

가속수명시험을 이용한 블루투스 모듈의 수명 예측

손영갑* · 장석원¹ · 김재중¹

안동대학교 기계공학부, ¹한양대학교 신뢰성분석연구센터

Lifetime Estimation of a Bluetooth Module using Accelerated Life Testing

Young Kap Son*, Seog-Weon Chang¹ and Jae-Jung Kim¹

School of Mechanical Engineering, Andong National University

¹Reliability Analysis Research Center, Hanyang University

초 록: 본 논문은 블루투스 모듈의 구조 및 솔더접합부에 대한 신뢰성 평가에 국한된 기존의 방법을 확장하여 정량적인 신뢰성 평가를 수행한 결과를 나타낸다. Field 환경조건에서의 정량적인 신뢰성 평가를 위해, 온도 사이클링(temperature/thermal cycling)에서의 온도차를 가속스트레스로 선정하여 가속수명시험을 실시하였다. 가속수명시험을 통해 구한 고장시간 데이터들을 이용하여 수명분포 매개변수들을 추정하고 코핀-만슨(Coffin-Manson) 모델을 이용하였다. 가속수명시험을 수행한 결과, 블루투스 모듈의 고장모드는 Open, 고장메커니즘은 크랙(Crack)과 박리(Delamination)였다. Field에서 수거한 고장품들의 고장모드와 고장메커니즘이 가속수명시험을 통해 재현되었다. 또한 본 논문에서 블루투스 모듈이 Field에서 받을 수 있는 온도 사이클링에서의 다양한 온도차에 대한 정량적인 수명을 예측할 수 있는 방법이 제시되었다. 제안된 방법을 이용하여 온도차 70°C를 받고 있는 블루투스 모듈의 B₁₀ 수명은 약 4년으로 추정되었다.

Abstract: This paper shows quantitative reliability evaluations of a Bluetooth module through extending previous qualitative methods limited to structure reliability tests and solder joint reliability tests for Bluetooth modules. Accelerated Life Testing (ALT) of the modules using temperature difference in temperature cycling as an accelerated stress was conducted for quantitative reliability evaluation under field environment conditions. Lifetime distribution parameters were estimated using the failure times obtained through the ALT, and then Coffin-Manson model was implemented. Results of the ALT showed that the failure mode of the modules was open and the failure mechanisms are both crack and delamination. The ALT reproduced the failure mode and mechanisms of failed Bluetooth modules collected from the field. Further, a quantitative reliability evaluation method with respect to various temperature differences in temperature cycling was proposed in this paper. B₁₀ lifetime of the module for the temperature difference 70°C using the proposed method would be estimated as about 4 years.

Keywords: Bluetooth module, Crack, Delamination, Lifetime evaluation, Accelerated Life Testing(ALT), Coffin-Manson Model

1. 서 론

기존의 반도체의 경우 단일 칩 구조 또는 단순

멀티 칩 구조였지만, 자동차용 전자 센서나 전자 기기 및 휴대용 정보처리 장치에 사용되는 반도체의 다기능화 · 소형화 · 고밀도화 추세에 따라 다

*Corresponding author
E-mail: ykson@andong.ac.kr

양한 다수의 칩들을 한 개의 패키지로 구현하는 시스템 인 패키지(System in Package: SiP) 기술에 관한 많은 연구가 수행되고 있다. 또한, 저비용으로 좋은 전기적 성능과 높은 열방출 능력뿐만 아니라 환경적 스트레스들을 견딜 수 있는 기계적으로 안정된 구조를 구현할 수 있는 SiP 기술이 요구되고 있다.¹⁾

현재, SiP 기술을 응용한 소형화된 RF 수신 모듈인 블루투스 개발이 활발히 진행되고 있다. 블루투스 모듈은 무선 통신을 가능케 하는 일련의 칩과 안테나 등의 회로 집합체로 구성된다. 지금까지는 주로 블루투스 모듈의 설계 및 공정 개발에 관한 많은 연구가 수행되었으며, 특히 블루투스 모듈에 대한 신뢰성 평가는 낙하충격에 대한 구조신뢰성 평가와 온도 사이클링(temperature/thermal cycling)에 의한 솔더접합부 신뢰성 평가로 한정되어 수행되었다.^{1,2)} 그래서 블루투스 모듈의 수명예측에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

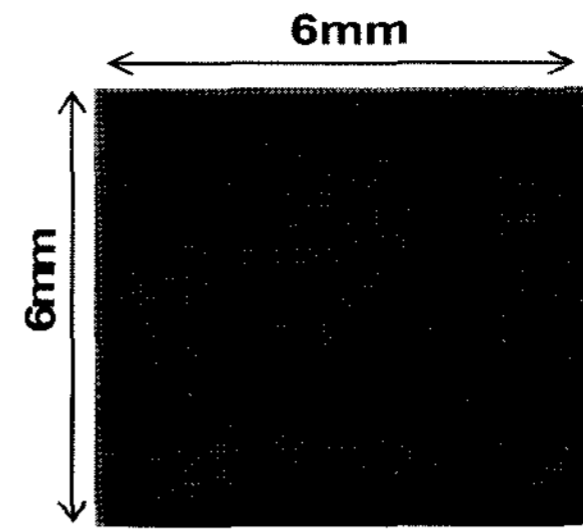
본 연구에서는 다양한 칩들이 한 개의 패키지로 구성된 블루투스 모듈을 대상으로 온도 사이클링에 대한 가속수명시험을 통해 고장분석을 수행하고, 분석된 고장모드 및 고장메커니즘에 대하여 정상 조건에서의 수명을 추정함으로써 블루투스 모듈의 정량적인 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 가속수명시험

