

가속 시험을 통한 솔더조인트의 건전성 평가

명노훈², 이억섭¹, 김동혁²

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

² Department of Mechanical Engineering, InHa University, Incheon, 402-751, KOREA,
profmnh@hotmail.com, kdonghyeok@hotmail.com

Abstract

The thermal stresses induced by difference in Coefficient of Thermal Expansion between FR-4 board and 63Sn-37Pb solder joint directly affect the reliability of 63Sn-37Pb solder joint. This research, thus, focuses to investigate the crack initiation and propagation behavior around solder joint by imposing a designed Acceleration Life Test Procedure on solder joint by using a newly manufactured Thermal Impact Experimental Apparatus. The fracture mechanism of the solder joint was found to be highly influenced by thermal stresses. The reliability of solder joint was evaluated by using a failure probability model in terms of varying parameters such as frequency and temperature. The relationship between failure probability and safety factor was also studied.

1. Introduction

시스템의 신뢰성은 예견된 수명을 통하여 정해진 레벨을 유지하는 능력으로 정의될 수 있다. 이러한 시스템의 수명은 여러 요인에 의해 영향을 받지만, 재료적 불연속부가 되는 접합 또는 조립부가 신뢰성에 악영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 최근 전자제품의 고집적화에 따라 솔더링부의 평가와 신뢰성에 관한 관심이 증대되고 있다. 과거 30년 동안의 솔더링부의 신뢰성과 강도는 확률(probability)과 통계를 이용하

여 평가해 왔다. 그러나 전자제품의 발달과 관련하여, 아직 충분한 신뢰성 시험결과나 통계적인 데이터가 축적되지 않아 신뢰성 제고에 어려움이 따르고 있으며, 국내외적으로 솔더링부에 대한 연구와 신뢰성 평가 방법이 좀 더 세밀하게 검토되고 보완되어야 할 것으로 보인다. PCB(Printed Circuit Board)에 전기적 그리고 기계적 접합을 이루는데 솔더가 사용된 이래로 솔더링부의 신뢰성은 전자 패키징에서 매우 중요하게 취급되어 왔다.

본 연구에서는 솔더링부의 신뢰성에 영향을 미치는 인자를 실험적으로 확인하기 위하여 솔더 조인트를 많이 포함하고 있는 PCI 10/100 ethernet card specimen에 열피로 충격에 의한 가속 시험을 수행하였다. 이 실험의 결과를 포함하는 한계상태방정식을 도입하여 파손확률을 산정하고 이에 대응하는 신뢰성 지수와 안전계수에 대한 연관성을 규명하였다.

2. Accelerated Test

제품의 신뢰성 보증을 위해서는 제품의 파손 메커니즘에 대한 정보가 필요하며, 이를 획득하기 위해서 여러 가지 시험을 수행한다. 그러나 제품의 신뢰성이 높아짐에 따라 파손 시험에 소요되는 시간이 현실적으로 받아들일 수 없을 만큼 매우 길게 되었다. 이런 경우 원하는 시간 이내에 제품의 사용조건에서의 시험으로 파손 메커니즘에 대한 정보를 얻는 것은 불가능하거나 많은

시험비용이 소요된다. 이러한 현실적 어려움의 극복을 위해 사용조건보다 더 열악한 조건하에서 시험하는 가속 시험(accelerated test)기술을 많이 이용한다[1].

PCB위의 솔더 조인트에 대한 시험에서 스트레스 수준은 부과되는 온도의 진폭으로 표현된다. 그리고 모형설정과 자료분석의 목적상 이러한 주기적 스트레스는 그 진폭을 하나의 일정스트레스로 간주하여 Fig. 1와 같이 표현할 수 있다. 여기서 수직축은 온도의 진폭을 나타낸다. 또한 금속의 피로 시험에서는 싸인곡선 형태의 스트레스가 시험 표본에 부과되는 경우가 있다.

