

파손확률 모델을 이용한 솔더 조인트의 건전성 평가

명노훈[†] · 이억섭^{*} · 김동혁^{**}

Reliability Estimation of Solder Joint by Using Failure Probability Model

No-Hoon Myoung[†], Ouk-Sub Lee^{*} and Dong-Hyeok Kim^{**}

Key Words : Failure Probability(파손확률), Coefficient of Thermal Expansion(열팽창 계수), Solder Joint(뿔납 접합부), Reliability(신뢰성), Tresca Failure Criterion(Tresca 파손평가기준)

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 solder joint's failure. The first order Taylor series expansion of the limit state function incorporating with Tresca failure criterion is used in order to estimate the failure probability of solder joints under heated condition. Using shear stresses and shear strains appeared on the solder joint, we estimate the failure probability of solder joints with the Tresca failure criterion. The effects of random variables such as CTE, distance of the solder joint from the neutral point(DNP), temperature variation and height of solder on the failure probability of the solder joint are systematically studied by using the failure probability model with first order reliability method(FORM).

기호설명

ε_T	: 열변형률
α	: 열팽창계수
ΔT	: 온도변화
G	: 전단 탄성 계수
L	: 중립점(neutral point)으로부터 솔더 조인트까지의 거리
H	: 솔더의 높이
δ	: 열변형량
τ	: 전단응력
γ	: 전단변형률
β	: 신뢰도 지수

σ_Y	: 항복응력
μ_Z	: 변수 Z의 평균
σ_Z	: 변수 Z의 표준편차

1. 서론

뿔납(솔더링) 기술은 인류가 약 5,000년 전부터 사용해온 가장 고전적인 접합기술이다. 이러한 고전적인 뿔납(솔더링) 기술은 20세기에 와서 그 접합원리에 대한 연구가 활발해졌으며, 그 응용범위가 점차 확대되어 가고 있다. 현재 뿔납(솔더링)은 전자기기 및 전자부품, 반도체조립 등에 있어서 가장 효과적인 접합수단으로 과거와는 달리 미세화, 정밀화된 마이크로 뿔납(솔더링)기술로 발전하고 있다[1].

전자부품 실장에 이용되는 뿔납 접합부의 열화에 관련되는 열 피로와 이온 마이그레이션(Migration) 현상이 뿔납의 신뢰성에 영향을 미치

[†] 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : profmnh@cricmail.net
TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716

^{*} 인하대학교 기계공학과

^{**} 인하대학교 기계공학과 대학원

는 가장 중요한 인자로 알려져 있고 이러한 인자 이외에도 여러가지 요인들이 복합적으로 작용하여 솔더의 접합부분에 피로파괴를 일으킨다. 특히 서로 기계적인 성질이 다른 부품들 사이에서 열팽창계수의 차이로 인해 땀납 접합부의 온도변화에 대응하는 변형과 응력이 발생되고 결과적으로 땀납 접합부에 열 피로 고장을 유발시키게 된다[2].

본 연구에서는 신뢰도 지수를 이용한 확률론적 방법중의 하나인 FORM(First-Order Reliability Method)와 부품과 FR-4 Board 의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 변형률로 인해 솔더에 유발되는 응력을 이용하여 열팽창계수, 온도변화, 솔더의 높이, 솔더와 솔더사이의 거리 등의 경계조건이 솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다.[3]

2. 전단 소성변형 이론

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

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (1)$$

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[4].

$$\epsilon_{comp} = \alpha_{comp} \Delta T \quad (2)$$

$$\epsilon_{FR-4} = \alpha_{FR-4} \Delta T \quad (3)$$

또한, 열변형량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{comp} = \epsilon_{comp} L = \alpha_{comp} \Delta T \cdot L \quad (4)$$

$$\delta_{FR-4} = \epsilon_{FR-4} L = \alpha_{FR-4} \Delta T \cdot L \quad (5)$$

그러므로, 전단 변형률과 전단응력은 각각 다음과 같다.

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

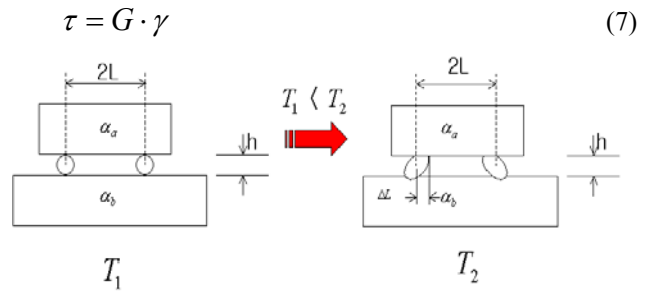


Fig. 1 An illustration of thermo-mechanical deformation in solder joints

3. 파손확률이론

3.1 FORM (first-order reliability method)

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[5,6].