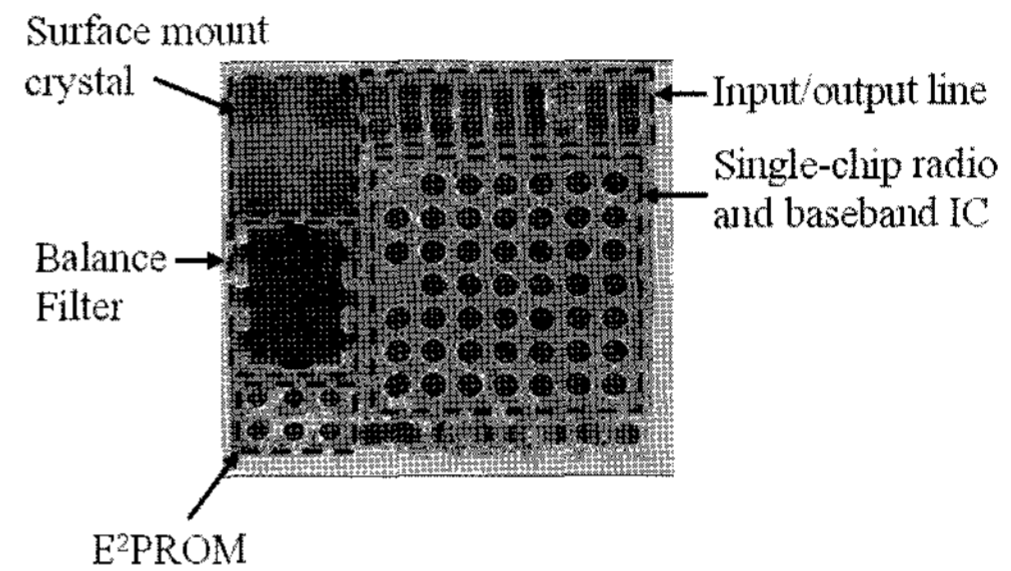
가속수명시험(Accelerated Life Testing: ALT)은 높은 신뢰도를 갖는 시스템이나 부품에 대한 신뢰성을 평가할 때, 시험 시간이나 비용을 감소시키기 위하여 정상사용조건에서 얻어진 고장모드와 고장메커니즘의 분석이 선행된 후 이를 가속시킬 수 있는 스트레스와 스트레스 수준을 통해 정상사용조건에서의 수명을 예측하는 시험이다. 일정한 범위 내에서 스트레스 수준이 증가하더라도 시스템이나 부품의 고장모드와 고장메커니즘은 변화되지 않기 때문에, 고장모드와 고장메커니즘이 변화하지 않는 범위 내에서 가속수명시험을 수행할 수 있다.^{4,5)}

2.1. 블루투스 모듈의 특징

본 연구에서 사용하게 될 블루투스 모듈의 전체 형상과 내부구조, 그리고 모듈을 구성하는 각 칩



(a) Photo view of Bluetooth module



(b) X-ray Radiography

Fig. 1. Structure of Bluetooth module.

Table 1. Bluetooth module specification

Item	Range
Input Voltage	0.4V~4.2V
Output Voltage	2.7V~3.0V
Operating Current	4.0 mA
Operating Temperature	-20°C~105°C

들의 명칭 및 X-ray 영상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 제시된 것과 같이 블루투스 모듈은 가로 및 세로 6 mm×6 mm 크기를 가지며, 멀티칩(multichips)이 하나로 패키징(packaging)처리 되어 있고, 이 블루투스 모듈의 내부에는, 반도체 칩의 형태인, RF용 single-chip Bluetooth(single-chip radio and baseband IC), E2PROM, Balance filter, surface mount crystal과 입/출력 pin 등이 내장되어 있다. 블루투스 모듈의 사양은 Table 1과 같이 0.4V~4.2V 사이의 입력전압(Input Voltage, V_i)에 대하여 2.7V~3.0V 사이의 출력전압(Output Voltage, V_o)를 얻을 수 있도록 설계되었으며, 동작허용전류(I_o)가 4.0 mA이다. 또한 RF기능의 동작허용온도의 범위는 -20°C~+105°C이다.

