

## BGA 패키지에 사용된 유/무연 솔더의 신뢰성 평가

이억섭<sup>1</sup> · 허만재<sup>2</sup> · 명노훈<sup>2</sup> · 김동혁<sup>2</sup>

### Reliability Estimation of Lead and Lead-free Solder Used in BGA Packages

Ouk Sub Lee, Man Jae Hur, No Hoon Myoung and Dong Hyeok Kim

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, InHa University, Incheon, 402-751, Korea, leeos@inha.ac.kr

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, InHa University, Incheon, 402-751, KOREA,  
mrgio@hanmail.net, profmnh@yahoo.co.kr, kdonghyeok@hotmail.com

#### Abstract

전자 패키지가 열을 받을 때 회로기판과 칩의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 응력은 솔더 조인트의 파손에 영향을 미친다. 본 연구에서는 이 영향을 정량적으로 규명하기 위하여 열 충격시험기를 이용해 얻어진 솔더 조인트의 전기저항 변화와 수명과의 상관관계를 규명하였고, BGA 솔더 조인트의 수명을 정량적으로 도출하였다. 또한 Sn-3.5Ag-0.5Cu 무연 솔더와 63Sn-37Pb 유연 솔더를 위의 실험에 동시에 적용시켜 건전성을 FORM(first-order reliability method)과 Weibull Function Model을 이용해 비교하였다.

## 1. Introduction

약5000년 전부터 인류가 사용해온 땀납(솔더링) 기술은 20세기에 와서 그 접합원리에 대

한 연구가 활발해졌으며, 전자기기에서 전자부품의 조립에 가장 효과적인 접합기술로 사용되어왔다. 하지만 유연 솔더로 인해 전자기기의 폐기시 환경오염이 유발되어 세계 각국에서는 유연 솔더 사용을 금지하는 각종 규제가 생겨나기 시작했다. 이런 규제들에 대응하여 각 선진국에서 무연 솔더에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

전자부품 실장에 이용되는 뿔납 접합부의 열화에 관련되는 열 피로현상은 뿔납의 신뢰성에 영향을 미치는 가장 중요한 인자로 알려져 있고 이러한 인자 이외에도 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 솔더의 접합부분에 피로파괴를 일으킨다. 특히 서로 기계적인 성질이 다른 부품들 사이에서 열팽창계수의 차이로 인해 뿔납 접합부의 온도변화에 대응하는 변형과 응력이 발생되고 결과적으로 뿔납 접합부에 열 피로 고장을 유발시키게 된다[1,2,3].

본 연구에서는 솔더 조인트의 신뢰성에 영향을 미치는 절연저항의 변화를 실험적으로 확인하기 위해 BGA칩이 무연 솔더인 Sn-3.5Ag-0.5Cu (SAC)와 유연 솔더인 63Sn-37Pb (SnPb)으로 실장된 daisy-chain specimen에 열 피로 충격에 의한 가속실험을 수행하였다. 그리고 이 실험의 결과를 포함하는 한계상태방정식을 도입하여 파손확률을 산정하고 이에 대응하는 신뢰도지수와 안전 계수에 대한 연관성을 규명한 후 FORM(first-order reliability method)과 Weibull Function Model을 이용해 도출된 결과도 비교하였다.

## 2. Accelerated Test

제품의 신뢰성 보증을 위해서는 제품의 파손 메커니즘에 대한 정보가 필요하며, 이를 획득하기 위해서 여러 가지 실험이 수행된다. 그러나 그 중 수명실험은 많은 시간과 비용을 요구하게 되므로 이를 해결하기 위해서 가속실험(accelerated test)이 널리 이용되어 왔다. 그것은 시스템을 정상조건보다 더 큰 응력을 부과하여 실험하는 방법이다. 이런 조건에서 실험한 자료를 이용하여 정상조건에서의 시스템의 평균수명과 신뢰도, 고장률 등을 추론하는 것이다.

PCB 위의 솔더 조인트에 대한 실험에서 응력 수준은 부과되는 온도의 진폭과 시간으로 표현된다. 그리고 모형설정과 자료분석의 목적상 이러한 주기적 응력은 그 진폭을 하나의 일정 응력으로 간주하여 Figure 1과 같이 표현할 수 있다. Figure 1에서 수직 축은 온도의 진폭을 나타낸다.