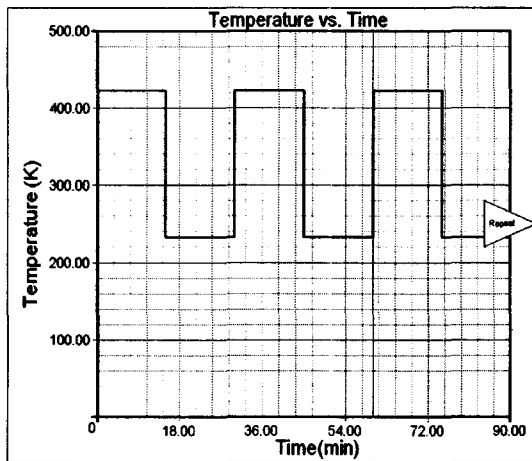


Fig. 1 Heat Cycle in Impact Thermal Stress Accelerated Test (-40~150℃, 1cycle/30min)

대부분의 시험에서 스트레스 주기의 빈도나 크기는 실제 제품이 사용되는 경우와 유사하게 취한다. 어떤 제품의 경우에는 시험조건이 완전히 일치하지 않을 수도 있으나, 수명에 미치는 영향이 미소하므로 무시한다.

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 수명 x 와 스트레스 z 간의 inverse power relationship은 다음과 같다.

$$x(z) = A/z^{\gamma_1} \quad (1)$$

여기서 A 와 γ_1 은 제품외형, 표본크기, 제조 및 시험방법 등의 특성값이 되는 모수이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(z) = (A'/z)^{\gamma_1} = A''(z_0/z)^{\gamma_1} \quad (2)$$

여기서 z_0 는 특정한 스트레스 수준이다. 모수 γ_1 은 승 또는 지수라고 부른다[1].

역승 법칙은 열주기에 따르는 금속의 피로고장을 모형화 시키는데 사용된다. 열주기내의 온도구간 ΔT 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 솔더조인트나 그 외의 접합에 사용되고 있다.

4. Failure probability model

본 연구에서는 저항과 하중에 관한 변수들을 모두 정규분포라 가정하고 확률분포가 평균과 표준편차에 의해서 결정된다고 가정하였다.

FORM(first-order reliability method)은 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[2].

한계상태방정식(LSF)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 R은 저항성분의 확률 변수이고, L은 하중성분의 확률 변수이다. 따라서 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 β 는 신뢰도지수(reliability index)라고 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 μ_Z, μ_R, μ_L 은 각 변수들의 평균이고 $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_L$ 은 각 변수들의 표준편차이다.

Rackwitz and Fiessler는 Fig. 2와 같은 과정으로 주어진 상태에 대한 최소 신뢰도지수(reliability index)를 결정하는 방법을 제안하였다[4].

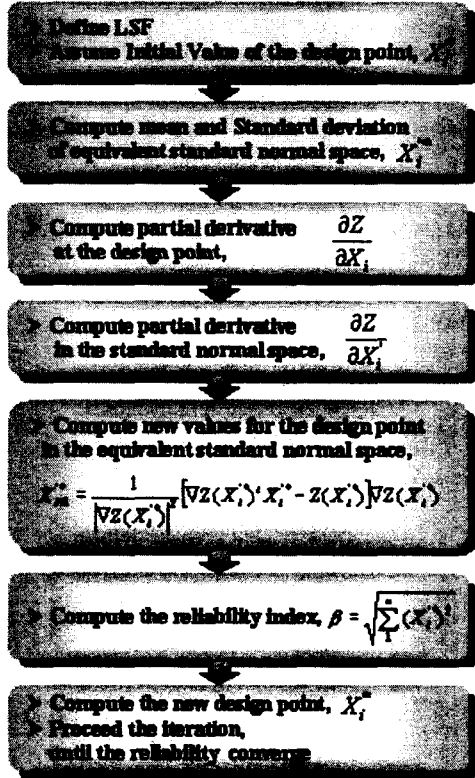


Fig. 2 Processing of computing the reliability index

본 연구에서는 신뢰도지수가 임의의 값 ($\Delta\beta \leq 0.001$)에 수렴할 때까지 Fig. 4의 과정을 반복하여 신뢰도지수를 계산한 이후에 식(5)를 이용하여 파손확률을 구하였다.

