Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 25, No. 2, pp. 204-216, June 1999.

고장물리와 수명분석을 이용한 제품신뢰도 개선: BGA(Ball Grid Array) 패키지에 대한 사례연구를 중심으로

이경택[1] · 신창호[1] · 한형상[1] · Evans, J. W.[2] · 김선욱[2] · 이희진[3]

[1]고등기술연구원 생산기술연구실 / [2]고등기술연구원 시스템공학연구실 / [3]대우전자 품질경영연구소

An Approach of Combining Failure Physics and Lifetime Analysis for Product Reliability Improvement: An Application to BGA(Ball Grid Array) Package

K. T. Lee[1] · C. H. Shin[1] · H. S. Hahn[1] · J. W. Evans[2] · S. W. Kim[2] · H. J. Lee[3]

Failure physics and statistical lifetime analysis constitute the two extreme ends of the reliability engineering spectrum, and studies that relate failure mechanisms to failure distributions have been near non-existent. This paper is an attempt to stimulate interest to fill the gap between the two extremes and proposes an approach of combining them through i) developing a failure mechanism model, ii) generating failure times by Monte Carlo simulation with the model, iii) deriving the failure time distribution and evaluating the product reliability, and iv) improving the product reliability by the sensitivity analysis. An application of the proposed approach to the BGA(Ball Grid Array) surface mount package is also provided.

1. 서 론

제품의 신뢰도를 평가하고 개선하는 방법론으로는 크게 수명분석(lifetime analysis)과 고장물리(failure physics)가 있다. 수명분석은 실험실에서 행해지는 수명시험(life testing)이나 가속수명시험(accelerated life testing)에 의한 실험데이터나 A/S 센터로부터 얻어지는 사용현장데이터(field claim data)를 이용하여 부품이나 제품의 수명분포를 알아내고 이로부터 수명분포의 모수, 평균 및 분산 등을 알아내는 방법이다(Kalbfleish and Lawless, 1988; Lawless, 1981; Nelson, 1990; Suzuki, 1985). 이렇게 얻어진 제품수명에 관한 품질특성값들은 출하시기 및 보증기간 결정, 부품 재고수량 결정 등 신뢰성에 관련된 의사결정을 위한 중요한 자료로 사용된다. 그러나 수명분석은 제품이 생산 중에 있거나 적어도 시제품(prototype)이 생산된 이후에 적용될 수 있는 방법이고, 특히 제품의 고장원인(failure cause)과 고장 메커니즘(failure mechanism)을 고려하지 못하므로 수명분석의 결과만으로 제품의 신뢰성을 높이기는 어렵다.

반면 고장물리는 제품의 고장원인과 고장 메커니즘을 직접 다루는 분야이다(Collins, 1981; Dasgupta and Pecht, 1991). 즉, 고장물리에서는 제품에 가해지는 응력(stress)에 의해 제품이 어떤 방식으로 고장나게 되는가를 나타내는 고장 메커니즘을 모형화하고, 유도된 관계식을 이용하여 제품의 수명을 예측한다. 고장물리는 제품의 고장 메커니즘을 직접 모형화함으로써 제품설계 초기에 사용 가능하다는 점 이외에도, 제품수명과 설계변수들간의 상관관계를 명확히 파악할 수 있어서 제품신뢰성 향상을 위한 조치가 비교적 쉽다는 장점이 있다. 그러나 고장물리는 실험식에 의한 결정론적(deterministic) 방법이므로 실제로 존재하는 공정 및 사용환경에서의 변동(variation)을 고려하지 못하고, 이로 인하여 제품설계시 극단치설계(worst case approach)가 되기 쉽다는 단점이 있다(O'Connor, 1991). 또한 고장물리에서 사용하는 고장 메커니즘 모형은 대부분 관측값들

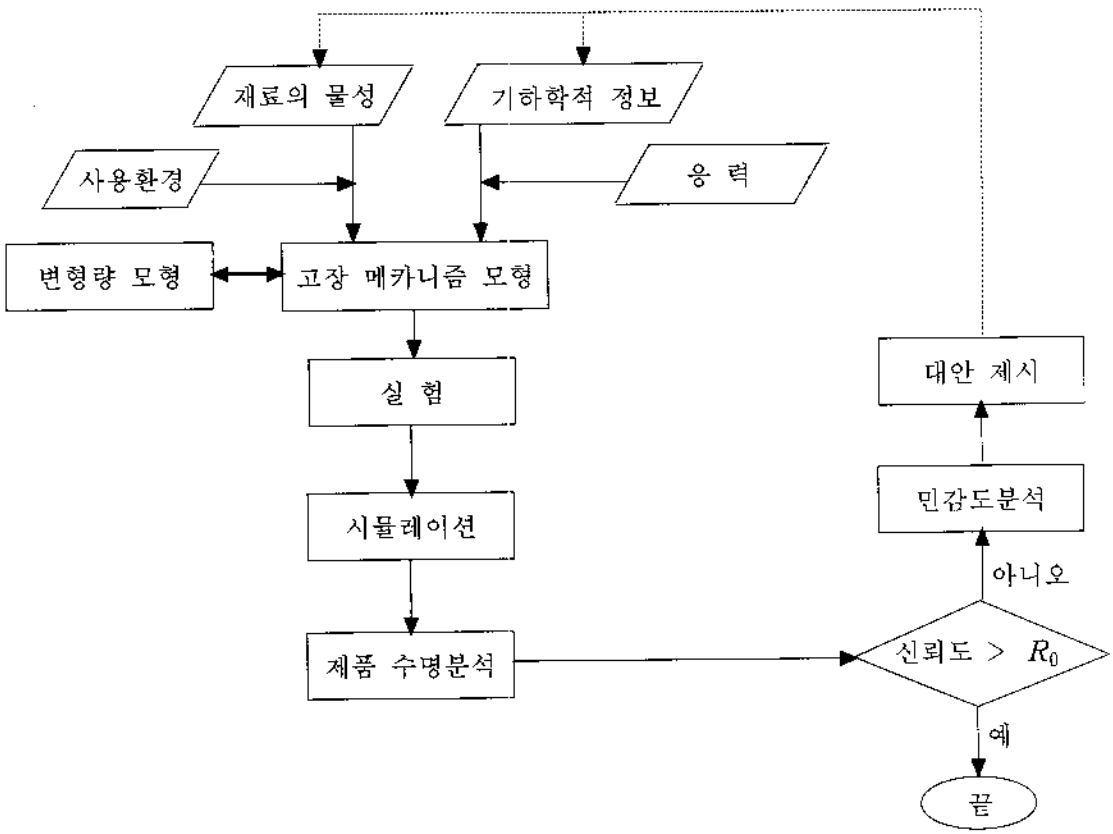


그림 1. 신뢰도 평가 및 개선절차.

의 평균이나 중위수를 이용하여 유도된 것으로, 이를 이용해서 수명과 관련된 다양한 품질특성값들을 구하는 것은 불가능하다.

이상 살펴본 수명분석과 고장물리는 각각의 장점과 단점이 있으며, 이들 두 분야의 장점을 적절히 접목시킨다면 제품의 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다. 그러나 이들 두 분야를 접목시킨 연구로는 Evans 등(1997)을 제외하고는 거의 찾아보기 힘들며, 이러한 점에 근거하여 이 연구에서는 상기한 두 분야를 접목시키는 새로운 방법을 제안한다. 또한 제안된 방법을 이용하여 반도체 산업에서 새로운 기술로 각광받고 있는 BGA(Ball Grid Array) 패키지(package)의 신뢰성 평가 및 개선을 위한 사례연구를 수행하고, 분석결과를 모토롤라社에서 시행된 실제 실험결과와 비교한다.