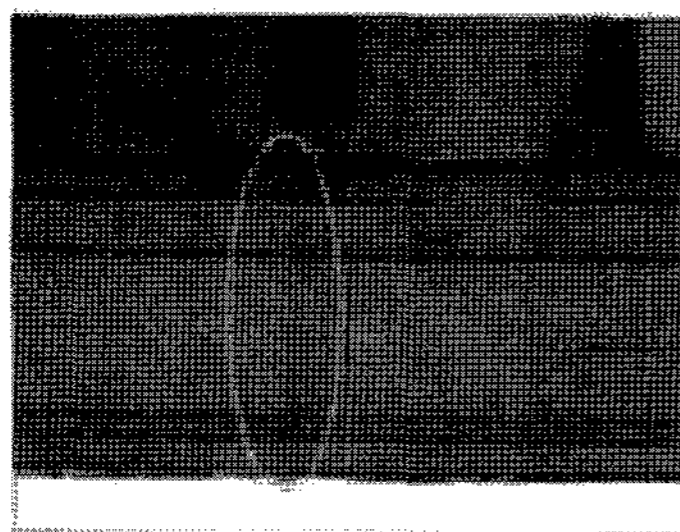
2.2. 고장분석

반도체 수명에 가장 큰 영향을 미치는 대표적인 5가지 스트레스들은 온도(temperature), 습도(humidity), 기계적 충격(mechanical stress), 전기적 과부하(Electrical Overstress: EOS), 그리고 정전기(Electrostatic Discharge: ESD)이다. 반도체에서 가장 빈번한 고장메커니즘으로는 박리(delamination)가 있으며, 박리는, molding compound의 자체 흡습특성에 의해서도 발생할 수 있고, 과도한 열의 발생과 반도체를 구성하고 있는 이종물질간의 열팽창률(Coefficient of Thermal Expansion: CTE) 차이로 인하여 발생할 수 있다.²⁾ 일반적으로 칩을 구성하는 와이어 본드, 리드프레임 등 큰 연성을 가지는 재료보다는 비교적 열팽창률이 작은 비금속 재료인 molding compound에서 미소균열 및 크랙(crack)등이 발생하며, 고온에서 발생하는 압력에 의해서 생기는 크랙이 장기간 고온에 노출되어 박리로 발전하고, 이러한 박리로 인하여 패키지 내부로 습기가 침투하여 부식(corrosion)으로 인한 단락(short)을 유발한다.^{3,4)}

필드에서 발생한 블루투스 모듈의 고장을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 휴대폰에 실장되는 블루투스 모듈로서 (a)는 solder joint에서의 크랙, (b)는



(a) Solder crack



(b) Board crack

Fig. 2. Failure images of Bluetooth module in the field.

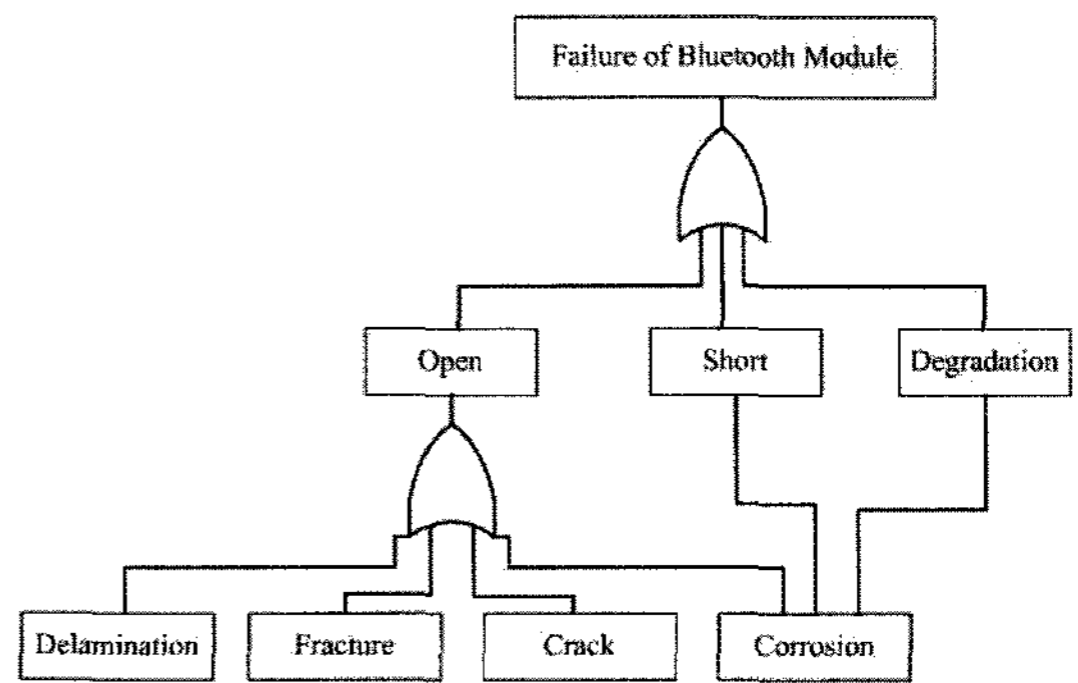


Fig. 3. FTA for Bluetooth module.

PCB Board에서의 크랙을 나타낸다.

블루투스 모듈의 고장모드는 크게 회로에서 전류가 차단되어 더 이상 출력 전압을 낼 수 없는 단락(short), 전류가 흐르지 않는고 전위차만 존재하여 그 전위가 갈 곳이 없어지는 개방(open), 그리고 반도체 내부에서의 저항증가로 인한 전기적 특성의 열화(degradation)로 나눌 수 있다. 상기 고장모드를 토대로 블루투스 모듈에 관한 결함나무분석(Fault Tree Analysis: FTA)을 Fig. 3에 나타내었다.