파손확률 해석을 수행할 경우에는 먼저 파손함수에 대한 정의를 내릴 필요가 있다. 이 함수는 파손에 대한 기준으로 표현할 수 있고, 한계상태방정식(LSF)을 갖는 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = R - L \quad (8)$$

여기서, R 은 저항성분의 확률변수이고, L 은 하중성분의 확률변수이다. 두 확률변수 R 과 L 이 각각 서로 독립적인 정규분포 확률변수라면, 한계상태방정식(LSF)에 의한 새로운 확률변수 Z 의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \quad (9)$$

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

여기서, μ_Z, μ_R, μ_L 는 각각 확률변수 Z, R, L 의 평균이고 $\sigma_Z^2, \sigma_R^2, \sigma_L^2$ 은 각각 확률변수 Z, R, L 의 분산이다.

위의 확률변수들이 정규분포이므로 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PF = P[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right\} dZ \quad (11)$$

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

$$PF = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{U^2}{2}\right\} dU = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (12)$$

이때 파손확률 PF 와 표준정규분포함수인 Φ 사이에 식(16)이 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수(reliability index)라고 하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_L^2}} \quad (13)$$

3.2 파손평가기준

본 연구에서는 여러가지 경계조건이 솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 규명하기 위해 아래식과 같은 Tresca 파손평가기준을 사용하였다[7].

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_Y}{2} \quad (14)$$

범함수(functional) Z 를 Tresca 파손평가기준을 이용해 항복응력과 식(7)을 이용해 구한 전단응력의 함수를 이용하여 다음과 같이 놓으면

$$z = \sigma_Y / 2 - \tau \quad (15)$$

파손확률 PF 와 신뢰도 지수 β 는 각각 식 (12)과 식(13)을 사용하여 결정할 수 있다.

범함수 Z 의 평균 (μ_z)과 표준편차(σ_z)는 아래와 같다.

$$\mu_z = z(h^*, L^*, \dots, \alpha^*) + (\bar{h} - h^*) \frac{\partial z}{\partial h} + (\bar{L} - L^*) \frac{\partial z}{\partial L} + \dots + (\bar{\alpha} - \alpha^*) \frac{\partial z}{\partial \alpha} \quad (16)$$

$$\sigma_z^2 = (\sigma_h \frac{\partial z}{\partial h})^2 + (\sigma_L \frac{\partial z}{\partial L})^2 + \dots + (\sigma_\alpha \frac{\partial z}{\partial \alpha})^2 \quad (21)$$

여기서, $\bar{h}, \bar{L}, \dots, \bar{\alpha}$ 와 $h^*, L^*, \dots, \alpha^*$ 은 각각의 평균값과 검사점의 값이고 $\sigma_h, \sigma_L, \dots, \sigma_\alpha$ 는 각각의 표준편차이다.

여기서 유의할 사항은 비록 표준편차가 평균과 동일한 차원으로 표현되지만 평균이 없으면 변수의 분포를 정확하게 표현하지 못한다는 사실이다. 따라서 평균과 표준편차의 비로 표현되는 무차원수인 편차계수(coefficient of variation, C.O.V)를 이용하여 나타낼 수 있고, 편차계수는 다음과 같이 표현된다.

$$C.O.V = \frac{\sigma_Z}{\mu_Z} \quad (22)$$

4. Case Study

본 연구에서는 열팽창계수, 온도변화, 솔더의 높이, 솔더와 솔더사이의 거리 등의 경계조건이 솔더 조인트의 파손확률에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 Table 1 에 나타난 변수와 각각의 변수값을 사용하였다[8,9,10].

Table 1 Random variables and their parameter used in the example.

Variable	Mean	C.O.V
σ_Y	52.5GPa	0.015
α_{comp}	17.5ppm/°C	0.025
α_{FR-4}	185ppm/°C	0.025
ΔT	100°C	-
G	11.43GPa	0.02
h	0.5669mm	0.03
L	16.259mm	0.02

5. 결과 및 고찰

Table 1의 변수값을 사용하여 부품과 FR-4 board의 열팽창계수 차이에 따른 솔더 조인트의 파손확률 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 부품과 FR-4 board의 열팽창계수 차이가 0.1~0.2ppm/°C 사이인 경우, 솔더 조인트의 파손확률은 0.02~0.2 정도로 비교적 작은 것을 알 수 있다. 하지만 부품과 FR-4 board의 열팽창계수 차이가 0.2ppm/°C 이상이 되면 파손확률이 급격히 증가함을 알 수 있다.

