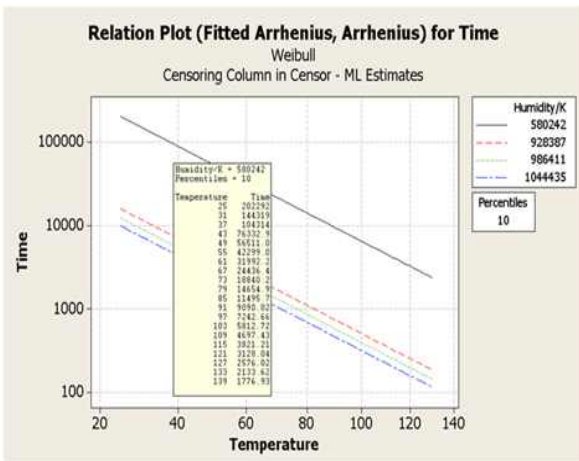
$$L_{test} = \frac{L_{field}}{AF} \quad (5)$$

4.3.2 가속 수명시험과 사용 수명과의 관계

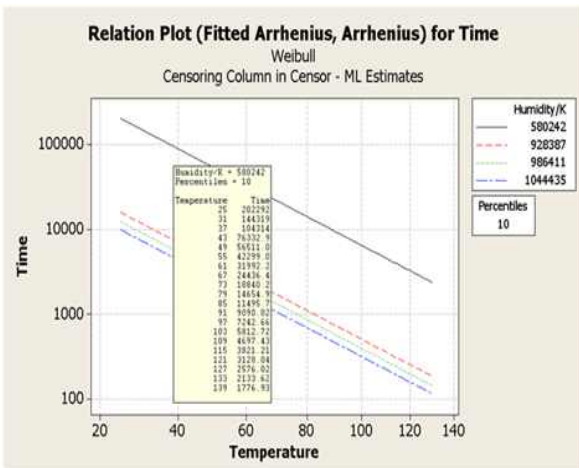
1) 수명-스트레스 관계 추정

온도와 습도 두 가지의 가속 시험 조건 사이의 가속성 성립 여부를 확인한 후 가속 수명 시험 모형을 위

와 같이 일반화된 아이링(Eyring) 관계로 가정하고 데이터 분석을 minitab 소프트웨어를 이용하여 최우 추정 방법으로 추정하였다. Minitab 소프트웨어에는 아이링 모델을 바로 적용할 수가 없으나, 본 시험의 온도, 습도 스트레스에 대한 관계식이 아레니우스 모델 × 아레니우스 모델 형태이기 때문에 아레니우스 모델을 두 가지 가속 변수로 적용하여 분석을 하였다. 이 때 아레니우스 모델을 적용하기 위해 습도에 대한 조건은 볼츠만 상수(k)로 나누어진 값으로 계산하였다. 아래의 [Figure 9]와 [Figure 10]과 같이 추정된 수명-스트레스 관계를 추정하였다.



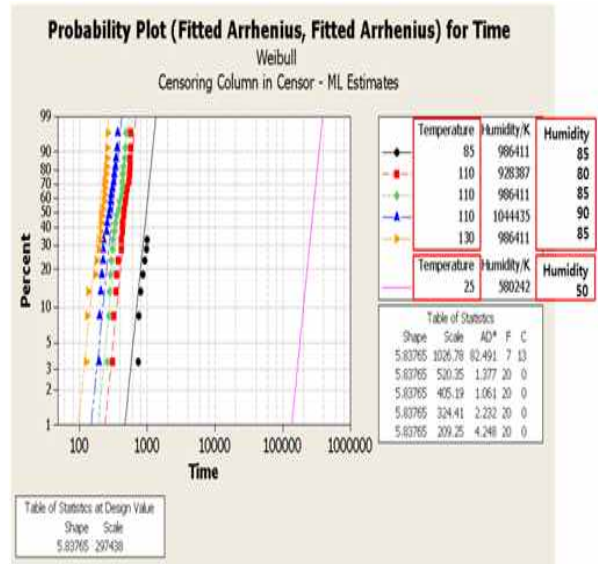
[Figure 9] Temperature Stress-Life Time Relation



[Figure 10] Humidity Stress-Life Time Relation

2) 사용 조건 수명 및 가속 계수 예측

추정된 수명-스트레스 관계식에 사용 조건의 스트레스 값을 외삽하여 사용 조건(25°C, 50%RH)에서의 수명을 [Figure 11]과 같이 추정하였다.



[Figure 11] Life Time Distribution

위 분포의 형상 모수는 5.83765로 추정되었으며, 온도, 습도 스트레스 수준별 95% 신뢰 구간에서의 척도 모수 및 B10수명의 추정값은 <Table 7>과 같으며, 사용 조건 25°C, 50%RH에서의 척도 모수는 297,421(hr), B10수명은 202,292시간(hr)으로 추정되었다.