가속수명시험 설계를 위해 Fig. 3의 FTA를 이용하여 2단계 품질기능전개(2-Stage Quality Functional Deployment)를 실시하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)에서는 요구환경 및 조건과 고장메커니즘과의 상관관계를 분석하였고, (b)에서는 고장메커니즘과 시험방법과의 상관관계를 분석하였다. 그리고 각 항목간의 상관관계를 등급별로 나누어 점수를 부여하고, 최종적으로 점수를 합산함으로써 효과적인 가속수명시험 방법을 결정하였다. QFD결과로부터 박리와 크랙 고장메커니즘과 가장 밀접한 상관관계를 가지면서 최고점수를 나타낸 고온과 저온을 주기적으로 변동하는 온도 사이클링을 통한 가속수명시험이 가장 적합하다고 판단하였다.

가속수명시험을 위한 온도 사이클링 조건 설정시, 최고온도는 블루투스 모듈 내부에서의 온도로 인한 솔더링(Soldering)의 화학적 형태변화가 생기지 않는 온도로 125°C, 최저온도는 RF 기능의 최소허용온도를 고려하여 -45°C로 선정하였다. 시료는 총 30개를 사용하였으며 총 1,000 cycle을 시험 종료 시점으로 정하였다. 1 cycle의 온도 프로파일은 Fig. 5에서와 같이 -45°C에서 30분 동안 유지하

Requirements/Stresses	Failure mode/mechanisms			
	Delamination	Fracture	Corrosion	Crack
Temperature (-20 ~ 105 °C)	○	○	○	
Humidity (0 ~ 85% RH)	△		●	
Voltage (0 ~ 6 V)	●	○		●
Score	9	6	8	5

(a) Matrix 1- Mode/Mechanism

Failure mode/mechanisms	Score	Test methods			
		High temperature	Low temperature	High temperature/humidity	Thermal cycling
Delamination	9	△		○	●
Fracture	6	○	△		○
Corrosion	8	△		●	
Crack	5	○	△		○
Score		50	11	67	78

(b) Matrix 2 – Test Method

Fig. 4. 2-Stage QFD(Quality Functional Deployment).

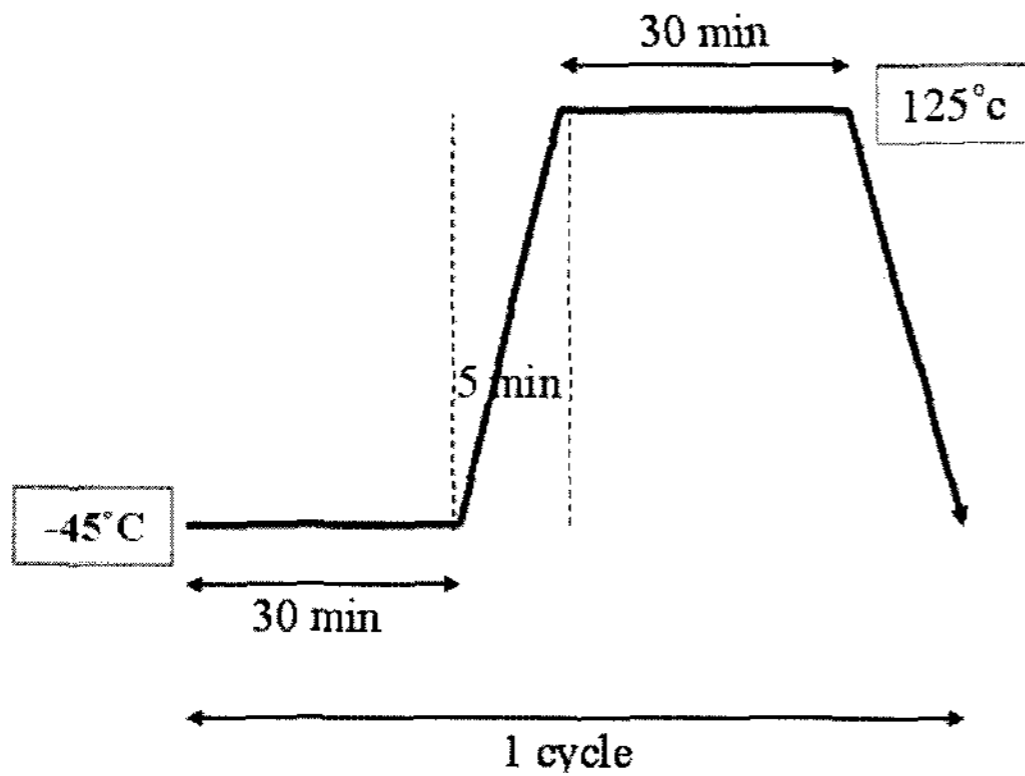


Fig. 5. Temperature/Thermal cycling profile per cycle.

다가 5분만에 125°C로 상승하여 30분을 유지하고 다시 5분만에 -45°C로 하강하며, 1 cycle은 70분의 시간이 소요된다. 이러한 온도유지 시간은 블루투스 모듈의 동작시작 및 동작정지 후 모듈의 온도가 포화되는 시간을 고려하여 산정하였다.

30개의 시료를 Fig. 6과 같이 열충격기에 넣어서 실험을 수행하였으며, 매 50 cycle마다 시료를 꺼내어 블루투스 모듈의 고장 유·무를 평가한 후에 고장 시료만 시험을 종료시키고 정상 동작을 하는 시료는 다시 시험을 진행하였다.

