Ball Grid Array 63Sn-37Pb Solder joint의 건전성 평가

명노훈*(인하대 대학원 기계공학과), 이억섭(인하대 기계공학과)
김동혁(인하대 대학원 기계공학과)

Reliability Estimation of Ball Grid Array 63Sn-37Pb Solder Joint

Ouk Sub Lee(School of Mechanical Eng. INHA Univ.)
No-Hoon Myoung* (Mech. Eng. Dep. INHA Univ.) and Dong-Hyeok Kim(Mech. Eng. Dep. INHA Univ.)

ABSTRACT

Generally, component and FR-4 board are connected by solder joint. Because material properties of components and FR-4 board are different, component and FR-4 board show different coefficients of thermal expansion (CTE) and thus strains in component and board are different when they are heated. That is, the differences in CTE of component and FR-4 board cause the dissimilarity in shear strain and BGA solder joint's failure. The first order Taylor series expansion of the limit state function incorporating with thermal fatigue models is used in order to estimate the failure probability of solder joints under heated condition. A model based on plastic-strain rate such as the Coffin-Manson Fatigue Model is utilized in this study. The effects of random variables such as frequency, maximum temperature, and temperature variations on the failure probability of the BGA solder joint are systematically investigated by using a failure probability model with the first order reliability method(FORM).

Key Words : Coefficients of Thermal Expansion (CTE), BGA (Ball Grid Array), Limit State Function (LSF), Coffin-Manson Fatigue Model , Failure Probability(파손확률), First Order Reliability Method(FORM), Reliability(신뢰성)

1. Introduction

시스템의 신뢰성은 예견된 수명기간동안 정해진 성능을 유지하는 능력으로 정의될 수 있다. 이러한 시스템의 성능은 여러 요인에 의해 영향을 받지만, 재료적 불연속부가 되는 접합 또는 조립부가 신뢰성에 악영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 최근 전자제품의 고집적화에 따라 Solder joint의 평가와 신뢰성에 관한 관심이 증대되고 있다. 과거 30 년 동안의 Solder joint 의 신뢰성과 강도는 확률(probability)과 통계를 이용하여 평가해 왔다. 그러나 전자제품의 발달과 관련하여, 아직 충분한 신뢰성 시험결과나 통계적인 데이터가 축적되지 않아 신뢰성 제고에 어려움이 따르고 있으며, 국내외적으로 Solder joint 에 대한 연구와 신뢰성 평가 방법이 좀 더 세밀하게 검토되고 보완되어야 할 것으로 보인다[1].

본 연구에서는 Ball Grid Array 에 실장되어 있는 63Sn-37Pb Solder joint 의 신뢰성에 영향을 미치는 인자를 실험적으로 확인하기 위하여 Ball Grid Array(BGA)에 열 피로 충격에 의한 가속 시험을 수행하였다. 신뢰도 지수를 이용한 확률론적 방법중의 하나인 FORM(First-Order Reliability Method)와 부품과 FR-4 Board 의 열팽창계수 차이에 의해 발생되는 변형률로 인해 BGA Solder joint 에 유발되는 응력을 이용하여 Frequency, Maximum temperature, Temperature variation 등의 경계조건이 BGA Solder joint 의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 열 싸이클 조건과 Solder joint 의 재료 물성치를 이용하여 열로 인한 재료의 변형률을 알 수 있고 솔더 조인트 피로 모델을 통해 파손확률을 정량적, 가시적으로 도출하였다. Solder joint 피로 모델 중 소성 변형률에 기초를 둔 Coffin-Manson Fatigue Model 을 사용하여 도출된 파손확률을 비교 분석하

였다. 본 연구에서 수행한 실험의 결과를 포함하는 한계상태방정식을 도입하여 파손확률을 산정하고 이에 대응하는 신뢰도 지수를 정량적으로 규명하였다.

2. BGA(Ball Grid Array)

SMD(Surface Mount Device)의 일종으로 QFP(Quad Flat Pack)를 대신하는 Package 형태로서 Bare Chip 에 Bump 를 형성한 것을 PCB 에 Attach 하는 실장 방식이다.