<Table 7> Parameter(a) and B10 Life Time

	조건	척도모수	B10(hr)
1	25°C / 50%RH	297421	202292
2	85°C / 85%RH	1026.78	698.33
3	110°C / 80%RH	520.35	353.89
4	110°C / 85%RH	405.19	275.48
5	110°C / 90%RH	324.41	220.64
6	130°C / 85%RH	209.25	142.32

온도, 습도 Stress-수명 관계를 가정한 일반화된 아이링(Eyring)식에서 온도와 습도 조건을 고려한 식을 이용하여 사용 조건 25°C, 50%RH에서의 수명을 구하면 다음과 식(6)과같이 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L(T, RH) &= \left[C \times \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \times \left[D \times \exp\left(\frac{f}{RH}\right) \right] \right] \\
 &= A \cdot \exp\left(\frac{Ea}{kT_{Field}}\right) \cdot \exp\left(\frac{f}{RH_{Field}}\right) \\
 &= \exp(-11.3199) \exp\left(\frac{0.439}{(8.6171 \times 10^{-5})(25 + 273.15)}\right) \cdot \exp\left(\frac{340.381}{50}\right) \\
 &= 289186.8691
 \end{aligned}$$

(6)

(Ea=0.439 (온도계수), f=340.381, lnA=-11.3199)

또한 사용 조건과 특정 가속 조건의 수명을 비교하여 온도, 습도 수준별 가속 계수를 식(7)을 이용하여 <Table 8>과 같이 추정하였다

$$\begin{aligned}
 AF &= \frac{L_{Field}}{L_{Test}} \\
 &= \left[A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_{Field}}\right) \cdot \exp\left(\frac{f}{RH_{Field}}\right) \right] / \left[A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_{Test}}\right) \cdot \exp\left(\frac{f}{RH_{Test}}\right) \right] \\
 &= \left[\exp\left(\frac{E_a}{k}\right) \left(\frac{1}{T_{Field}} - \frac{1}{T_{Test}}\right) \right] \times \left[\exp(f) \left(\frac{1}{RH_{Field}} - \frac{1}{RH_{Test}}\right) \right] \\
 &= \left[\exp\left(\frac{0.437}{8.6171 \times 10^{-5}}\right) \left(\frac{1}{25+273.15} - \frac{1}{T_{Test}}\right) \right] \times \left[\exp(340.663) \left(\frac{1}{50} - \frac{1}{RH_{Test}}\right) \right] \quad (7)
 \end{aligned}$$

<Table 8> Accelerated Factor

	조건	가속 계수
1	25°C / 50%RH	1
2	85°C / 85%RH	289.6
3	110°C / 80%RH	571.58
4	110°C / 85%RH	734.03
5	110°C / 90%RH	916.81
6	130°C / 85%RH	1421.37

항온항습 챔버를 이용한 85°C / 85%RH 조건에서의 가속시험은 실제 사용 환경인 25°C / 50%RH에서의 약 300배 수준이며, 가압챔버를 이용한 불포화시험 130°C / 85%RH에서의 가속시험은 약 1400배 이상의 가속 시험임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 PCB(인쇄회로기판) 중 고밀도, 고직 접화 되어서 사용되는 Packaging Substrate의 가속 수명 시험을 통해 실제 사용 환경에서의 수명을 예측하였다. Packaging Substrate에서 발생하는 고장 중 고온, 고습 환경에서 전압인가에 의해 발생하는 ECM(Electrochemical Migration) 현상에 대하여 종류 및 발생메커니즘을 조사 연구하였으며, 온도와 습도와 관련된 수명분포 및 수명-Stress 관계식, 가속 시험 방법에 대해 조사하고 가속 시험 조건을 결정하였다.

Packaging Substrate의 Fine Pattern 제조방법인 SAP(Semi-Additive Process)공법을 적용한 회로/폭, 20/20 평가 시료를 제작하여, 온도와 습도를 스트레스로 선정하여 가속시험을 5가지 조건으로 시행하여 고장시간 data를 수집하고, 고장을 파괴 분석한 결과 고

장모드는 절연 열화(절연저항 감소), 고장 메커니즘은 ECM인 Dendrite growth임을 SEM과 EDX를 이용하여 확인하였다.

가속 수명 시험 설계 이론을 근거로 가속시험에서 수집된 각 시험 조건별 data에 적합한 수명분포와 수명-stress관계를 Minitab 소프트웨어를 이용하여 Anderson-darling법으로 검정한 결과, 와이블 분포와 일반화된 아이링(Eyring) 모델이 적합한 것을 확인하였다. 또한 각 시험조건에서의 모수를 최우추정법을 이용하여 추정하였으며, 가속 수명 시험 조건 사이에 가속성이 성립하는지 검정하고, 수명-Stress 관계를 추정, 검정하였다. 분석된 수명-Stress data를 외삽하여 사용 환경인 25°C, 50%RH에서 B10수명을 예측한 결과 신뢰수준 95%에서 202,292시간(hr)으로 추정 되었다. 즉, 실제 사용 환경에서 약 23년이 지난 시점에서 10%가 ECM으로 인한 고장이 발생됨을 예측할 수 있었다. 또한 이때의 가속 계수를 산출하여 항온항습 챔버를 이용한 85°C / 85%RH 조건에서의 가속시험은 실제 사용 환경인 25°C / 50%RH에서의 약300배 수준이며, 가압 챔버를 이용한 불포화시험 130°C / 85%RH에서의 가속 시험은 약 1,400배 이상의 가속 시험임을 알 수 있었다.