안전계수(SF, safety factor)는 신뢰도 지수를 구하기 위한 iteration 전후의 한계상태방정식을 구성하는 저항과 하중의 평균값을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SF = \frac{\mu_R - \mu_L}{\mu_R^* - \mu_L^*} \quad (7)$$

여기서 μ_R, μ_L 은 iteration 이전의 하중과 저항성분의 평균이고 μ_R^*, μ_L^* 는 iteration 이후의 하중과 저항성분의 평균이다.

5. Failure Assessment Criterion

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

$$Z = N_d - N_f \quad (8)$$

$$N_f = C \cdot F^m \cdot (\Delta T)^{-n} \exp\left(\frac{Q}{RT_{\max}}\right) \quad (9)$$

여기서 N_d 는 designed life, C, m, n 은 material constant, F 는 frequency, T 는 temperature range, Q 는 activation energy, R 은 gas constant이다.

6. Experimental Procedure

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같은 컴퓨터 부품인 PCI 10/100 ethernet card을 사용하여 솔더 조인트의 파손 메커니즘을 규명하였다. 시편의 크기는 110mm×40mm 이고, FR-4 보드를 사용하였다. 63Sn-37Pb 솔더조인트의 지름은 1.2mm이고, 솔더조인트간의 간격은 1mm로 하였다. FR-4보드의 두께는 1.5mm이고 다층 양면기판으로 되어있다.

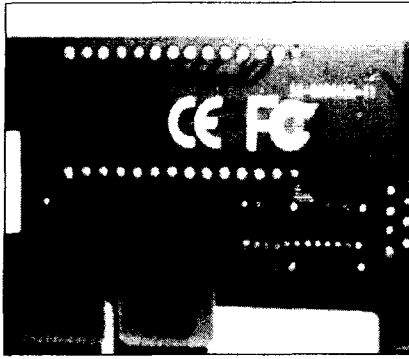


Fig. 3 PCI 10/100 ethernet card specimen

63Sn-37Pb 솔더조인트의 용융온도는 183℃ 이므로 가속수명시험의 가해지는 온도범위를 -40℃ ~ 150℃ 로 설정하였다. 본 실험에서는 1cycle을 30분 동안 실행되도록 설정하여 -40℃ ~ 150℃ 의 온도범위에서 열충격을 가하여 솔더조인트의 파손 메카니즘을 규명하였다.



Fig. 4 Newly manufactured thermal impact experimental apparatus

Table 1. Specification of thermal impact experimental apparatus

Temp. Range	-50℃ ~200℃
Size	Moving Rack 250 X 250 X 250mm High Temp Room 400 X 400 X 400mm Low Temp Room 400 X 400 X 400mm
Temp. range	-High temp up time RT~200℃/50min -Low temp up time RT~50℃/70min -Temp Return period 5min
Temp. sensitivity	±2℃

Cooled type	Forced air-cooled type
-------------	------------------------

7. A Case Study

본 연구에서 사용한 Table 2의 값은 가속 시험을 통하여 결정된 값이며 이것을 이용하여 파손확률을 산정하고 이에 대응하는 신뢰성 지수와 안전계수에 대한 연관성을 규명하였다.

Table 2. Random variables and their mean and c.o.v. used in the example

Variable	Mean	C.O.V.
m	0.33	0.02
n	0.19	0.02
Q	15.5KJ/mol	0.025
F	2cycle/hour	-
T_{max}	150℃	-
C	-0.5~0.7	0.025
R	8.3115J K ⁻¹	.0001

편차계수(C. O. V., coefficient of variation)는 다음과 같다.

$$C.O.V = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (10)$$

여기서 σ_x 는 표준편차, μ_x 는 평균이다.