BGA 가 등장한 배경으로서는 반도체 Maker 에서 Trim, Form, Plating 공정을 없애고 Ball Placement 공정 하나로 대체하기 위해서이다.

실장기술의 변천 과정중 Package 의 고밀도, 고성능, 저비용화의 요구가 커짐에 따라 기존 SOP & QFP 로 대표되는 주변 Lead 형 Package 로서는 Fine Pitch 구현에 한계에 도달함에 따라,최근 셀룰러폰을 위시하여 범용적으로 적용되고 있다.

Logic 분야의 I/O 단자가 다핀화, Memory 분야의 Chip Size 가 대형화, 표면 실장부문(SMT)의 소형/경량/저 COST 화에 대응하여 최근 μ-BGA, CSP 로의 기술진보가 되고 있다.

3. 전단 소성변형 이론

대부분의 공업재료는 온도가 균일하게 ΔT 만큼 변화하게 되면 모든 방향으로 팽창하여, 균일한 열변형률을 유발시키게 된다.

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \tag{1}$$

여기서 양의 ΔT 는 기준온도 이상으로 온도가 상승됨을 뜻한다. Fig. 1 과 같이 열팽창계수가 서로 다른 부품과 FR-4 board 가 균일한 온도증분 ΔT 를 받을 경우, FR-4 board 의 열팽창계수 (α_{FR-4})가 부품의 열팽창계수(α_{comp})보다 크고 Board 가 굽혀지지 않으며 온도변화가 Board 에 균일하게 분포된다면 부품과 FR-4 board 의 열변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\varepsilon_{comp} = \alpha_{comp} \Delta T \tag{2}$$

$$\varepsilon_{FR-4} = \alpha_{FR-4} \Delta T \tag{3}$$

또한, 열변형량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{comp} = \varepsilon_{comp} L = \alpha_{comp} \Delta T \cdot L \tag{4}$$

$$\delta_{FR-4} = \varepsilon_{FR-4} L = \alpha_{FR-4} \Delta T \cdot L \tag{5}$$

그러므로, 전단 변형률과 전단응력은 각각 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\delta_{FR-4} - \delta_{comp}}{h} = (\alpha_{FR-4} - \alpha_{comp}) \left(\frac{L}{h} \right) \Delta T \tag{6}$$

$$\tau = G \cdot \gamma \tag{7}$$

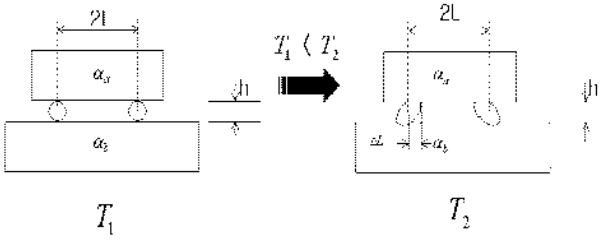

Fig. 1 An illustration of thermo-mechanical deformation in solder joints

4. 파손확률이론

본 연구에서는 문제를 단순화 시키기 위하여 모든 확률 변수들의 분포가 정규분포라고 가정하고, 확률 변수들의 분포가 평균과 표준편차에 의해서 결정되는 것으로 가정하였다.

FORM(first-order reliability method)은 한계상태방정식(limit state function, LSF)의 Taylor 급수 전개식의 1 차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 모든 확률 변수들의 평균과 분산 및 분포형태를 이용하여 파손확률에 대한 상대적 지표인 신뢰도지수(reliability index)를 산정하는 방법이다[3,4].

3.1 파손평가기준

솔더 조인트의 파손확률 해석을 수행하려면 먼저 솔더 조인트의 안전과 파괴를 판단할 수 있는 설계기준 Z 가 솔더에 가해지는 열 피로 싸이클수 (Thermal Fatigue Cycle Number) L 과 그에 저항하는 솔더의 설계기준에 의해 결정되는 설계적인 파손 싸이클수 (Failure Number) R 로 표현할 수 있고, 한계상태방정식(LSF)을 갖는 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = R - L \tag{8}$$

여기서 Z 가 양의 값이면 솔더가 안전한 경우이고, 음의 값이면 솔더의 파손이 발생하는 경우이다.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \tag{9}$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \qquad (10)$$

여기서, μ_z, μ_R, μ_{Lz}는 각각 확률변수 Z, R, L 의 평균이고 $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_L$ 은 각각 확률변수 Z, R, L 의 분산이다.