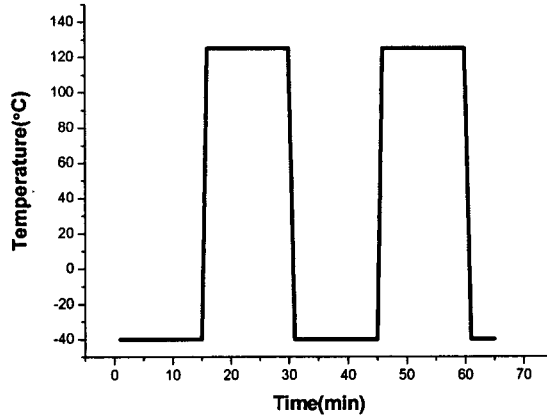


Fig. 1 Heat cycles in impact thermal stress accelerated test( $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ , 1 cycle/30min)

대부분의 실험에서 응력 주기의 빈도나 크기는 실제 제품이 사용되는 경우와 유사하게 취한다. 어떤 제품의 경우에는 실험조건이 완전히 일치하지 않을 수도 있으나, 약간의 불일치가 수명에 미치는 영향이 미소하므로 무시한다[1,4].

본 실험에서는 1cycle 을 30분 동안 실행되도록 설정하여  $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 열 충격을 가하여 솔더 조인트의 파손 메커니즘을 규명하였다.

### 3. Inverse Power Relationship

역승 관계식(inverse power relationship)은 제품 수명을 가속화 스트레스의 함수로 모형화 시키는데 널리 사용하고 있다. 가속화 스트레스 변수  $z$ 가 양수라고 가정할 때, 제품의 수명과 스트레스 간의 inverse power relationship은 다음과 같다.

$$x(z) = A/z^{r_1} \quad (1)$$

여기서  $A$ 와  $r_1$ 은 제품외형, 표본크기, 제조 및 시험방법 등의 특성값이 되는 모수이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(z) = (A'/z)^{r_1} = A''(z_0/z)^{r_1} \quad (2)$$

여기서  $z_0$ 는 특정한 스트레스 수준이다. 모수  $r_1$ 은 승 또는 지수라고 부른다[1].

역승 법칙은 열주기에 따르는 금속의 피로고장을 모형화 시키는데 사용된다. 열주기내의 온도구간  $\Delta T$ 의 함수로서, 고장까지의 주기의 수  $N$ 은 다음과 같은 경우 Coffin-Manson Relationship이라 부른다.

$$N = A/(\Delta T)^B \quad (3)$$

여기서  $A$ 와  $B$ 는 금속과 시험방법, 주기의 특성값이 되는 상수이다. 이 관계식은 기계부품과 전자부품에 널리 이용되어 왔으며, 전자부분에서는 솔더 조인트나 그 외의 접합에 사용되고 있다.

#### 4. Failure Probability Model

저항과 하중에 관한 변수들이 실제사용환경에서는 정규분포를 가지지는 않지만 본 연구에서는 FORM을 사용하기 위해서 정규분포를 따른다고 가정하고 확률분포가 평균과 표준편차에 의해서 결정된다고 가정하였다.

FORM은 한계상태방정식(LSF, limit state function)의 Taylor 급수 전개식의 1차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 모든 확률 변수들의 평균과 분산 및 분포형태를 이용하여 파손확률에 대한 상대적 지표인 신뢰도지수(reliability index)를 산정하는 방법이다[3].

한계상태방정식(LSF)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = R - L \quad (4)$$

여기서  $R$ 은 저항성분의 확률 변수이고,  $L$ 은 하중성분의 확률 변수이다. 따라서 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PF = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 신뢰도지수라고 하며 다음과 같이 나타낸다[3].

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (6)$$

여기서  $\mu_z, \mu_R, \mu_L$ 은 각 변수들의 평균이고?  $\sigma_z, \sigma_R, \sigma_L$ 은 각 변수들의 표준편차이다.

Rackwitz and Fiessler는 Figure 2와 같은 과정으로 주어진 상태에 대한 최소 신뢰도지수를 결정하는 방법을 제안하였다[4].