2. 신뢰도 평가 및 개선방법

이 절에서는 분포이론을 이용하는 수명분석과 고장 메커니즘을 고려하는 고장물리를 접목시키는 제품신뢰도 평가 및 개선방법에 대하여 설명한다.

<그림 1>은 이 연구에서 제안하는 방법의 대략적인 흐름도이다.

제품의 신뢰도를 예측·평가하기 위한 첫번째 단계는 제품을 구성하는 부품들의 물성(material property), 부품이나 부품들 간의 기하학적 정보(geometric information), 제품의 사용환경, 그리고 제품에 가해지는 응력 등을 파악하는 것이다. 이들 정보가 정확히 파악되면 제품의 고장이 어떠한 고장 메커니즘을 통하여 발생되는지를 알 수 있다. Dasgupta(1995)에 의하면 제품의 주요한 고장 메커니즘은 <표 1>에 나타낸 것과 같고, 이들은 크게 '과부하(overstress)'와 '마모(wearout)' 고장 메커니즘으로 구분된다. 예를 들어 한번에 가해지는 응력이 소성변형(plastic deformation)의 한계인 항복강도(yield strength)보다 클 경우에 발생되는 항복(yielding)은 과부하 고장 메커니즘에 속하고, 제품이 고온(용융점의 50% 이상)에서 휘거나 늘어나게 되는 크리프(creep)는 마모 고장 메커니즘에 속한다. 특정 제품의 고장은 <표 1>에 나타낸 고장 메커니즘들의 조합에 의하여 발생되기도 하지만, 주로 한두 개의 지배적인 고장 메커니즘에 의하여 일어나는 것이 일반적이다. 따라서 제품의 주 고장 메커니즘을 찾는 것은 매우 중요한 일이다.

제품의 주 고장 메카니즘이 결정되면, 고장 메커니즘과 제품수명간의 관계를 나타내는 고장 메커니즘 모형(failure mechanism model)을 구할 수 있다. 예를 들어, 반복적이거나 주기적

표 1. 고장 메커니즘의 종류

과부하 고장 메커니즘	마모 고장 메커니즘
Fracture	Fatigue
Buckling	Creep
Yielding	Metal Migration
Interfacial Fracture	Corrosion
Electrical Overstress	Wear
Electrostatic Discharge	Aging
Dielectric Breakdown	
Thermal Breakdown	

인 응력을 받는 제품에 발생되는 피로(fatigue) 고장 메커니즘의 경우에는 아래와 같은 Manson-Coffin의 실험식이 많이 사용된다(Collins, 1981).

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = [\text{High Cycle Fatigue}] + [\text{Low Cycle Fatigue}] = \left(\frac{\gamma}{E}\right)(2N)^{b} + \delta(2N)^{c}. \quad (1)$$

식 (1)의 우항 첫번째 부분은 제품에 가해지는 응력의 크기가 비교적 작을 때 발생되는 탄성변형(elastic deformation)에 의한 피로수명을 나타내고, 두 번째 부분은 소성변형이 동반되는 경우를 나타낸다. 이 식에서 $\Delta\varepsilon$ 은 주어진 응력에 의한 제품의 변형량(strain), N은 제품의 수명(number of cycles to failure), γ와 δ는 피로강도계수(fatigue strength coefficient)와 피로연성계수(fatigue ductility coefficient), E는 탄성계수(modulus of elasticity), b와 c는 피로강도지수(fatigue strength exponent)와 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다.

식 (1)과 같은 고장 메커니즘 모형을 이용하여 제품의 수명을 예측하기 위해서는 $\Delta\varepsilon$, γ, δ, E, b, c 와 같은 값들을 알아야 하는데, 이 값들은 재료의 물성, 기하학적 정보, 제품 사용환경, 응력 등에 의존하며 과거 데이터나 실험을 통하여 구할 수 있다. 특히 응력에 의한 제품의 변형량은 상술한 여러 변수들의 복합적인 영향을 받는데, 제품의 구조가 간단한 경우에는 간단한 물리식을 이용하여 계산할 수 있다. 예를 들어, <그림 2>와 같은 입방체에서 상하 반대방향으로 전단력 S가 작용한다고 할 때의 전단변형량(shear strain) $\Delta\varepsilon$은

$$\Delta\varepsilon = \frac{d}{h} = \tan\theta \quad (2)$$

가 된다. 반면 제품의 구조가 복잡한 경우에는 유한요소법(finite element method)과 같은 수치적인 방법을 이용하여 변형량을 계산할 수 있다(Gilbert and George, 1973).

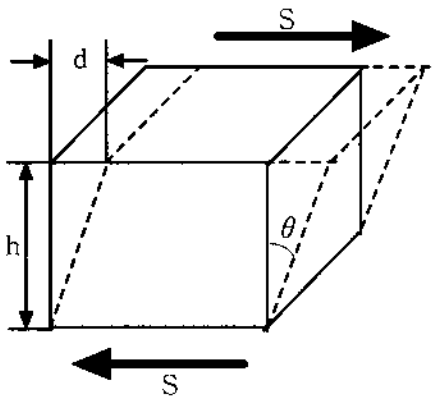


그림 2. 전단력에 따른 전단변형량.

전통적인 고장물리에서는 식 (1)과 같은 고장 메커니즘 모형에서 N을 제외한 모든 변수(이하 입력변수라 함)들의 값을 구한 후, 이 값들을 실험식에 대입하여 제품의 수명을 예측한다. 이러한 접근방식은 제품의 수명이 만족할 만한 수준이 되지 못할 경우, 고장 메커니즘 모형으로부터 신뢰도 개선을 위한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실험식에 들어가는 입력변수들을 모두 상수로 취급하여 하나의 N값만을 구하므로, 계산된 N값의 신빙성(likeliness)을 객관적으로 평가할 수 없고 제품의 신뢰도에 관한 다각적인 분석이 불가능하며 실제 사용환경이나 제조공정상에 존재하는 변동요인을 고려하지 못하는 단점이 있다(Hazelrigg, 1996; O'Connor, 1991). 따라서 이 연구에서는 이들 입력변수들이 확률변수라고 가정한 후, 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 통하여 N의 확률분포를 구하는 접근방식을 이용한다.

시뮬레이션을 통하여 N의 확률분포를 구하기 위해서는 입력변수들의 확률분포를 알아야 하는데, 제품설계 초기나 시료의 수가 많지 않은 경우에 이들 확률분포들을 정확히 안다는 것은 매우 어려운 일이다. 이에 대해 Hazelrigg(1996)은 삼각분포(triangular distribution)가 단봉인(unimodal) 확률분포를 비교적 잘 근사화시킬 수 있고 모수의 추정도 수월하므로, 입력변수의 확률분포로 삼각분포를 사용할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 입력변수가 삼각분포을 따른다고 가정한 후 실험을 통하여 삼각분포의 세 모수인 최소값 $\eta_{\min}$, 최빈값 η_{mode} 및 최대값 $\eta_{\max}$를 구하여 시뮬레이션을 수행하는 접근방법을 사용한다. U를 난수(random number)라 할 때, 모수가 $\eta_{\min}$, η_{mode}, $\eta_{\max}$인 삼각분포를 따르는 확률변수 X는 식 (3)과 같이 구할 수 있다

시뮬레이션을 통하여 구한 다수의 N 값들을 이용하면 제품의 수명이 어떠한 수명분포를 따르는지를 알 수 있다. 즉, 시뮬레이션에 의하여 생성된 N의 값들을 확률지(probability

$$X=\begin{cases}\eta_{\min}+\sqrt{U(\eta_{mode}-\eta_{\min})(\eta_{\max}-\eta_{\min})}, \\ 0\le U\le\dfrac{\eta_{mode}-\eta_{\min}}{\eta_{\max}-\eta_{\min}}\text{ 인 경우,} \\ \eta_{\max}-\sqrt{(1-U)(\eta_{\max}-\eta_{mode})(\eta_{\max}-\eta_{\min})}, \\ \dfrac{\eta_{mode}-\eta_{\min}}{\eta_{\max}-\eta_{\min}}<U\le 1\text{인 경우.}\end{cases} \quad (3)$$

paper)에 타점해 보거나, 적합도 검정(goodness of fit test)을 통하여 N의 확률분포를 알아낼 수 있다. N은 제품의 수명이므로 고려대상이 되는 확률분포로는 와이블분포(Weibull distribution), 대수정규분포(lognormal distribution), 극한치분포(extreme value distribution), 지수분포(exponential distribution) 등이 있다.