블루투스 모듈의 고장 유무는 Fig. 7의 시험장치

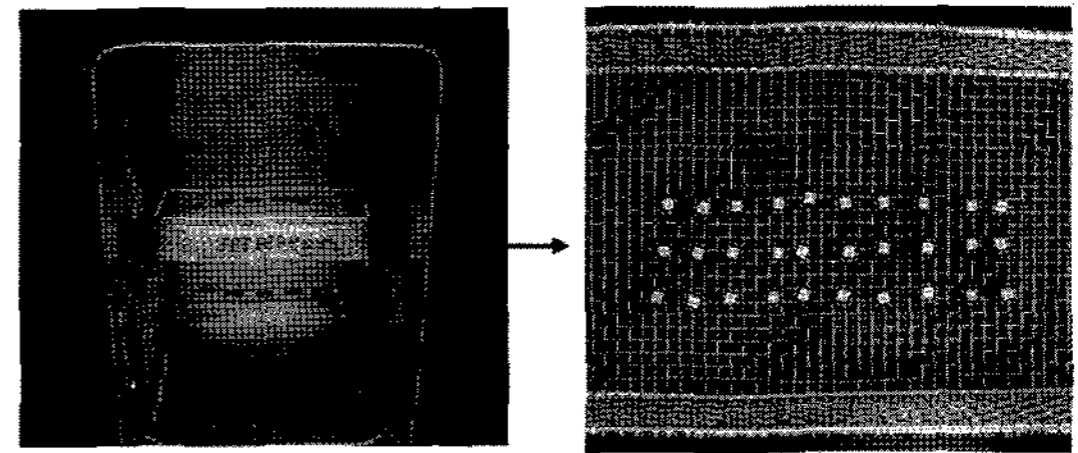


Fig. 6. Samples in the thermal shock chamber.

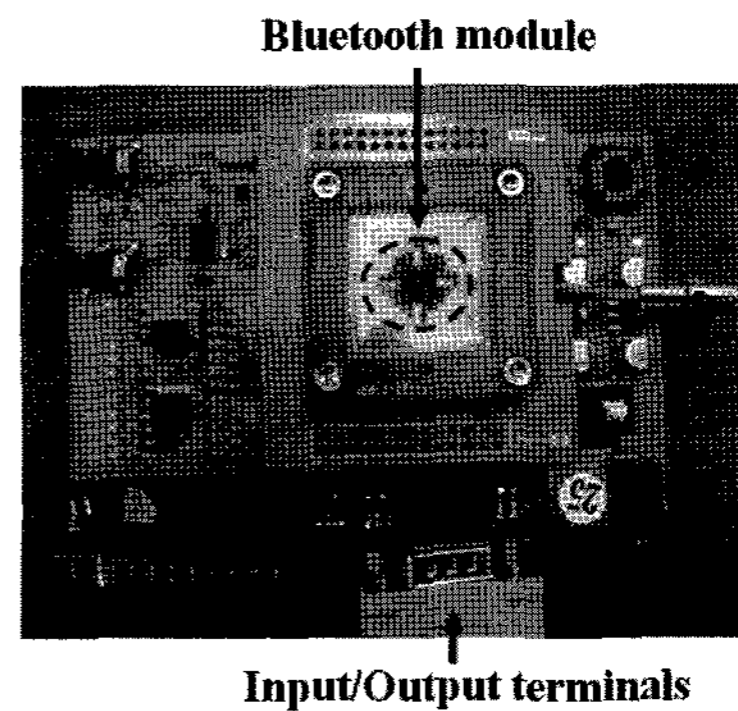


Fig. 7. Test apparatus to check failure in Bluetooth module.

를 이용하여 평가하였다. 이 장치는 시험 시료를 제작한 업체에서 공급된 것인데, 전압과 전류를 인가하여 블루투스 모듈내의 데이터 전송링크의

활성화 여부를 평가하는 장치이다. 본 연구에서는 블루투스 모듈의 데이터 전송 링크가 활성화되지 않은 경우를 고장이라고 판정하였다.

2.3. 수명추정방법

일반적으로 전자부품이나 반도체부품 등의 수명분포가 어떤 분포에 적합한지를 정확히 구분하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수명분포가 모수(parameter)의 값에 따라 다양한 분포를 표현할 수 있어 신뢰성 데이터 분석에 가장 널리 사용되는 와이불(Weibull) 분포로 가정하여, 블루투스 모듈의 수명분포 함수와 신뢰도 함수를 각각 식 (1)과 (2)로 정의할 수 있다.⁵⁾

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right) \quad (1)$$

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right) \quad (2)$$

여기서, m 은 형상모수(shape parameter)를, η 는 척도모수(scale parameter), t 는 고장시간을 나타내며, 이러한 모수들은 와이불 분포의 특성을 나타낸다. 전자부품이나 반도체부품의 수명과 관련된 신뢰성 척도로써 B_{10} 수명이 평균수명(MTTF, MTBF)보다 산업체에서 많이 사용되고 있다. B_{10} 수명은 전체의 10%가 고장이 나는 시점, 즉 $R(t)=0.9$ 를 만족시키는 시점이며, 식 (2)를 정리함으로써 B_{10} 수명을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$B_{10} = \eta \times (-\ln(0.9))^{1/m} \quad (3)$$

일반적으로 고장시간데이터들을 이용하여 m 과 η 을 추정(estimation)하고, 추정된 모수들을 이용하여 B_{10} 수명을 포함한 여러 가지 신뢰성 척도들을 구할 수 있다.