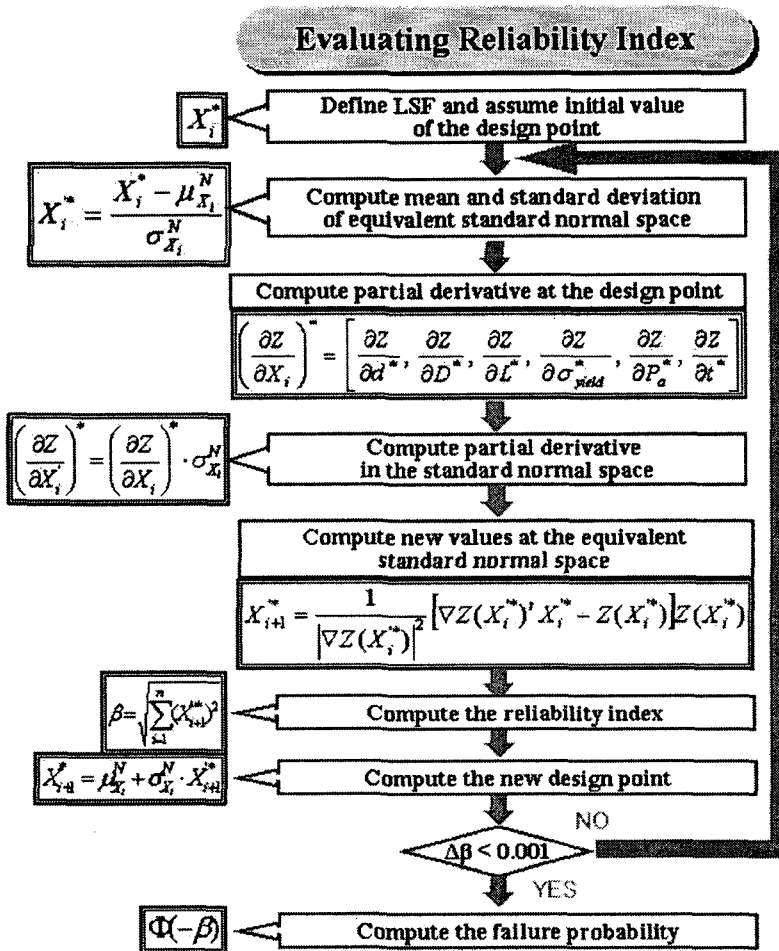


Fig. 2 Processing of computing the reliability index

본 연구에서는 신뢰도지수가 임의의 값 ( $\Delta\beta \leq 0.001$ )에 수렴할 때까지 Figure 2의 과정을 반복하여 신뢰도지수를 계산한 이후에 식(5)를 이용하여 파손확률을 구하였다.

## 5. Failure Assessment Criterion

본 연구에서는 Coffin-Manson Equation을 부분적으로 변경해 파손평가기준으로서 사용했다[5].

$$Z = N_f - N_d \tag{7}$$

$$N_f = C \cdot F^m \cdot (\Delta T)^{-n} \exp\left(\frac{Q}{RT_{\max}}\right) \tag{8}$$

여기서  $N_d$ 는 designed life,  $N_f$ 는 failure life, C, m, n은 material constants, F는 frequency,  $\Delta T$ 는 temperature range, Q는 activation energy, R은 기체 상수이다.

## 6. Weibull Function Model

와이블분포는 분포의 형태가 다양하여 어떤 자료든지 적용시키기가 용이하며 확률밀도함수가 수학적으로 다루기에 비교적 수월하기 때문에 신뢰성분석에 가장 많이 이용되는 수명분포이다[1].

식(9)는 와이블분포를 사용한 누적파손분포이다.

Cumulative failure distribution :

$$F(N) = 1 - 0.5 \left(\frac{N}{N_f}\right)^\alpha \tag{9}$$

where,

$F(N)$  : acceptable cumulative failure probability for the component under consideration after N cycle

$N$  : expected product service life, cycles of operation

$a$  : Weibull shape parameter, slope of Weibull probability plot

## 7. Experimental Procedure

본 연구에서는 Figure 3에 나타낸 것과 같은 BGA를 실장한 Figure 4에서 보여지는 daisy-chain specimen을 사용하여 솔더 조인트의 파손 메커니즘을 정량적으로 규명하였다.