N이 특정 확률분포를 따른다고 판단되면, 선택된 확률분포를 이용하여 제품의 평균수명, B10 수명 등과 같은 수명과 관련된 품질특성값들을 계산할 수 있다. 제품의 신뢰도가 만족할 만한 수준이 되지 못할 경우에는 신뢰도 개선을 위한 노력이 필요하다. 이때 제한된 자원을 이용하여 최대의 개선효과를 얻기 위해서는 민감도분석을 통하여 중요한 입력변수를 파악하고, 선택된 입력변수에 대하여 조처를 취하는 것이 바람직하다.

3. 사례연구

이 절에서는 2절에서 제안한 방법을 이용하여 최근 반도체산업에서 새로운 기술로 각광받고 있는 BGA 패키지의 신뢰성 평가 및 개선을 위한 사례연구를 수행한다.

사례연구를 위한 시료로는 모토롤라社에서 생산된 PBGA (Plastic Ball Grid Array)를 이용하였고, 분석결과를 실제 실험 데이터와 비교하였다.

3.1 BGA 패키지

반도체산업의 중요한 특징 중의 하나는 소형화의 추세이다. 반도체 칩(chip)의 소형화는 최종 전자제품의 크기를 작게 할 수 있다는 점 이외에도 사용전력의 절감, 운용속도의 향상 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들 때문에 집적회로(IC)가 개발된 이래 고집적회로(LSI), 초고집적회로(VLSI) 순으로 반도체 칩을 소형화하려는 노력들이 경주되어 왔다.

반도체의 소형화에 관련된 또 하나의 문제는 패키지의 크기이다. 반도체 칩은 PCB(Printed Circuit Board)와의 연결을 위하여 패키지의 형태로 제작된다. 가장 일반적인 패키지의 형태는 <그림 3>의 (a)와 같이 반도체 패키지의 양쪽 끝단에 단자(lead)가 나와 있는 DIL(Dual-In-Line) 타입이다. DIL 타입 패키지는 PCB상의 PTH(Plated Through Hole)에 삽입된 이후 납땜으로 연결된다. 그러나 DIL 타입 패키지의 경우에는 인접한 납땜부위가 합선되지 않도록 하기 위해서 단자들간의 간격(pitch)이 최소 0.1 인치는 되어야 하고, 이로 인하여 DIL 타입의 패키지를 실장하기 위해서는 실제 반도체 칩의 크기 보다 몇 배나 큰 PCB 면적이 필요하다.

최근에는 상기한 DIL 타입 패키지의 문제점을 해결하기 위하여, 패키지 밑면의 볼(ball) 납을 이용하여 패키지와 PCB를 연결하는 BGA 기술이 개발되었다. <그림 3>의 (b), (c), (d)와 같은 BGA 패키지는 리플로(reflow) 공정을 통하여 PCB에 실장된다. BGA 패키지의 경우 단자들간의 간격은 통상 0.05 inch 정도이면 충분하므로, DIL 타입 패키지에 비하여 약 1/4 정도의PCB 면적만이 필요하다. 그러나, BGA 패키지의 경우에는 납땜 부위를 제외하고는 패키지와 PCB의 연결을 위한 물리적인 支持가 없으므로, 시시각각으로 변하는 전자제품 내부온도의 변화에 의한 피로고장이 발생하기 쉽다는 단점이 있다. 따라서BGA 패키지와 PCB 접합부위의 신뢰성을 향상시키는 일은 최근의 전자산업에서의 중요한 문제로 대두되고 있다.

3.2 고장 메커니즘

재료는 열을 받으면 伸長되는 성질이 있고, 열팽창계수(coefficient of thermal expansion:CTE)는 온도가 1° 올라갈 때마다 재료가 얼마나 늘어나는가를 나타내는 무단위(unitless) 측도이다. 그런데 전자제품의 내부 온도는 시시각각으로 변화하고 BGA 패키지와 PCB도 내부온도의 영향을 받으며, 이때 패키지와 PCB 간의 열팽창계수의 차이는 납땜부위 변형의 원인이 된다. 즉, FR-4 수지(resin)가 주성분인 PCB의 열팽창계수 α_{PCB}는 플라스틱(몰딩재료), 반도체 칩, BT 수지(BGA 밑면의 기판재료) 등으로 구성된 BGA의 열팽창계수 α_{BGA}보다 커서 전자제품의 온도가 증가할 경우 PCB가 BGA 패키지보다 더 많이 伸長되고 이로 인하여 납땜부위에 변형이 발생된다. <그림 4>는 상온과 고온에서의 납땜부위의 형태를 나타낸 것이다.

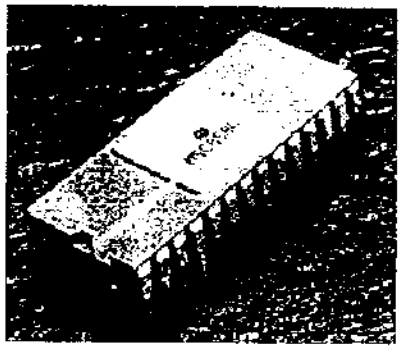
BGA 패키지와 PCB의 납땜 부위에서의 주 고장 메커니즘은 온도의 변화에 따른 피로고장 메커니즘이다. 즉, 주기적이고 반복적인 온도의 변화에 의해 납땜부위에 변형이 생기고 이로 인하여 볼납에 피로가 누적되어 크랙(crack)이 발생되며 종국적으로는 납땜부위가 파괴(fracture)되어 BGA 패키지와 PCB간의 연결이 끊어지게 된다.

온도의 변화에 따른 피로 고장 메커니즘의 모형화를 위해서는 제품에 가해지는 온도이력(thermal history)을 아는 것이 중요한데, 이를 정확히 아는 것은 상당히 어려우므로 통상 간단한 온도사이클(cycle)을 이용한다. 주로 사용되는 온도사이클은 MIL-STD-883 Method 1010과 1011에 규정된 것들로써, $T_{\min}$과 T_{max}를 각각 최저온도와 최고온도라 할 때

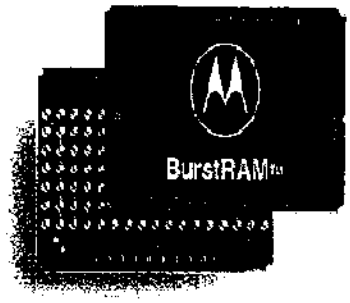
$$(T_{\min}, T_{max})=(0℃, 100℃),\ (-55℃, 125℃),$$
$$(65℃, 100℃),\ (-195℃, 22℃),$$

의 네 가지이다(Dasgupta, 1991).