8. Results and Discussion

가속 시험을 통해 파손메카니즘을 규명하기 위해 시험 전후의 솔더조인트를 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

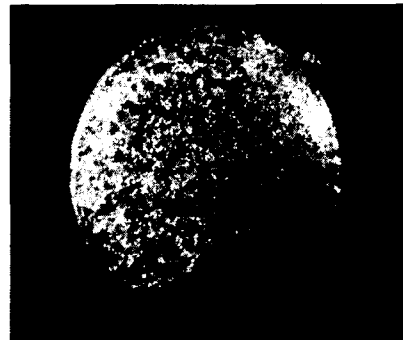


Fig. 5 63Sn-37Pb solder joint feature before testing

Fig. 5와 Fig. 6에서 보는것과 같이 열충격 가속 시험을 통해 솔더조인트에 원주방향으로 크랙이 발생하는 것을 알 수 있다. 크랙이 발생하면서 63Sn-37Pb 솔더조인트에 높은 전압강하가 일어나고, 이러한 전압강하로 인해 63Sn-37Pb 솔더조인트 자체의 저항이 높아지게 된다. 저항이 높아지면서 63Sn-37Pb 솔더조인트의 자체 기능은 저하된다.

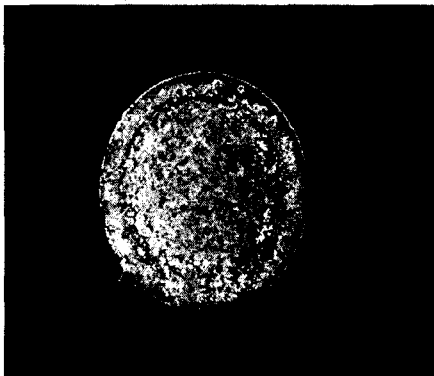


Fig. 6 63Sn-37Pb solder joint feature after testing

Fig. 7은 Frequency 에 따른 파손확률과 신뢰도 지수의 변화를 보여주고 있다.

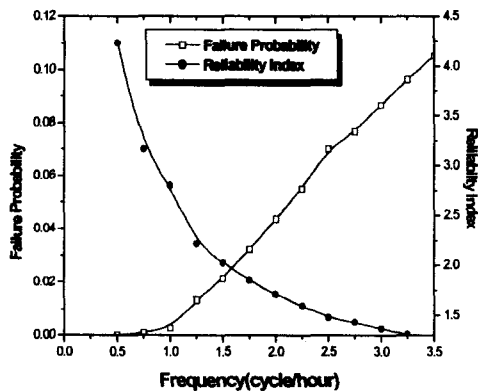


Fig. 7 A relationship between failure probability and reliability index by frequency variation

Fig.7에서 보는 것과 같이 Frequency가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률은 증가함을 알 수 있다. Frequency가 1cycle/hour이상에서는 파손확률이 비교적 크게 증가하고 Frequency가 0.75cycle/hour이하가 되면 파손확

률은 현저히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Frequency 따른 파손확률과 안전계수의 변화를 보여주고 있다

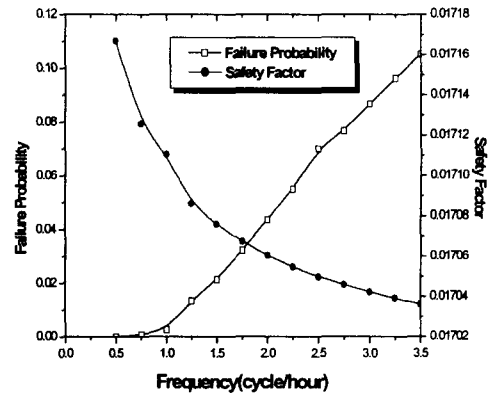


Fig. 8 A relationship between failure probability and safety factor by frequency variation

Fig. 8에서 보는 것과 같이 Frequency가 증가할수록 솔더 조인트의 안전계수는 감소함을 알 수 있다. Frequency가 0.5~1.5cycle/hour인 구간에서부터 안전계수가 크게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9는 Temperature Variation에 따른 파손 확률과 신뢰도 지수의 변화를 보여주고 있다.