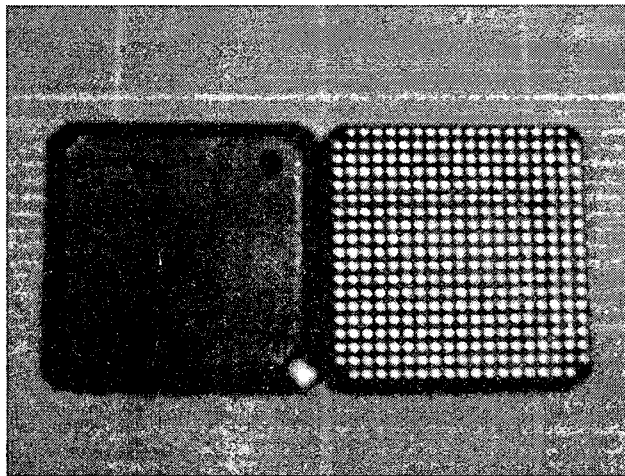


Fig. 3 BGA chip (mpc860) used in this study

BGA 패키지의 파손 메커니즘은 솔더와 기판 사이의 열팽창계수 차이에 의하여 솔더와 기판 사이의 균열이 발생한다는 것이 규명되어 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 열팽창계수 차이에 의한 솔더와 기판사이의 파손에 의한 전기적 저항 증가를 측정함으로써 솔더 조인트의 파손 메커니즘을 정량적으로 규명하였다.

시편의 크기는 150mm×150mm 이고 FR-4 보드를 사용하였다. SnPb 솔더 조인트와 SAC 솔더 조인트의 지름은 0.76mm이고 솔더 조인트간의 pitch는 1.27mm로 하였다. BGA는 mpc860 chip이고 25mm square size이며 361 balls가 실장되어 있다.

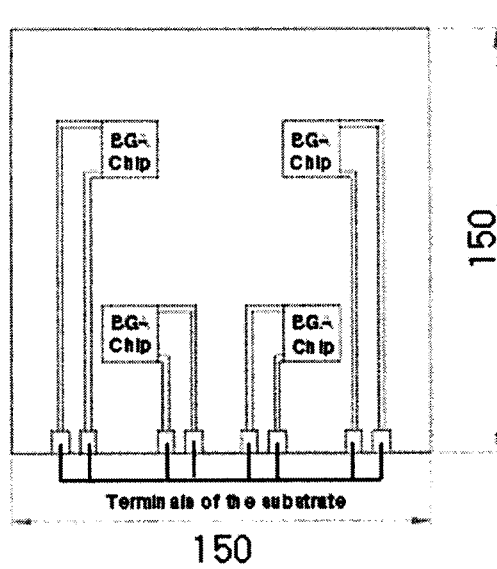


Fig. 4 Schematic of daisy-chain surface mounted BGA

FR-4 보드의 두께는 1.6mm이고 다층 단면기판으로 되어있다. SnPb 솔더 조인트의 용융 온도는 183℃이고 SAC 솔더 조인트의 용융온도는 213℃이므로 가속수명실험에서 가해지는 온도범위를 - 40℃~ 125℃로 설정하였다.

Figure 5에 나타낸 자체 제작한 실험장비를 이용하여 열 충격 실험을 하였다.



Fig. 5 Newly manufactured thermal impact experimental apparatus



Table 1에는 Figure 5에 나타난 실험 장비의 제원과 성능에 대하여 기술하였다.

Table 1 Specification of thermal impact experimental apparatus

Temp. Range	-50℃ ~200℃
Size	Moving Rack 250×250×250mm High Temp Room 400×400×400mm Low Temp Room 400×400×400mm
Temp. Range (up-down)	-High temp up time RT~200℃/50min -Low temp up time RT~-50℃/70min -Temp Return period 5min
Temp. Sensitivity	±2℃

## 8. Case Study

본 연구에서 사용한 Table 2의 값은 가속시험을 통하여 결정된 값이며 이것을 이용하여 파손확률을 산정하고 이에 대응하는 신뢰도지수를 규명하였다.

Figures 6,7은 SnPb솔더와 SAC솔더의 m값을 구하는 선도이다.