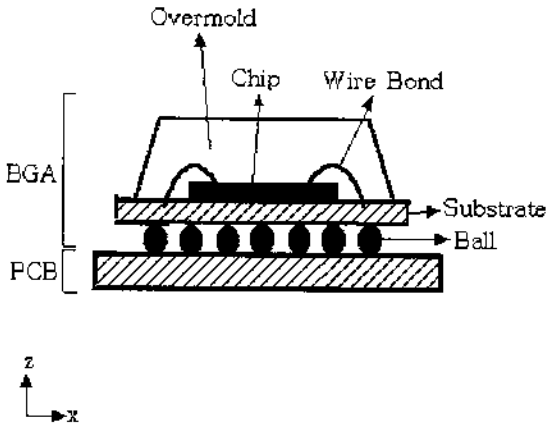
이 연구에서는 모토롤라社의 실제 시험데이터와의 비교를



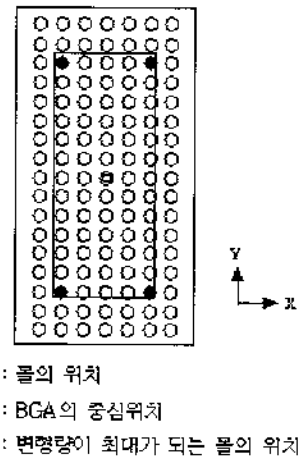
(a) DIL



(b) BGA

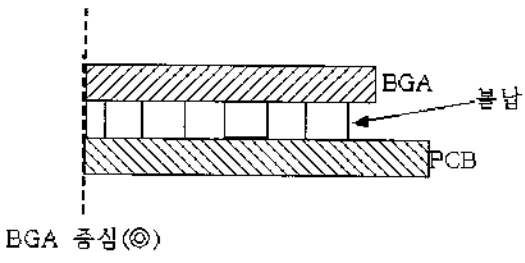


(c) BGA 단면

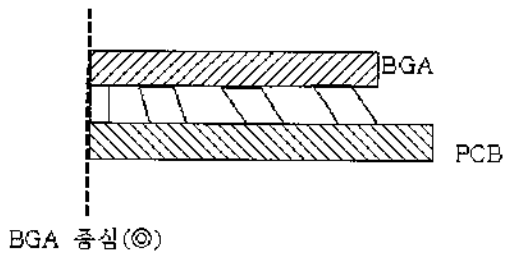


(d) BGA 패키지에서 칩의 위치

그림 3. 패키지의 형태 - DIL 타입과 BGA 타입.



(a) 상온



(b) 고온

그림 4. 온도의 변화에 따른 납땜부위의 형태.

위하여 모토롤라社에서 행해진 실험조건과 동일한 (0℃, 100℃)의 온도사이클을 이용하였다. 또한, <그림 5>에 나타낸 바와 같이 T_{min} 과 T_{max} 에서의 유지시간(dwell time) D는 10분으로 하였는데, 이는 최저온도와 최고온도에서 10분 정도의 시간이 지나면 제품에 가해지는 응력이완(stress relaxation)이 완료되어 더 이상의 유지시간은 의미가 없기 때문이다.

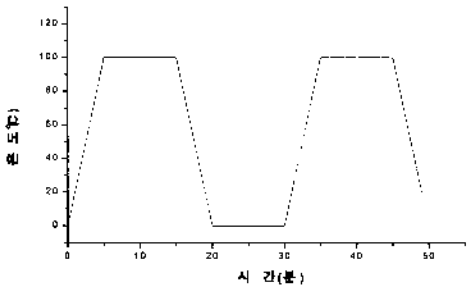


그림 5. 온도사이클.

Dasgupta(1991)는 온도에 의한 피로고장 메커니즘은 소성변형을 동반하는 Low Cycle Fatigue에 속하여, 식 (1)의 Manson-Coffin 고장 메커니즘 모형을 다음과 같이 근사화시킬 수 있음을 보였다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \delta(2N)^{c} \tag{4}$$

이 식에서 피로연성계수 δ는 63% 주석(Sn) - 37% 납(Pb) 성분비를 가지는 일반 땜납의 경우 대략 0.325의 값을 갖는다. 피로연성지수 c는 온도이력으로부터 구할 수 있는 값인데, Wild(1974)는 많은 실험데이터로부터

$$c = -0.442 - 6\times10^{-4}\times T_{avg} + 1.74\times10^{-2}\ln\left(1+\frac{360}{D}\right) \tag{5}$$

가 됨을 보였다. 이 식에서 T_{avg}는 $T_{avg} = (T_{min} + T_{max})/2$ 이다.

식 (4)에서 $\Delta\varepsilon$은 피로수명과 관련된 변형량으로 PCB와 BGA 패키지의 여러 납땜부위 중 최대 변형이 일어나는 부위를 모형화하여 그 값을 계산할 수 있다. PCB는 동일한 재료로 구성되어 있으므로 열팽창계수가 위치에 상관없이 동일하나, BGA패키지는 여러 종류의 재료로 구성되어 있어서 위치에 따라 열팽창계수가 다르다. Han과 Guo(1996)는 BGA 패키지의 열팽창계수 α_{BGA}가 칩이 탑재된 부위에서 가장 작고, BT 수지로만 구성된 말단 부위에서 가장 큰 값이 됨을 보였고, 그들의 결과를 이용하면 BGA 패키지와 PCB의 열팽창계수의 차이는 칩이 탑재된 부분에서 최대가 됨을 알 수 있다. 또한 BGA 패키지 중심으로부터 멀리 떨어질수록 열팽창계수의 차이에 의한 변형량이 클 것이므로, 납땜부위에서의 최대 변형량은 <그림 3>의 (d)에서 ●로 표시된 볼 부위에서 발생하게 된다. 따라서 이 점에서의 변형량을 <그림 6>과 식 (2)를 이용하여 모형화하면 $\Delta\varepsilon$은

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon &= \frac{d}{2h} \\ &= \frac{L_D\times\alpha_{PCB}\times(T_{max}-T_{min}) - L_D\times\alpha_{BGA}\times(T_{max}-T_{min})}{2h} \\ &= \frac{L_D\times\Delta T\times\Delta\alpha}{2h}\end{aligned} \tag{6}$$

가 된다. 여기서 L_D는 그림 3의 (d)에서 ●과 ◎ 사이의 길이,

ΔT는 $\Delta T = T_{max} - T_{min}$,

$\Delta\alpha$는 $\Delta\alpha = \alpha_{PCB} - \alpha_{BGA}$,

이고 h는 볼의 높이이며, 전단변형량의 계산에 2를 나누어 준 것은 볼 상하로 작용한 전단력이 동일한 방향이기 때문이다.

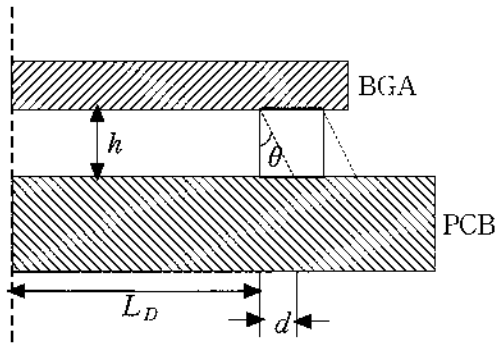


그림 6. 납땜부위의 변형량.

이상의 내용을 정리하면 N은

$$N = \frac{1}{2}\left(\frac{L_D\Delta\alpha\Delta T}{4h\delta}\right)^{1/c} \tag{7}$$

이 된다.