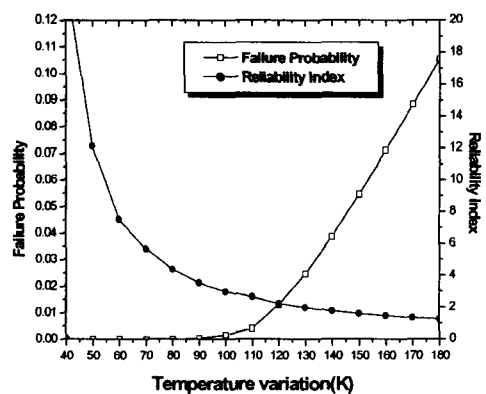


Fig. 9 A relationship between failure probability and reliability index by temperature variation

Fig. 9에서 Temperature Variation이 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률은 증가함을 알

수 있다. Temperature Variation이 100K인 구간에서부터 파손확률이 비교적 크게 증가함과 Temperature Variation이 90K이하가 되면 파손확률은 현저히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10은 Temperature Variation 따른 파손확률과 안전계수의 변화를 보여주고 있다.

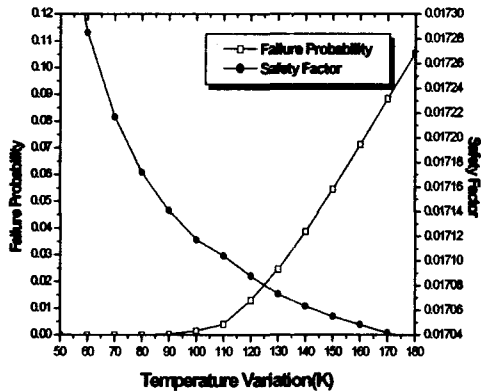


Fig. 10 A relationship between failure probability and safety factor by temperature variation

Fig. 10에서 보는 것과 같이 Temperature Variation이 증가할수록 솔더 조인트의 안전계수는 증가함을 알 수 있다. Temperature Variation이 60~90K인 구간에서부터 안전계수가 비교적 크게 감소함과 Temperature Variation이 120K이상이면 안전계수는 둔감하게 감소함을 알 수 있다.

8. Conclusion

본 연구에서는 가속시험을 통해 규명한 파손 메커니즘을 이용, First-Order Reliability Method에 적용하여 Frequency, Temperature Variation 조건이 63Sn-37Pb 솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가속시험을 통해 63Sn-37Pb 솔더 조인트의 파손 메커니즘이 열충격에 의한 크랙에 기인한 저항의 증가임을 규명하였다.

(2) Frequency가 증가함에 따라 63Sn-37Pb 솔더 조인트의 파손확률이 증가하고 안전계수는 감소함을 규명하였다.

(3) Temperature Variation이 증가함에 따라 63Sn-37Pb 솔더 조인트의 파손확률이 증가하고 안전계수는 감소함을 규명하였다.

후기

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

참고문헌

- [1] 윤상운(1996), 신뢰성분석, 자유아카데미
- [2] 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.
- [3] O. S. Lee, D. H. Kim and E. S. Kim (2003), "The Estimation of Failure Probability Using Boundary Condition of Failure Pressure Model of Buried Pipelines", Proceedings of the KSME 2003 Spring Annual Meeting, pp. 25.
- [4] Achintra Haldar, Sankaran Mahadevan(2000), Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley and Sons, Inc, pp. 195-217
- [5] Ikuo Shohji, Hideo Mori, Yasumitsu Orii(2004), Solder joint reliability evaluation of chip scale package using a modified Coffin-Manson equation, Microelectronics Reliability, No. 44, pp. 269-274.