온도변화(ΔT)가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률이 증가하며 열팽창계수 차이가 0.8ppm/°C 이상인 구간에서는 파손확률이 0.9 이상이므로 파손 확률론적 이론을 이용하여 솔더 조인트를 설계할 경우 부품과 FR-4 board의 열팽창계수 차이를 0.8ppm/°C 이하로 설계하는 것이 적절하다. 또한 부품과 FR-4 board의 열팽창계수 차이가 0.1ppm/°C 이하인 구간에서는 부품과 FR-4 board가 거의 같은 소성변형률을 보이기 때문에 파손이 일어날 확률이 아주 희박하게 된다.

열팽창계수가 0.5ppm/°C 차이가 나는 구간에서는 온도변화가 $\Delta T = 100/^\circ\text{C}$ 에서 $\Delta T = 140/^\circ\text{C}$ 로 증가할 경우 솔더 조인트의 파손확률이 약 0.3 정도로 가장 크게 증가하고 온도변화가 클수록 파손확률이 현저하게 커짐을 알 수 있다.

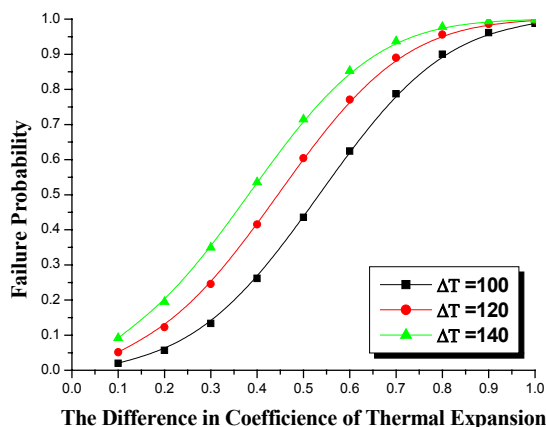


Fig. 2 A relationship between failure probability(PF) and the difference in coefficient of thermal expansion (CTE)

Fig. 3은 중립점에서 솔더 조인트까지의 거리에 따른 파손확률 변화를 나타내고 있다. 중립점에서

솔더 조인트까지의 거리가 8mm까지는 파손확률이 서서히 증가하지만 8mm 이상에서는 솔더 조인트의 파손확률이 급격히 증가함을 알 수 있다.

또한 Fig. 3 온도변화가 $\Delta T = 100/^\circ\text{C}$ 에서 $\Delta T = 140/^\circ\text{C}$ 로 증가할 경우 중립점에서 솔더 조인트까지의 거리가 14mm일 때 파손확률이 약 0.31 정도로 가장 큰 차이가 남을 알 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 중립점으로부터 솔더 조인트까지의 거리가 멀어진다면 파손확률이 증가하기 때문에 일정거리이상으로 기판에 솔더를 패키징하는 것은 상당히 큰 파손확률을 야기시킬 수 있으므로 기판을 설계할 때 솔더간의 거리를 적절히 고려해야만 한다. FR-4 board의 크기가 크면 솔더 패키징의 설계가 용이하지만 Fig. 3에서와 같이 파손확률이 증가하므로 솔더 패키징 설계시 일정 크기의 기판과 적절한 중립점에서 솔더 조인트까지의 거리를 선택하여야 한다.

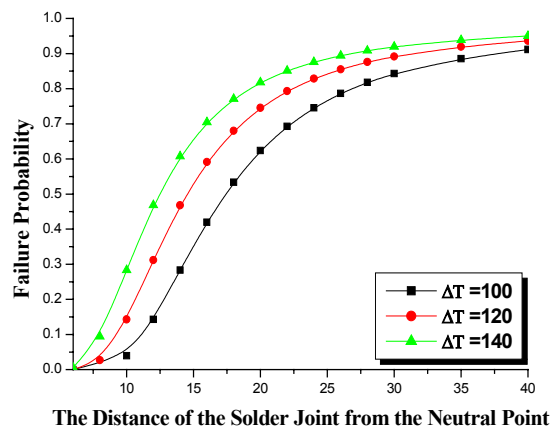


Fig. 3 A relationship between failure probability(PF) and the distance of the solder joint from the neutral point

Fig. 4는 솔더 조인트의 높이에 따른 파손확률의 변화를 보여주고 있다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 솔더의 높이가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률은 감소함을 알 수 있다. 솔더의 높이가 0.1~0.3mm인 구간에서는 파손확률이 0.99~0.85 정도로 매우 크게 나타나지만 솔더의 높이가 0.3mm 이상이 되면 파손확률은 현저히 감소함을 알 수 있다.