3.3 실 험

2절에서 언급한 바와 같이 N의 계산에 들어가는 입력변수들은 상수라기 보다는 확률변수이다. 이 연구에서는 이들 입력변수들이 삼각분포를 따른다고 가정한 후, 삼각분포의 모수들을 실험을 통하여 구했다. N의 계산에 들어가는 입력변수는 L_D, h, α_{PCB}와 α_{BGA}이다. 먼저 L_D는 실장되지 않은 BGA 패키지를 밑면에서 투영기 (Projector Profile)를 이용하여 측정하였다. 투영기는 평면상의 두 점을 선택할 경우 이들간

의 거리를 자동으로 측정해 주는 장비이다. <표 2>는 측정된 L_D 값들을 정리한 것이다.

표 2. L_D 측정값(단위: mm)

8.181	8.119	8.157	8.124	8.141
8.119	8.134	8.119	8.138	8.108
8.150	8.102	8.131	8.132	8.134
8.121	8.133	8.111	8.127	8.113

h 는 실장된 BGA 패키지의 납땜부위를 단면을 볼 수 있도록 절단(cross-section)한 후, 광학현미경을 이용하여 측정하였다. <그림 7>은 절단한 납땜부위의 예이고, <표 3>은 측정한 h 값들이다.

표 3. h 측정값(단위: μm)

550.31	560.16	555.24	563.45
568.38	571.66	566.74	558.52
568.38	568.38	576.59	574.95
573.16	581.52		

PCB의 열팽창계수 α_{PCB} 는 X-방향과 Y-방향의 열팽창계수인 $\alpha_{PCB,X}$ 와 $\alpha_{PCB,Y}$ 를 측정한 후,

$$\alpha_{PCB} = \sqrt{\alpha^2_{PCB,X} + \alpha^2_{PCB,Y}} \qquad (8)$$

를 이용하여 구할 수 있다. $\alpha_{PCB,X}$ 와 $\alpha_{PCB,Y}$ 는 X-방향과 Y-방향의 열팽창계수를 측정할 수 있도록 PCB를 절단하여 사각형 모양의 시료를 만든 후, 열-기계적 특성측정기(Thermal Measurement Analysis: TMA)를 이용하여 측정하였다. <그림 8>은 열-기계적 특성측정기로 측정 시료의 $\alpha_{PCB,X}$ 와 $\alpha_{PCB,Y}$ 를 측정한 결과이고, 이 그림에서 열팽창계수는 그래프의 기울기이다. <표 4>는 여섯 개의 시료에 대하여 측정한 $\alpha_{PCB,X}$, $\alpha_{PCB,Y}$ 와 이로부터 계산한 α_{PCB} 값들을 정리한 것이다.

BGA 패키지의 열팽창계수도 PCB의 열팽창계수와 유사한 방법으로 측정할 수 있다. 그러나 PCB의 경우에는 모든 위치에서의 열팽창계수가 동일하여 PCB상의 임의의 위치에서 시료를 제작할 수 있었으나, BGA 패키지의 경우에는 위치에 따라 열팽창계수가 달라지므로 시료의 제작에 주의를 기울여야 한다. 그런데 식 (6)은 최대 변형이 발생되는 납땜부위를 대상으로 유도된 것이므로, α_{BGA} 도 최대 변형부위를 기준으로 작성된 시료로부터 측정되어야 한다. 따라서 <그림 3> (d)의 굵게 표시된 사각형의 크기로 시료를 제작하였으며, 이를 이용하여 측정한 열팽창계수들을 정리한 것이 <표 5>이다.

입력변수의 데이터는 동일한 표본으로부터 구하는 것이 좋지만, 이 논문의 경우에는 동일한 표본으로부터 데이터를 측정하는 것이 불가능하여 서로 다른 표본으로부터 데이터를 수취하였다. 예를 들어, L_D는 실장되지 않은 BGA 패키지를 이용하여 측정하였고, h 는 실장된 패키지를 이용하여 측정하였다. 실제로 고장물리에서는 서로 다른 표본으로부터 측정된 입력변수의 값들을 이용하여 제품의 수명을 예측하는 것이 일반적이다.

3.4 몬테칼로 시뮬레이션

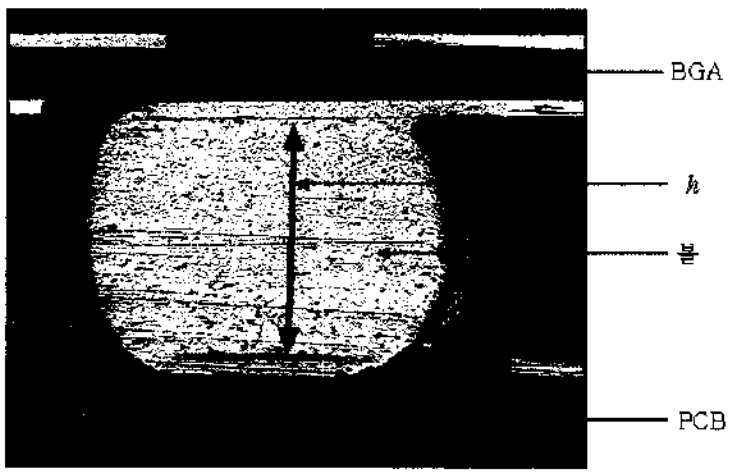
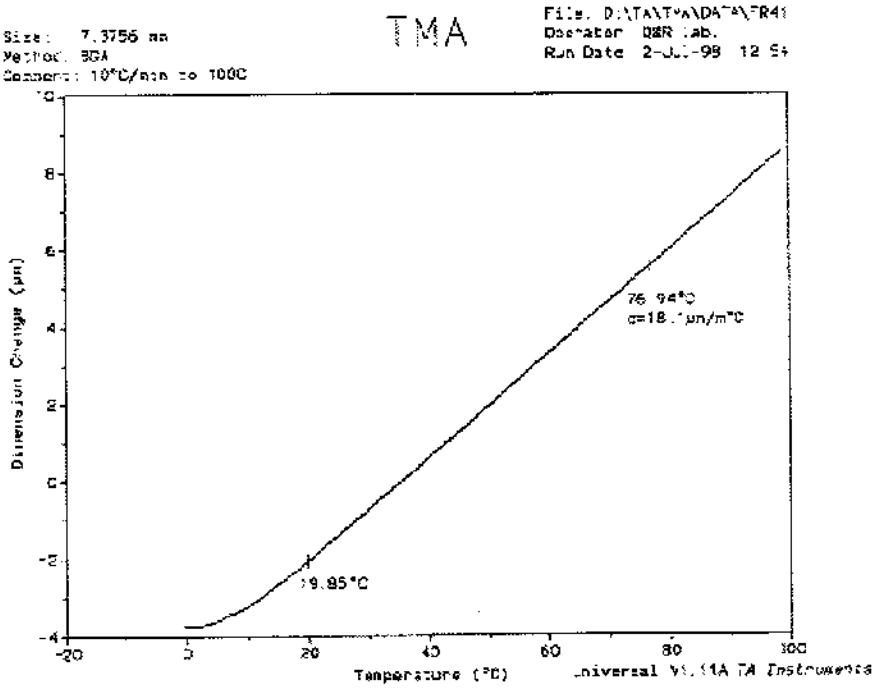
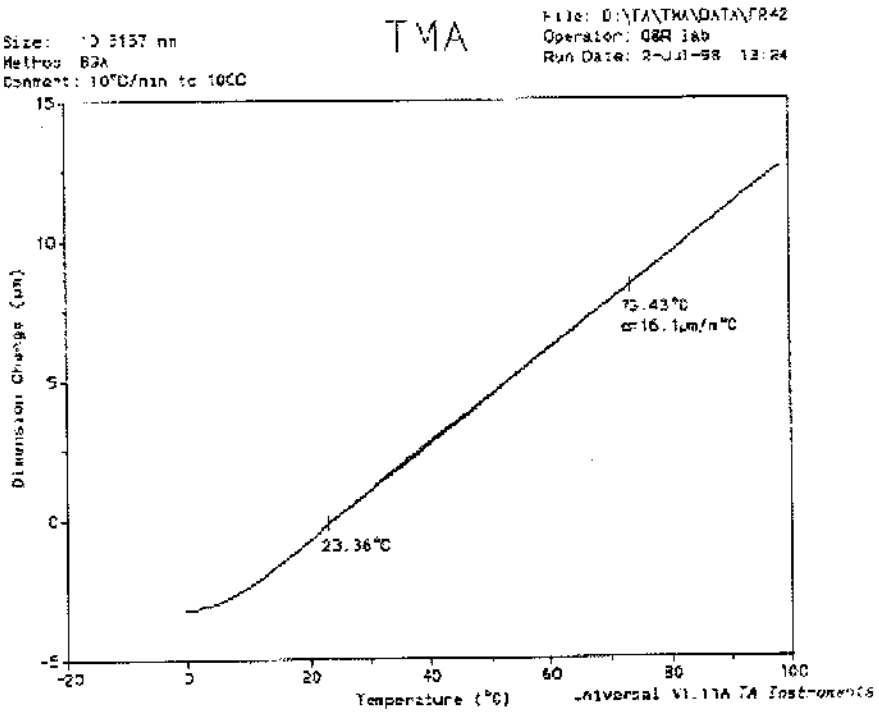