여기서, 새로이 정의되는 확률변수 U 는 $U = (Z - \mu_Z)/\sigma_Z$ 이고, 식 (11)의 파손확률은 다음과 같이 수정하여 표현할 수 있다.

$$PF = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{U^2}{2}\right\} dU$$
$$= P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \qquad (11)$$

이때 파손확률 PF 와 표준정규분포함수인 Φ 사이에 식(12)이 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수(reliability index)라고 하며 다음과 같이 표현할 수 있다[3,4,5].

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_L^2}} \qquad (12)$$

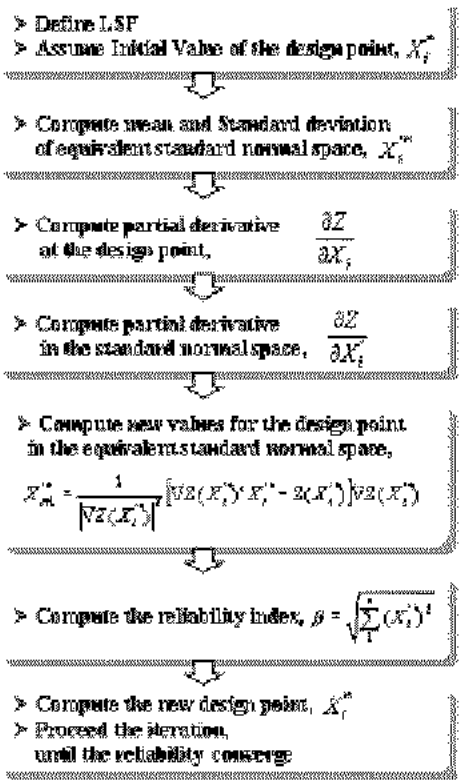

Fig. 2 Processing of computing the reliability index

4. Coffin-Manson Fatigue Model

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

$$Z = N_d - N_f \qquad (13)$$

$$N_f = C \cdot F^m \cdot (\Delta T)^{-n} \exp\left(\frac{Q}{RT_{\max}}\right) \qquad (14)$$

여기서 N_d 는 Designed life, C , m , n 은 Material constant, f 는 Frequency, ΔT 는 Temperature range, Q 는 Activation energy, R 은 Gas constant 이다[5,6].

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 FORM(First-Order Reliability Method)를 이용하여 Frequency, Maximum temperature, temperature variation 등의 경계조건이 BGA 솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 다음과 같은 사실을 체계적으로 규명하였다.

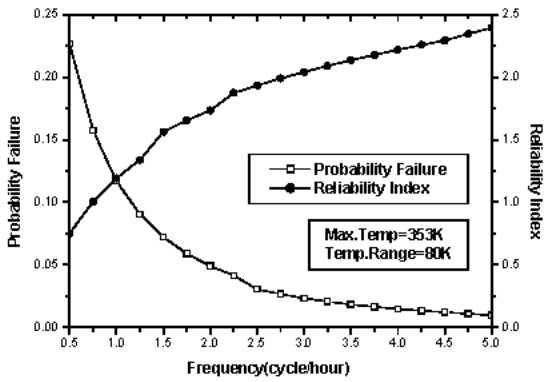

Fig. 3 Relationship between failure probability(PF) and frequency(cycle/hour)

1) Fig. 3 에서 알 수 있듯이 BGA solder joint 가열 사이클의 Frequency 가 증가할수록 BGA solder joint 의 파손확률이 감소한다. Frequency 가 2.5cycle/hour 이상에서는 파손확률이 0.02 이하로 감소하고 Frequency 가 1.5Cycle/hour 이하가 되면 파손확률은 현저히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4 는 온도변화에 따른 파손확률과 신뢰도 지수의 변화를 보여주고 있다.