솔더의 높이가 0.7mm인 구간에서 온도변화가 $\Delta T = 100/^\circ\text{C}$ 에서 $\Delta T = 140/^\circ\text{C}$ 로 증가할 경우 솔더 조인트의 파손확률 차이가 0.4 정도로 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 솔더의 높이가 0.1mm이

하 구간에서는 부품과 FR-4 board 가 매우 근접하게 되므로 본래의 솔더 조인트로서의 기능을 발휘하지 못하게 될 수 있다. 그리고 솔더의 높이가 높아질수록 솔더의 부피가 커져 부품과 FR-4 board 사이의 열팽창 계수 차이에 의한 변형률이 커져도 솔더 조인트가 견딜수 있으므로 솔더 조인트의 파손확률은 감소하게 된다. 하지만 솔더 조인트가 구형이기 때문에 솔더의 높이가 무한히 높아지면 솔더간의 거리가 가까워져 결국은 인접 솔더 조인트와 붙어 버리는 경우가 발생할 수 있고 결과적으로 생산비가 증가하게 되므로 적절한 솔더의 높이를 선정할 필요가 있다.

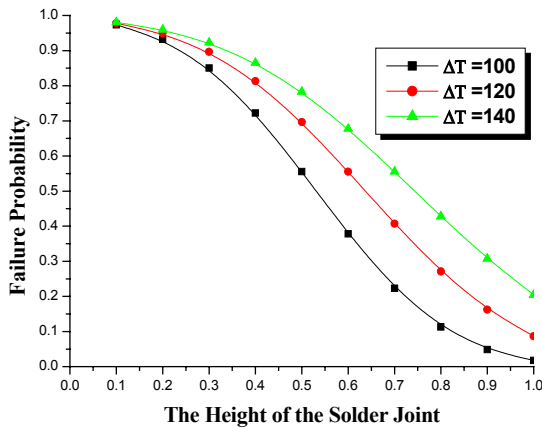


Fig. 4 A relationship between failure probability(PF) and the height of solder joint

6. 결론

본 연구에서는 First-Order Reliability Method 와 Tresca 파손평가기준을 이용하여 열팽창계수, 온도 변화, 솔더의 높이, 솔더와 솔더사이의 거리 등의 경계조건이 솔더 조인트의 파손확률에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 온도변화(ΔT)가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률이 증가한다.
- 2) 부품과 FR-4 board 의 열팽창계수 차이가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률이 증가한다. 부품과 FR-4 board 의 열팽창계수 차이가 $0.2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 이하에서는 솔더 조인트의 파손확률이 서서히 증가하지만 $0.2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 이상이

되면 파손확률이 급격히 증가한다.

- 3) 중립점에서 솔더 조인트까지의 거리가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률은 증가한다. 중립점에서 솔더 조인트까지의 거리가 8mm 까지는 파손확률이 서서히 증가하지만 8mm 이상에서는 솔더 조인트의 파손확률이 급격히 증가한다.
- 4) 솔더의 높이가 증가할수록 솔더 조인트의 파손확률은 감소한다. 솔더의 높이가 0.1~0.3mm 인 구간에서는 솔더 조인트의 파손확률이 매우 크게 나타나지만 솔더의 높이가 0.3mm 이상이 되면 솔더 조인트의 파손확률은 현저히 감소한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성 분석연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

참고문헌

- (1) 정재필, 신영의, 임승수, 2001, “무연 마이크로 솔더링”, 삼성실업, pp. 6-8
- (2) 정재필, 신영의, 임승수, 1999, “솔더링 기술의 실무”, 삼성실업, pp. 5-14
- (3) 이강용, 이택성, 1996, “리플로 납땜 공정에서 플라스틱 IC 패키지의 습기 및 열로 인한 파손 문제 해석”, 대한기계학회논문집 A, Vol. 20, No. 4, pp. 1347-1355
- (4) Rao R. Tummala, 2001, “Fundamentals of Microsystems Packaging”, McGRAW-HILL., pp. 880-895
- (5) O. S. Lee, 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.
- (6) 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.
- (7) William T. Becker and Roch J. Shipley, 2002, “ASM Handbook”, ASM International, pp. 460-483.
- (8) John W. Evans, Jillian Y. Evans, Rexa Ghaffarian, Andrew Mawer, Kyoung-Taeg Lee and Chang-Ho Shin, 2000, “Simulation of Fatigue Distributions for Ball Grid Arrays by the Monte Carlo Method”, Microelectronics Reliability, Vol. 40, pp. 1147-1155.

- (9) Yu Gu and Toshio Nakamura, 2004, "Interfacial Delamination and Fatigue Life Estimation of 3D Solder Bumps in Flip-Chip Packages", *Microelectronics Reliability*, Vol. 44, pp. 471-483.
- (10) Young-Eui Shin, Jun-Hwan Lee, Young-Wook Kon, Chong-Won Lee, Jun-Ho Yun, Seug-Boo Jung, 2002, "A Study on μ BGA Solder Joints Reliability Using Lead-free Solder Materials", *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 7, pp 919-926