그림 7. 광학현미경으로 찍은 납땜부위.



(a) $\alpha_{PCB,X}$



(b) $\alpha_{PCB,Y}$

그림 8. 열-기계적 특성측정기로 $\alpha_{PCB,X}$와 $\alpha_{PCB,Y}$를 측정한 결과.

표 4. $\alpha_{PCB,X}$, $\alpha_{PCB,Y}$, α_{PCB} 측정값(단위: μm/m ℃)

$\alpha_{PCB,X}$	$\alpha_{PCB,Y}$	α_{PCB}
18.1	16.1	24.22
13.1	19.3	23.33
17.4	16.1	23.71
15.7	17.9	23.81
14.5	18.2	23.27
15.3	18.3	23.85

표 5. $\alpha_{BGA,X}$, $\alpha_{BGA,Y}$, α_{BGA} 측정값(단위: μm/m ℃)

$\alpha_{BGA,X}$	$\alpha_{BGA,Y}$	α_{BGA}
5.23	5.46	7.56
7.02	6.91	9.85
5.41	5.73	7.88
6.02	6.24	8.67
6.54	5.98	8.86
6.43	6.67	9.26

실험에 의한 측정값들을 이용하여 입력변수들의 삼각분포를 그린 것이 <그림 9>이다. 이 그림에서 η_{min}, η_{max} 와 η_{mode}는 편의상 실측값의 최소값, 최대값과 측정값들의 평균으로 하였다. 이들 삼각분포를 이용하여 식 (3)의 삼각확률변수를 생성한 후, 생성된 값들을 식 (7)에 대입하여 N값들을 구했다. <그림 10>은 시뮬레이션을 1000번 수행하여 얻은 N값들을 히스토그램으로 나타낸 것이다.

3.5 수명분석

<그림 11>은 BGA 패키지의 수명이 어떤 확률분포를 따르는 지를 알아보기 위하여 시뮬레이션을 통해 구한 N값들을 확률지에 타점한 결과이다. 또한 <표 6>은 N값들이 확률지상에서 얼마나 선형성을 띠는지를 좀더 정량적으로 파악하기 위하여 최소제곱법에 의한 R^2값들을 계산한 것이다.

참고로 <표 6>의 R^2값들은 전체적으로 상당히 큰 값을 가지는데, 이는 0에서 1까지의 값을 가지는 Y축의 범위에 비하여 X축의 범위가 훨씬 더 넓기 때문이다(Myers, 1986). <그림 11>과 <표 6>을 보면 N값들이 대수정규 확률지상에서 직선에 가깝고 R^2값도 대수정규분포인 경우에 가장 크므로, BGA 패키지의 수명은 다음과 같은 대수정규 분포를 따른다고 할 수 있다;

$$f(N) = \frac{1}{N\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln N-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \qquad (9)$$

시뮬레이션에 의한 N값들과 모토롤라社에서 실시한 27개의 실제 시험데이터를 이용하여 BGA 패키지 수명분포의 모수들을 추정한 결과, 시뮬레이션 결과를 이용한 경우 $\hat{\mu}=9.3918$, $\hat{\sigma}=0.0995$이고 실제 시험데이타를 이용한 경우 $\hat{\mu}=9.3943$, $\hat{\sigma}=0.1151$임을 알 수 있었다. <그림 12>는 이들 모수들을 이용하여 확률밀도함수를 그린것이다. 이 그림을 보면 이 연구에서 제안한 방법과 실제 수명시험에 의한 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

일반적인 고장물리에서는 입력변수들의 평균을 구한 후, 이들 평균을 고장 메카니즘 모형에 대입하여 하나의 수명만을 계산한다. <그림 9>의 η_{mode} 값들을 이용하여 구한 N값은 12,352.11이고, 이 값은 이 연구에서 구한 N값들의 평균 $\exp(\mu+\sigma^2/2)=12{,}049.08$과 유사하다. 그러나 고장물리에서는 한 가지 값만 구할 수 있으므로 계산된 값의 신빙성(likeliness)을 객관적으로 평가할 수 없다는 단점이 있다.

3.6 민감도 분석

3.5 소절의 수명분석 결과 BGA 패키지의 수명이 만족할 만한

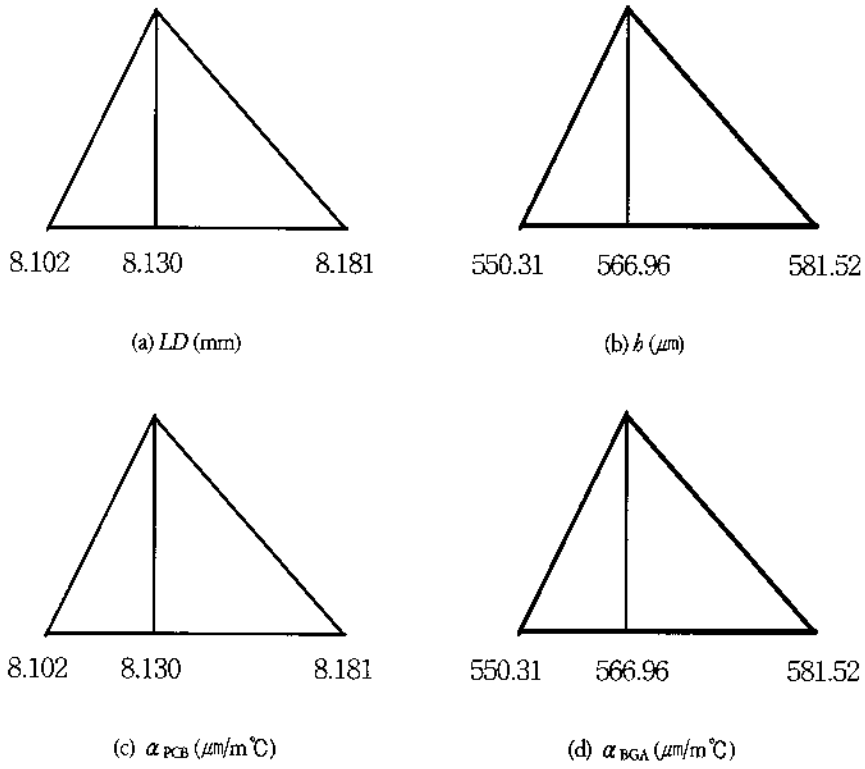


그림 9. 입력변수들의 확률분포.