전자부품의 경박 단소화 및 고집적화에 따라 인쇄회로기판(PCB) 내부의 회로간의 간격이 점점 줄어들게 됨으로서, 이에 따라 전류, 전압, 습도, 환경 등과 복합적으로 연관된 새로운 신뢰성 문제들이 인쇄회로기판 및 칩 패키지 신뢰성에 많은 영향을 주게 되었다. 특히 Package Substrate PCB에 Fine Pattern이 적용되면서 발생하는 ECM 고장에 대해 사용 환경에서의 수명 예측 등 신뢰성 척도에 관한 연구는 부족한 현실이며 명확한 신뢰성 평가 방안이 제시 되지 않고 있다. 이는 정상 환경에서의 스트레스(온도, 습도 등)를 이용한 수명시험은 시간이 많이 소요되어 개발된 제품에 대한 신속하고 정확한 신뢰도 예측을 어렵게 하고 있다. 본 논문에서는 가혹한 환경에서의 스트레스를 이용한 가속수명시험을 통해 시간이 많이 소요될 수 있는 정상 환경에서의 스트레스를 이용한 수명시험을 대신하여 제품사용에 대한 수명을 예측하는 방법론을 제시하는 것이다. 본 연구에서 기술한 가속 수명 시험 이론과 실제 실험 데이터를 분석한 가속 수명 분포 및 수명-Stress 관계를 이용하면 실제 사용 조건에서의 수명 예측을 보다 신속하고 정확하게 할 수 있으며, 궁극적으로 높은 수준의 신뢰도 예측이 가능한 제품 설계 및 개발이 신속히 이루어지는 효과를 기대할 수 있다.

6. 참고 문헌

- [1] IPC(1997), "IPC-TR-476A Electrochemical Migration", the Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit.
- [2] IPC(1997), "IPC-TM-650 Test Methods Manual", the Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit.
- [3] Dong-Kyu Jang and Myong-Yu Choi (2009), "Printed Circuit Board", Sung-an-dang.
- [4] M.B. Bever(1987), "M.G. Fontana Corrosion Engineering, 3rd ed.", McGraw-Hill, NewYork, 41.
- [5] Won-Sik Hong(2005), "Study on the Metallic Ion Migration Phenomena of PCB", Korean journal of Material Research, 15(1):35-40.
- [6] Shin-Bok Lee(2005), "Influence of Polarization Behaviors on the ECM Characteristics of Sn Pb Solder Alloys in PCB" Journal of the Micro-electronics & Packaging Society, 12(2):167-174.
- [7] Hirokazu(2012), "Introduction of Reliability Test Technology for Electronics Package", Journal of the Microelectronics & Packaging Society, 19(1):1-7.
- [8] Ja-Young Chung(2007), "The Study on the Correlation of Polarization Behaviors on the Electrochemical Migration Characteristics of Sn Pb Solder Alloys ", M.S. Thesis, Andong University.
- [9] Yi-Jang Kyun(1997), "Development of Effective Reliability Experiment Method on PCB by Quality Function Development Process", Ph.D. Dissertation, Hongik University.
- [10] KATS(2006), "KS A 5608-1 ALT - Introduction to Accelerated Life Testing", Korean Agency for Technology and Standards.
- [11] KATS(2006), "KS A 5608-1 ALT - Design of Accelerated Life Testing", Korean Agency for Technology and Standards.
- [12] KATS(2006), "KS A 5608-1 ALT - Data Analysis of Accelerated Life Testing", Korean Agency for Technology and Standards.
- [13] Young-Rock Chun and Do-Sun Bae(1999), "Reliability Analysis", Arkye.
- [14] Minitab(2000), "Data Analysis and Quality Tools", Minitab.

저자 소개

강대중



성균관대학교 화학공학과 학사 및 석사, 인하대학교 공학대학원 산업경영정보공학과 석사를 취득하였으며, 현재 대덕전자(주)에 재직하고 있다. 관심분야는 품질 경영, 신뢰성공학 등이다.

주소: 인천시 남구 용현동 253 인하대학교 산업공학과

이화기



서울대학교 원자핵공학과에서 학사를 취득하고, 미 Texas A&M 대학교 산업공학과에서 석사와 박사학위를 취득하였다. 현재 인하대학교 산업공학과 교수로 재직 중에 있으며, 관심분야는 생산 및 물류시스템의 일정계획, 시뮬레이션 등이다.

주소 : 인천시 남구 용현동 253 인하대학교 산업공학과