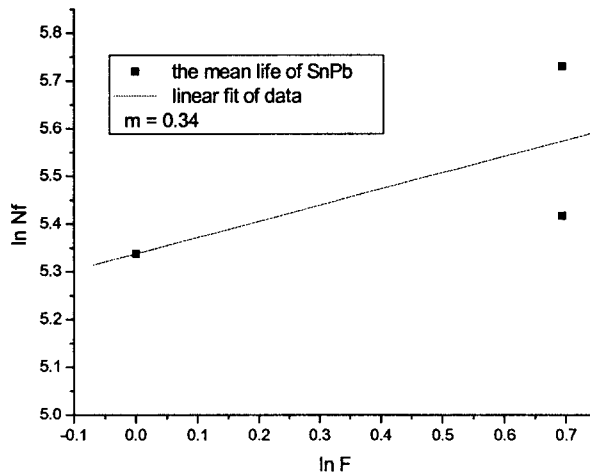


Fig. 6 Relationship between the frequency and the mean life using SnPb

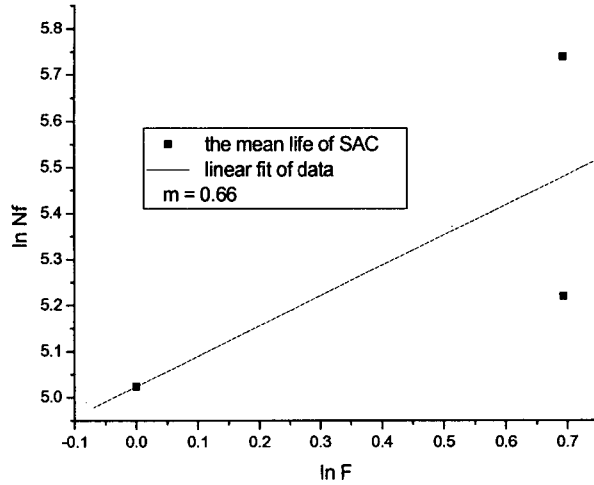


Fig. 7 Relationship between the frequency and the mean life using SAC

Figures 8,9는 SnPb솔더와 SAC솔더의 n값을 구하는 선도이다.

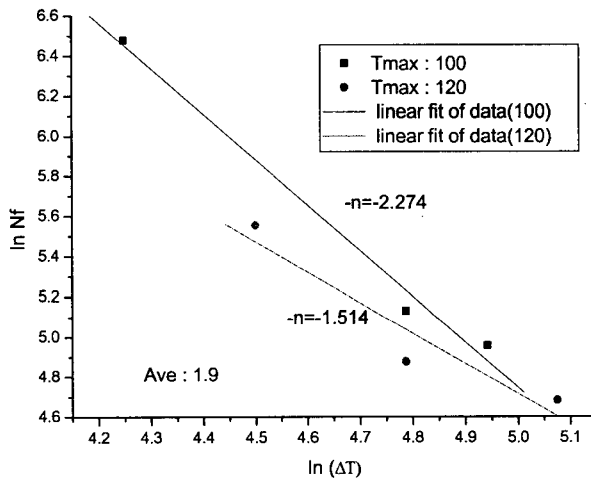


Fig. 8 Relationship between the delta of temperature and the mean life using SnPb

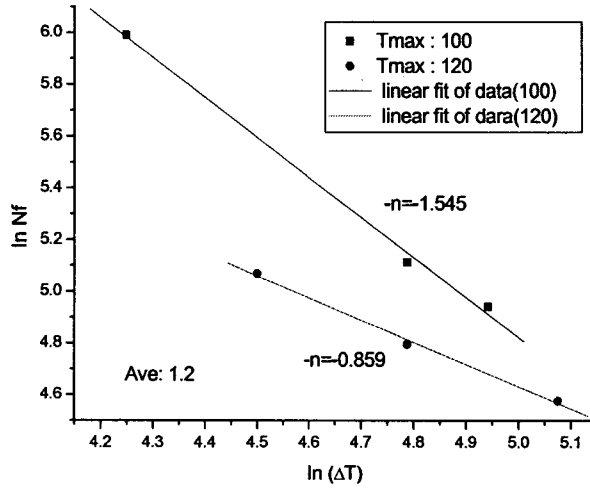


Fig. 9 Relationship between the delta of temperature and the mean life using SAC

Figures 6~9을 통하여 Table 2의 값을 구하였다.

Table 2 Random variables, their means and C.O.V. used in the example

Variable	Mean (SnPb)	Mean (SAC)	C.O.V.
m	0.34	0.66	0.02
n	1.9	1.2	0.02
Q	15.5KJ/mol	28.8KJ/mol	—
F	2cycle/hour	2cycle/hour	—
C	0.5		—
R	8.3115J · K <sup>-1</sup>		—
$\Delta T$	-40 ~ 125		—

변동계수(C. O. V., coefficient of variation)는 다음과 같이 정의된다.

$$C.O.V. = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \tag{10}$$

여기서  $\sigma_x$ 는 표준편차,  $\mu_x$ 는 평균이다.