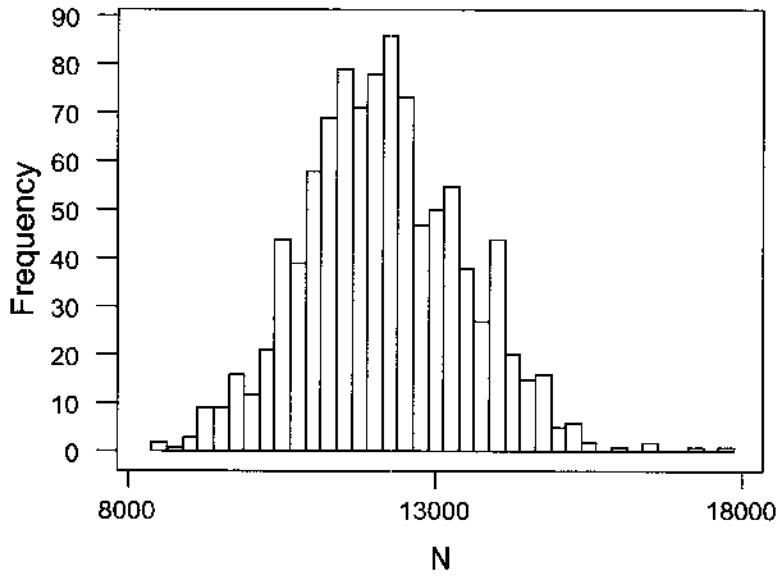
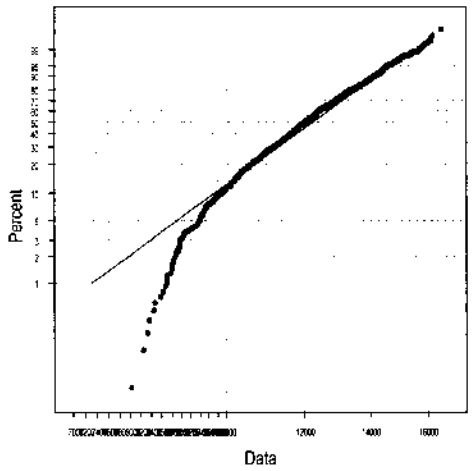
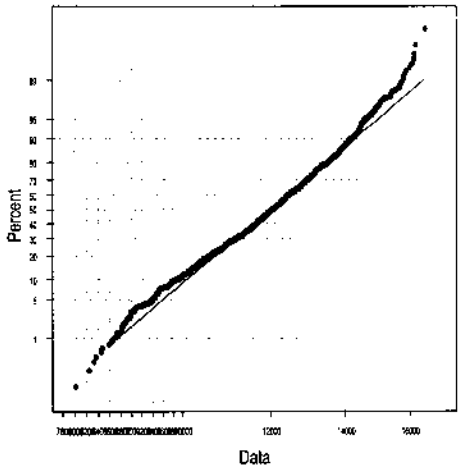


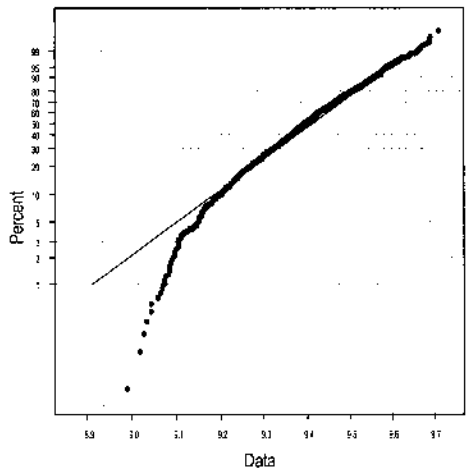
그림 10. N의 히스토그램.



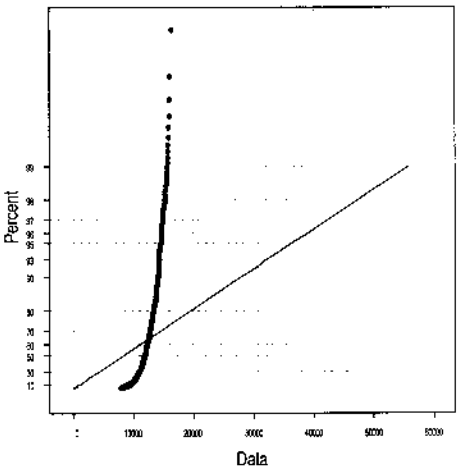
(a) 와이블 확률지



(b) 대수정규 확률지



(c) 극한값 확률지



(d) 지수 확률지

그림 11. N 값들을 확률지에 타점한 결과.

수준이 되지 못하면, 이의 개선을 위한 노력이 필요하다. 예를 들어, 제품의 B10 수명이 적어도 11,000이 되기를 원한다면 신뢰도 개선을 위한 조처를 취해야 하는데, 제한된 자원을 투입하여 최대의 개선 효과를 얻기 위해서는 어떤 입력변수가 제품의 수명에 큰 영향을 미치는지를 알아야 하고 이를 위하여 민감도분석을 수행할 수 있다. 현실적인 신뢰성 업무에서는 초기고장이 중요하므로, 이 소절에서는 민감도분석의 평가측도로 B10 수명을 이용하였다.

<그림 13>은 입력변수의 최소값과 최대값을 고정시킨 상태에서 최빈값 η mode 를 조금씩 변화시켜 가면서 구한 B10 수명이다. 이 그림을 보면 PCB의 열팽창계수가 제품의 수명에 미치는 영향이 가장 큼을 알 수 있다. 따라서 PCB의 열팽창계수를 줄이는 방향으로 신뢰도 개선 대안을 찾는 것이 가장 효과적인 방법임을 알 수 있고, 이를 위해서는 FR-4 수지보다 열팽창계수가 작은 BT 수지나 Aramid, Quartz 등과 같은 강화재료(fiber reinforcement)를 이용하여 PCB를 제작하는 방법 등을 생

표 6. N값을 이용하여 계산한 R^2

확률분포	와이블	대수정규	극한값	지수
R^2	0.9631	0.9900	0.9355	0.8129

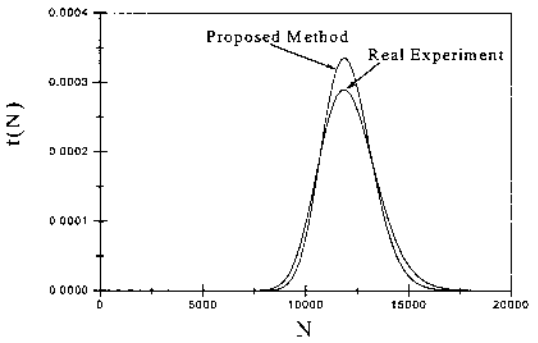


그림 12. 제안된 방법과 실제 수명시험의 비교.

각해 볼 수 있을 것이다(Evans and Evans, 1991). 이외에도 h와 LD 같은 공정과 관련된 변수들을 조정하여 제품의 신뢰도를 개선하는 방법도 생각해 볼 수 있으나, 이 경우에는 BGA 패키지의 크기가 커지는 위험이 있다.