온도 사이클링 스트레스에 의한 금속의 저주기 피로 고장은 코핀-만슨(Coffin-Manson) 모델을 이용하여 정상조건에서의 정상수명을 예측할 수 있다.⁶⁾ 이 모델에서 온도 사이클링에서 온도차(ΔT)에 대한 고장에 이르는 cycle수(N)와의 관계식은 식 (4)로 정의된다.⁶⁾

$$N = A(\Delta T)^{-B} \quad (4)$$

여기서, 상수 A와 B는 재료, 시험방법 등에 따라 결정되는 값이다.

온도 사이클링에서 온도차(ΔT)에 관한 가속조건 ($\Delta T_{Accelerated}$) 및 필드조건(ΔT_{Field})에서의 수명(cycle 수)을 각각 $N_{Accelerated}$ 와 N_{Field} 로 정의한다면, 식 (4)로부터 정상조건에 대한 가속조건에서의 수명의 관계식은 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{N_{Accelerated}}{N_{Field}} = \left(\frac{\Delta T_{Field}}{\Delta T_{Accelerated}}\right)^B \quad (5)$$

식 (5)로부터 가속조건에서의 B_{10} 수명($(B_{10})_{Accelerated}$)이 주어진다면 필드 조건에서의 B_{10} 수명($(B_{10})_{Field}$)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(B_{10})_{Field} = (B_{10})_{Accelerated} \left(\frac{\Delta T_{Field}}{\Delta T_{Accelerated}}\right)^B \quad (6)$$

따라서, $\Delta T_{Accelerated}$ 를 인가하여 고장이 발생하는 cycle 수들에 대한 데이터를 확보하고 형상모수와 척도모수를 통계적으로 추정하여 가속된 조건에서의 B_{10} 수명을 결정하고, 최종적으로 식 (6)을 이용하여 필드 조건에서의 수명을 추정한다.

3. 가속수명시험결과 분석

온도 사이클링시험 1,000 cycle을 수행한 결과 400 cycle에서부터 650 cycle사이에서 많은 고장이 발생하였으며, 고장시료는 전기적 특성평가 및 초음파현미경(Scan Acoustic Microscope: SAM)을 이용하여 분석하였다.

가속수명시험 수행 전 0 cycle에서의 블루투스 모듈 양품 시료와 450 cycle 및 600 cycle에서 크랙 및 박리로 인해 고장이 발생한 시료들의 SAM 이미지를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8(b)와 같이 450 cycle에서는 Balance filter와 E²PROM에서 박리가 발생하였으며, 일부 시료에서는 Balance filter에서 크랙이 발생하였다. 박리 및 크랙으로 인해 출력 전압이 감소하여 블루투스 모듈의 Open 상태를 확인하였다. 일반적으로 칩 동작시 발생하는 열에 의해, 칩 내부에 존재하는 미세한 습도 및 제조 공정상에서 패키지 내부로 침투한 습도의 부피가 팽창하여 칩 내부에서 높은 압력을 형성한다. 이러한 압력은 주로 다이 패드(Die Pad)의 밑면에 작용하여 패드의 옆면(sideways)이나 밑면(downward)에 충격을 주어 박리 및 크랙을 생성한다.³⁾ 온도가 급격히 낮아지면 낮아질수