## 9. Results and Discussions

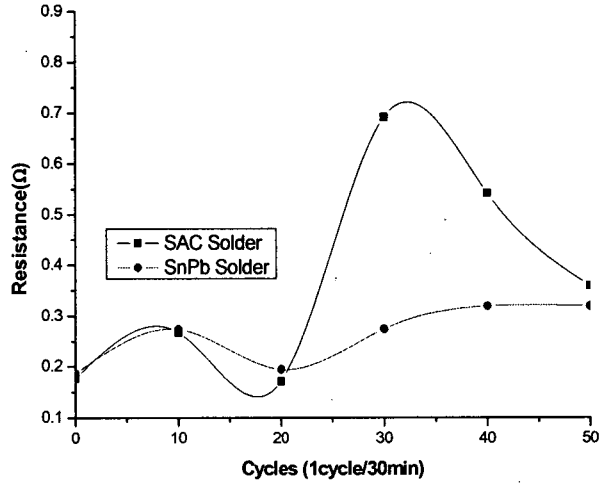


Fig. 10 Change in resistances of SnPb and SAC solders with respect to time

Figure 10에서 나타난 것과 같이 열 충격 사이클 후 SnPb Solder 와 SAC Solder의 저항치가 증가함을 알 수 있다. 20cycles까지는 SnPb Solder 와 SAC Solder의 저항치가 0.2정도로 큰 차이가 없었으나, 20cycles 구간이후에 Sn-Ag-Cu Solder의 저항치가 0.8까지 증가함을 알 수 있다. 이로써 SAC Solder가 SnPb Solder 에 비해 시간이 지날수록 솔더 조인트가 열화되고 그 물성치 변화가 초기에 생기므로 성능이 저하됨을 알 수 있다. 솔더 조인트의 저항치 증가는 chip과 substract간의 전기적 연결능력을 저하시킨다. SAC Solder가 SnPb Solder 보다 저항치의 증가를 보이므로 전기적 연결 성능이 저하됨을 알 수 있다. 성능이 저하되므로 신뢰성이 저하된다고 평가할 수 있다.

Figure 11 은 FORM을 이용해 thermal fatigue life에 따른 SnPb와 SAC의 파손확률의 변화를 보여주고 있다.

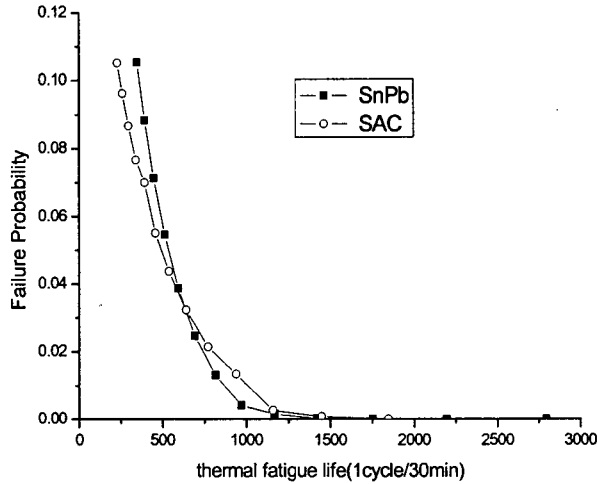


Fig. 11 A relationship between SnPb and SAC by thermal fatigue life using FORM

Figure 11에서와 같이 thermal fatigue life가 길수록 파손확률은 감소함을 알 수 있다. thermal fatigue life가 1200cycles이후에는 파손확률이 현저하게 감소함을 알 수 있다.

Figure 12는 Weibull function을 이용해 thermal fatigue life에 따른 SnPb와 SAC의 파손확률의 변화를 보여주고 있다.

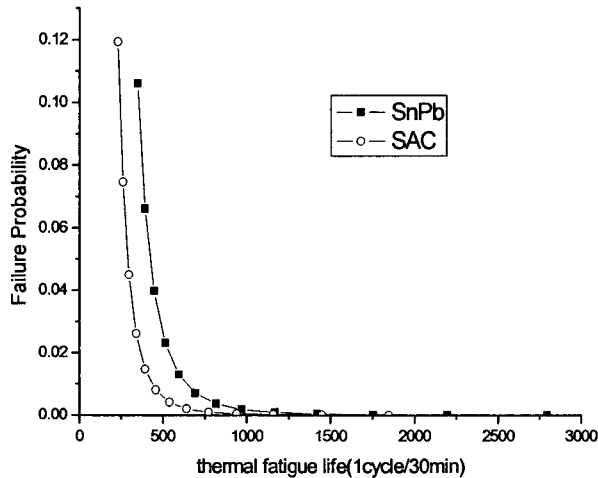


Fig. 12 A relationship between SnPb and SAC by thermal fatigue life using Weibull function