<그림 14>는 입력변수의 최빈값은 고정되어 있다고 가정한 후, 입력변수들의 최대값과 최소값의 차이인 범위를 조금씩 변화시켜가면서 구한 B10 수명이다. 이 그림을 보면 범위의 변동은 제품의 신뢰도에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있고, 이는 최대값과 최소값의 추정에 약간의 오차가 개입되더라도 신뢰도 평가에는 큰 영향이 없음을 의미한다.

4. 결 론

이 연구에서는 고장물리와 분포이론을 접목하여 제품의 신뢰도를 평가하고 개선시키는 방법론을 제안하고, BGA 패키지 용접부의 신뢰도 개선을 위하여 제안된 방법을 적용하였다. 제품의 물성, 부품 및 부품들간의 기하학적 정보, 제품 사용환경, 제품에 가해지는 응력 등으로부터 BGA 패키지 용접부의 주 고장 메커니즘이 피로 고장 메카니즘임을 알 수 있었고, 피로 고장 메커니즘 모형과 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 제품의 수명이 대수정규분포를 따름을 알 수 있었다. 유도된 대수정규분포를 이용하여 BGA 패키지 용접부의 수명과 관련된 품질특성값들을 계산하였고, 신뢰도 개선을 위하여 민감도 분석을 수행하였다.

이 논문의 사례연구에서는 피로고장 메카니즘 모형의 유도를 위하여 온도의 범위가 0 ℃에서 100 ℃까지인 간단한 온도 사이클을 가정하였다. 그러나 실제 상황에서는 온도 이력이 좀 더 복잡할 것이고, 경우에 따라서는 온도의 범위가 0℃에서 100 ℃ 사이를 넘는 경우도 있을 것이다. 만약 온도의 범위가 이 범위를 벗어나면 이 논문에서 사용한 피로 고장 메커니즘 모형은 사용할 수 없고, 대신 Norris-Landzburg 모형을 사용해야 한다(Noris and Landzberg, 1969). 또한 이 논문에서는 시뮬레이션을 위한 입력변수의 확률분포로 삼각분포를 가정하였는데,

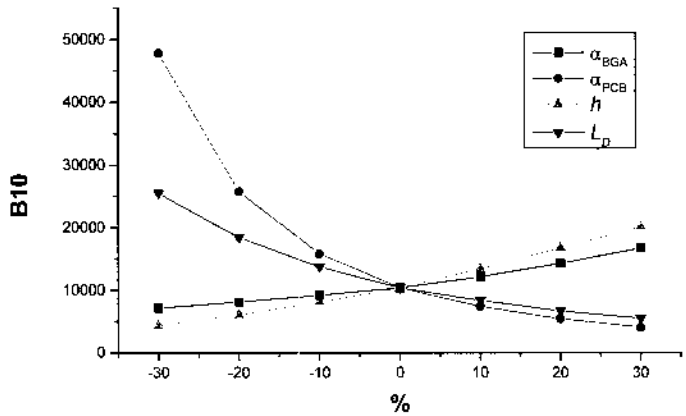


그림 13. 입력변수의 최빈값을 변화시켜가면서 구한 B10 수명.

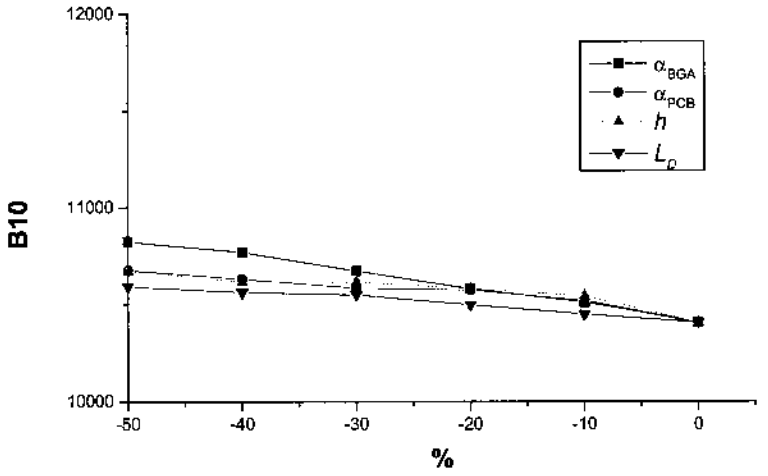


그림 14. 입력변수의 범위를 변화시켜가면서 구한 B10 수명.

만약 실험 데이터의 수가 많다면 실험 데이터를 이용하여 입력변수의 확률분포를 알아낸 후 N의 값들을 구하는 것이 더욱 효과적일 것이다.

신뢰성 설계를 위해서는 제품의 기획에서부터 설계, 생산, 사용의 전과정 동안 제품의 신뢰도를 예측하고 평가하는 작업이 필요하고, 신뢰도 실증시험(Reliability Demonstration Test)이나 신뢰도 보증시험(Reliability Qualification Test) 등에는 많이 시간 및 비용이 발생된다. 이러한 신뢰성 설계에 본 연구에서 제안하는 방법론을 이용한다면 시제품 제작 이전에도 제품의 신뢰도를 예측을 할 수 있으며, 특히 실제 제품 대신 부품의 특성을 시험함으로써 검사시간 및 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

Collins, J. A. (1981), *Failure of Materials in Mechanical Design*, John Wiley & Sons.

Dasgupta, A. (1991), Thermomechanical analysis and design, *in Handbook of Electronic Package Design(edited by Pecht, M.)*, Marcel Dekker.

Dasgupta, A. (1995), Hardware reliability, *in Product Reliability, Maintainability and Supportability Handbook(edited by Pecht, M.)*, CRC Press.

Dasgupta, A. and Pecht, M. (1991), Material failure mechanism and damage models, *IEEE Transactions on Reliability*, 40, 531-536.

Evans, J. W., Evans, J. Y. and Yu, B. K. (1997), Designing and building-in reliability in advanced microelectronic assemblies and structures, *IEEE Transactions on Components*, Packaging, and Manufacturing Technology, 20, 38-45.

Evans, J. Y. and Evans, J. W. (1991), Electronic materials and properties, *in Handbook of Electronic Package Design(edited by Pecht, M.)*, Marcel Dekker.

Gilbert, S. and George, J. F. (1973), *An analysis of the finite element method*, Prentice-Hall.

Han, B. and Guo, Y. (1996), Determination of an effective coefficient of thermal expansion of electronic packaging components: a whole-field approach, *IEEE Transactions on Components*, Packaging, and Manufacturing Technology, 19, 240-247.

Hazelrigg, G. A. (1996), *Systems Engineering: An Approach to Information Design*, Prentice Hall.

Kalbfleish, J. D. and Lawless, J. F. (1988), Estimation of reliability in field performance studies, *Technometrics*, 30, 365-388.

Lawless, J. F. (1981), *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, John Wiley & Sons.

Myers, R. H. (1986), *Classical and Modern Regression with Application*, Duxbury Press.

Nelson, W. (1990), *Accelerated Testing-Statistical Models, Test Plans and Data Analyses*, John Wiley & Sons.

Norris, K. C. and Landzberg, A. H. (1969), Reliability of controlled collapse interconnections, *IBM Journal of Research and Development*, 13, 266-271.

O'Connor, R. D. T. (1991), *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons.

Suzuki, K. (1985), Estimation of lifetime parameters from incomplete field data, *Technometrics*, 27, 263-272.

Wild, R. N. (1974), Some fatigue properties of solders and solder joints, *IBM Report*, no. 7AZ000481, IBM Federal Systems Division.