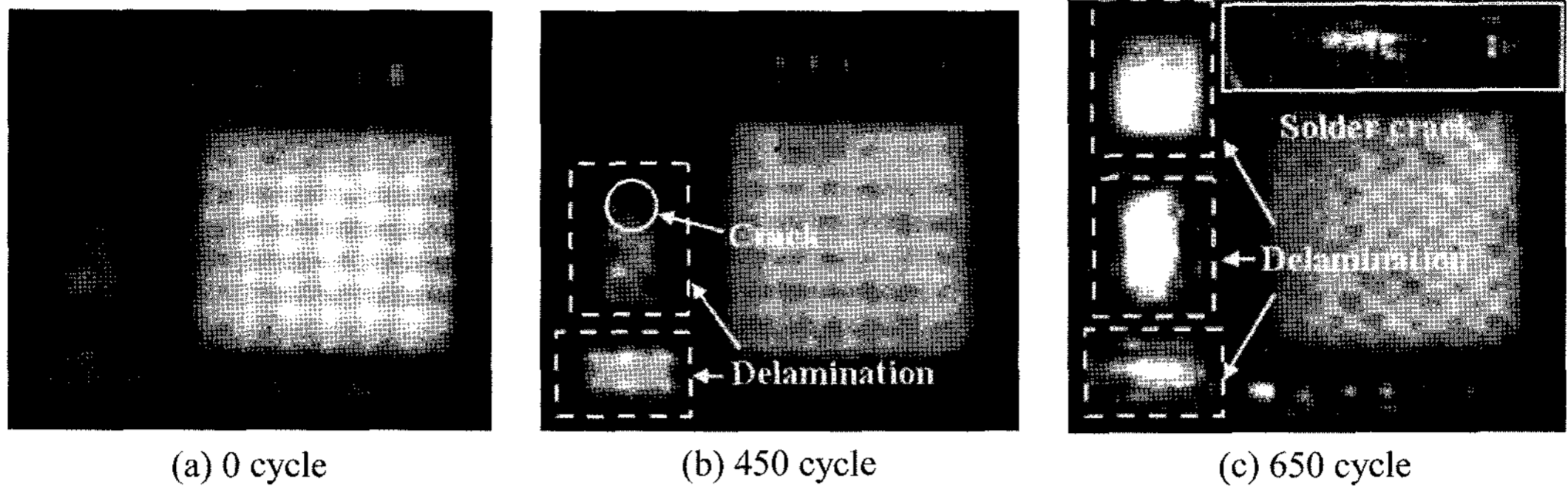


Fig. 8. Delamination and crack images obtained using SAM.

록 이러한 박리 및 크랙의 발생빈도가 더욱더 증가한다.⁷⁾ SAM 이미지들의 분석결과, 고장이 발생한 여러 시료들의 거의 모든 칩 부분에서 박리들을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8(c)와 같이 650 cycle이 경과한 후는 (a)와 같이 초기상태에서 네모난 형태의 surface mount crystal, balance filter, E²PROM 칩들이 박리현상으로 인해 심한 균열을 보여주고 있다. 실질적으로 칩의 높이를 수직방향으로 측정하였을 때 하얀색 영역이 상대적으로 높고 어두운 영역은 주저앉아서 낮은 높이라는 것을 확인할 수 있었다. 650 cycle이 경과한 시료들의 공통적인 특성은 기존 450 cycle에서 고장이 발생한 시료들보다 박리가 더욱 진전되었으며, 이로 인해서 칩의 형태가 사각형이 아닌 균열이 생겨 무너진 형태로 더욱 악화되어있다는 것을 알 수 있었다. 또한 입/출력 pin 부에서 solder joint 크랙이 발견되었다. Fig. 8의 고장시료로부터 박리는 고온에서 발생하는 압력에 의해서 발생하며, 크랙은 장기간 고온 환경에 노출될 때 박리로 발전할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

블루투스 모듈의 가속수명시험 결과로서, 고장 모드는 Open, 고장메커니즘은 온도 사이클에 의한 박리와 크랙임을 확인할 수 있었다. 이러한 고장 모드 및 고장메커니즘은, 실제 필드에서 수거한 고장난 시료들의 고장모드와 고장메커니즘과 동일하였다. 따라서 본 연구에서 수행한 가속수명시험에서의 가속성의 타당성을 확보할 수 있었다.

가속조건 $\Delta T_{Accelerated}=170^{\circ}\text{C}$ 에서 30개의 고장난 시료들의 고장시간들을 이용하여 식 (1)에 정의된 와이블 분포의 매개변수들을 추정된 결과, 형상모

수와 척도모수는 각각 $m=4.82$, $\eta=696.20$ 이다. 추정된 형상모수로부터 크랙과 박리로 인한 고장은 마모(wear-out) 고장임을 알 수 있다.⁵⁾ 또한 추정된 매개변수들을 식 (3)에 대입한 결과, 가속수명시험에 의한 B_{10} 수명은 437 cycle로 추정되었다.

필드 조건에서의 B_{10} 수명을 추정하기 위해서는 식 (6)에서 상수 B값을 구해야 한다. Molding compound의 재질이 PEM(Plastic Encapsulated Microelectronics)인 경우에는 일반적으로 상수 B가 4에서 8까지의 값을 가질 수 있으며, 본 연구에서는 최소값 4를 이용한다.⁶⁾ 식 (6)을 이용하여 가속조건 온도차 170°C 에서의 B_{10} 수명을 기준으로 필드 조건에서 다양한 온도차 스트레스를 받고 있는 블루투스 모듈의 B_{10} 수명에 이르기까지의 cycle 수를 예측한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 예를 들어 블루투스 모듈이 사용되는 필드조건 온도차가 70°C 인 경우 식 (6)으로부터 B_{10} 수명이 15,201 cycle임을 예측할 수 있다. 따라서 필드에서 블루투