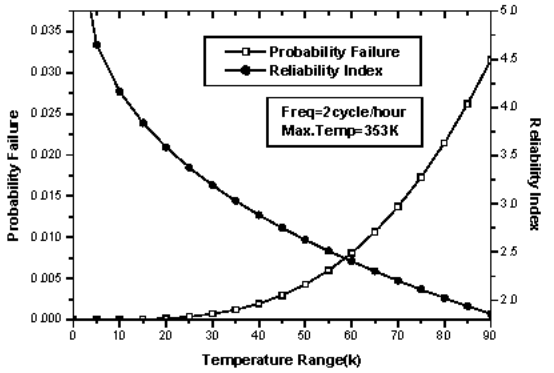

Fig. 4 Relationship between failure probability(PF) and temperature range(K)

2) Fig. 4 을 관찰하면 Temperature range 가 증가할수록 BGA 솔더 조인트의 파손확률은 증가하는 사실이 확인된다. Temperature Range 가 40K 인 구간에서부터 파손확률이 비교적 크게 증가함과 Temperature variation 가 20K 이하가 되면 파손확률은 현저히 감소함을 알 수 있다.

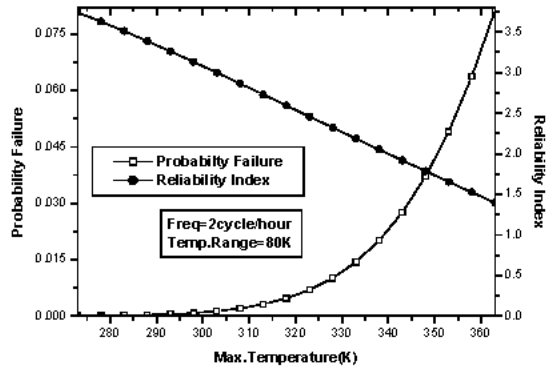

Fig. 5 Relationship between failure probability(PF) and maximum temperature(K)

3) Fig. 4 를 보면 솔더의 높이가 증가할수록 BGA 솔더 조인트의 파손확률은 감소한다는 사실을 알 수 있다. Maximum Temperature 가 313K 인 구간에서부터 파손확률이 비교적 크게 증가함과 Temperature 가 298K 이하가 되면 파손확률은 현저히 감소함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 전단소성변형에 의한 파손 메커니즘을 이용, First-Order Reliability Method 에 적용하여 Frequency, Temperature Variation 조건이 63Sn-37Pb BGA 솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Frequency 가 증가함에 따라 63Sn-37Pb BGA 솔더 조인트의 파손확률과 신뢰도 지수가 각각 감소, 증가함을 규명하였다.

2) Temperature Variation 이 증가함에 따라 63Sn-37Pb BGA 솔더 조인트의 파손확률과 신뢰도 지수가 각각 증가, 감소함을 규명하였다.

3) Maximum temperature 가 증가함에 따라 63Sn-37Pb BGA 솔더 조인트의 파손확률과 신뢰도 지수가 각각 증가, 감소함을 규명하였다.

후 기

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

참고문헌

1. 정재필, 신영의, 임승수, "솔더링 기술의 실무", 삼성실업, pp. 5-14, 1999.
2. R. R. Tummala, "Fundamentals of Microsystems Packaging", McGRAW-HILL, pp. 880-895, 2001.
3. O. S. Lee, J. S. Pyun, "Failure Probability Model of Buried Pipeline," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 116-123, 2001.
4. O. S. Lee, D. H. Kim and E. S. Kim, "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, 2003.
5. W. W. Lee, L. T. Nguyen and G. S Selvaduray, "Solder joint fatigue model: review and applicability to chip scale packages", Microelectronics Reliability, Vol 40, pp. 231-244, 2000.
6. I. Shohji, H. Mori and Y. Orii, Solder joint reliability evaluation of chip scale package using a modified Coffin-Manson equation, Microelectronics Reliability, No. 44, pp. 269-274, 2004