Figure 12에서와 같이 thermal fatigue life가 길수록 파손확률은 감소함을 알 수 있다. thermal fatigue life가 500cycles이전에는 파손확률이 급격하게 떨어지다가 750cycles이후에는 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Figure 13은 FORM과 Weibull function을 이용해 thermal fatigue life에 따른 SnPb와 SAC의 파손확률의 변화를 비교해서 보여주고 있다.

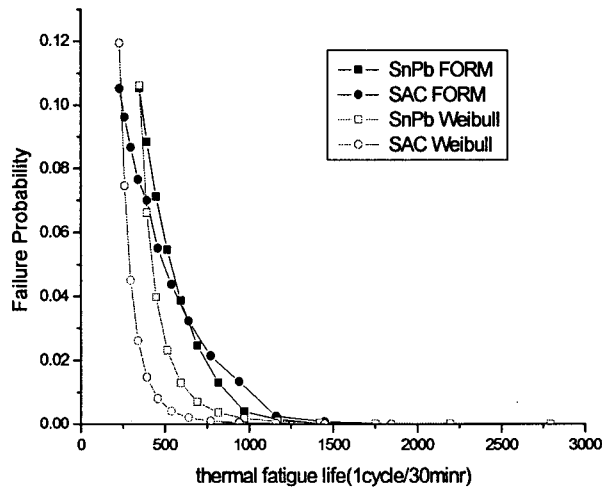


Fig. 13 A relationship between SnPb and SAC by thermal fatigue life using FORM and Weibull function

1200cycles 까지 Weibull function을 이용한 파손확률의 변화는 thermal fatigue life의 변화에 민감하게 반응하여 FORM을 이용해 나온 파손확률의 변화에 비해 큰 기울기로 감소한다. SAC solder에 대해서도 FORM과 Weibull function을 이용한 결과를 비교해 보면 파손확률이 거의 일정해지는 thermal fatigue life가 각각 750cycles과 1200cycles로 큰 차이를 보이고 있다.

## 10. Conclusions

본 연구에서는 가속시험을 통해 규명한 파손 메커니즘을 이용, FORM과 Weibull Function Model을 적용하여 thermal fatigue life 조건이 SnPb 와 SAC솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가속시험을 통해 SnPb 솔더 조인트의 파손 메커니즘이 열 충격에 의한 균열에 기인한 저항의 증가임을 규명하였다.
- 2) thermal fatigue life가 높은 솔더 조인트일수록 SnPb 와 SAC 솔더 조인트의 파손확률이 감소함을 규명하였다.
- 3) FORM과 Weibull function을 통해 분석한 파손확률은 1200cycles 이후에만 동일하며 그 전에는 많은 차이가 있음을 알았다.

본 연구에서는 수집된 실험데이터가 적어 일반화하기에는 미비한 점이 많아 차후 계획되어 있는 열 충격 실험을 통해 다양한 데이터를 축적하여 m, n의 값 선정에 있어 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안에 대해 연구할 계획이다.

## Acknowledgment

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구를 위한 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## Reference

- (1) S. Y. Youn, 1996, "Reliability Analysis" , Ja-you Academic, pp. 109- 157.
- (2) D. Wei, and J. J, Bau, 1987, "Some Optimal Designs for Grouped Data in Reliability Demonstration Test" , IEEE Trans. on Reliability R-36, 235, pp. 600-604.
- (3) O. S. Lee, and J. S. Pyun, 2001, "Failure Probability Model of Buried Pipeline," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 116-123.

- (4) R. Rackwitz, and B. Fiessler, 1978, "Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences." , Computers and Structures, Vol. 9, No. 5,pp. 484-494.
- (5) S. Ikuo, M. Hideo, O. Yasumitsu, 2004, "Solder joint reliability evaluation of chip scale package using a modified Coffin-Manson equation" , Microelectronics Reliability, No. 44, pp. 269-274.
- (6) O. S. Lee, N. H. Myoung and D. H. Kim, 2004, "Reliability Estimation of Solder Joint by Using Failure Probability Model" , Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting, pp. 365