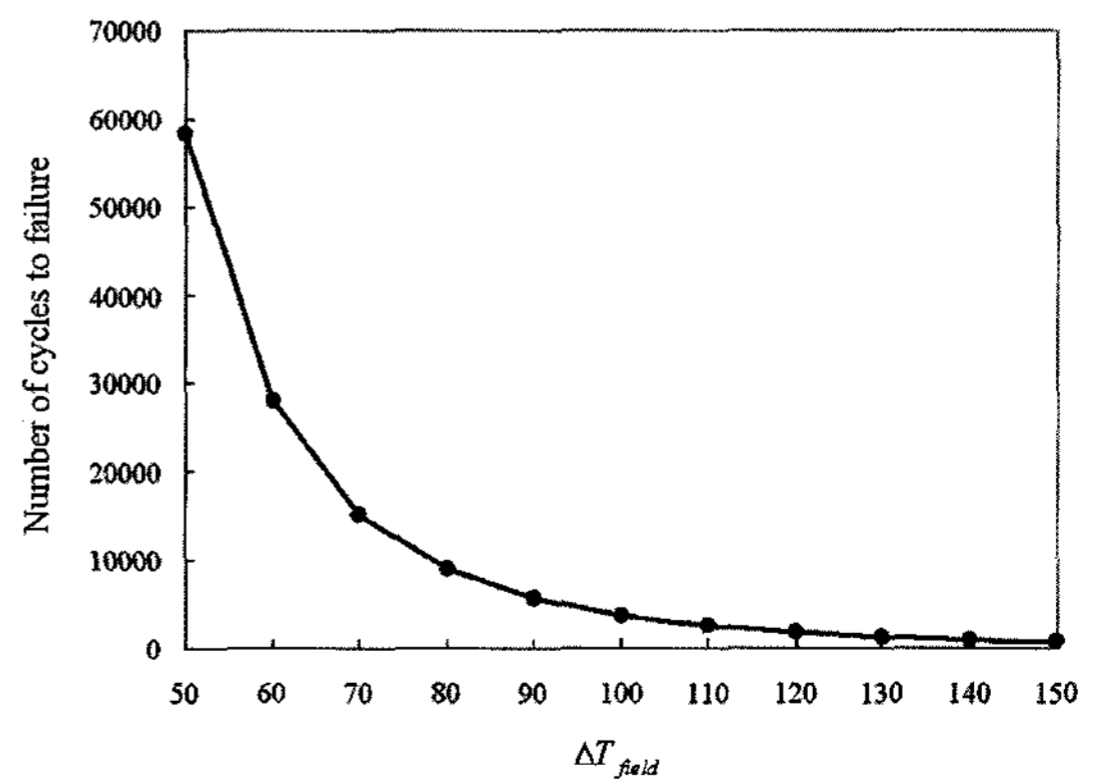


Fig. 9. B_{10} Lifetime according to thermal cycling (ΔT_{field}).

스 모듈의 사용 전 온도와 사용시 최대 포화온도의 차이가 70°C이고 모듈의 사용 빈도를 10 cycle/1 day로 가정하면, 약 4년이 지난 시점에서 약 10%의 고장이 발생한다는 것을 예측할 수 있다.

또한 필드조건 온도차가 60°C인 경우, B_{10} 수명이 28,162 cycle이므로 온도차를 70°C에서 60°C로 감소시킬 수 있다면, 수명을 약 85% 증가시킬 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자제품의 여러 분야에서 다양하게 이용되고 점점 소형화 고밀도화 되어서 사용되는 블루투스 모듈의 가속수명시험을 통해 정상 조건에서의 수명을 예측하였다. 온도 사이클링에서 온도차를 스트레스로 선정하여 가속수명시험을 수행하여 블루투스 모듈의 고장을 분석한 결과, 고장모드는 Open, 고장메커니즘은 크랙과 박리였으며, 크랙은 진전되어 박리로 발전하였다. 가속수명시험을 통해 필드에서 수거한 고장품들의 고장모드와 고장메커니즘을 동일하게 재현할 수 있었다. 필드조건에서의 수명을 예측하기 위해, 가속수명시험에서 얻은 고장시간 데이터들을 이용하여 수명분포 매개변수들을 추정하고, 코핀-만슨(Coffin-Manson) 모델을 이용하였다.

가속수명시험결과를 이용하여 블루투스 모듈이 필드에서 받을 수 있는 다양한 온도차에 대한 정량적인 수명을 예측할 수 있는 방법을 제시하였고, 제안된 방법을 이용하여 필드조건 온도차 70°C를 받고 있는 블루투스 모듈의 B_{10} 수명은 약 4년으로

추정되었다. 본 연구를 통해 블루투스 모듈의 구조 및 솔더접합부에 국한된 기존의 신뢰성 평가 방법을 확장하여 필드조건에서의 정량적인 수명 평가를 수행할 수 있는 방안을 제시할 수 있었다.

참고문헌

1. S. W. Yoon, D. Witorsa, S. Yak, L. Lim, Ganesh, V., A. G. K. Viswanath, T. C. Chai, K. O. Navas and V. Kripesh, "Reliability studies of a through via silicon stacked module for 3D microsystem Packaging", 56th Electronic Components and Technology Conference, 1449-1453 (2006).
2. M. K. Rahim, J. C. Suhling, R. C. Jaeger and P. Lall, "Fundamentals of delamination and growth in flip chip assemblies", 55th Electronic Components and Technology Conference, Vol. 2, 1172-1186 (2005).
3. L. T. Nguyen, R. H. Y Lo, A. S. Chen and J. G. Belani, "Molding compound trends in denser packaging world: Qualification tests and reliability concerns", IEEE transactions on Reliability, Vol. 42, 518-535 (1993).
4. P. Viswanadham and P. Singh, "Failure modes and mechanisms in electronics packages", Chapman & Hall, USA (1998).
5. Patrick D.T. O'Connor, "Practical reliability engineering", 4th Ed., John Wiley & Sons (2002).
6. D. S. Aldrige, "Determining thermal test requirements for automotive components," Quality and Reliability Engineering International, Vol. 20, 103-113 (2004).
7. J. C. Chen, W. T. Chen, S. T. Chang, J. S. Horng, H. H. Lin, M. J. Sun, W. H. Wang and W. H. Cheng, "Failure mechanism of solidification cracks in semiconductor laser packaging," 46th Electronic Components and Technology Conference, 946-950 (1996).