

표면실장기술에서 J 리드의 납 접합부 모델링

Solder Joint Geometry Modeling of the J Lead in SMT

최동필, 유중돈*, 이태수**

*한국과학기술원, 서울

**서강대학교, 서울

1. 서론

표면실장기술(SMT : Surface Mount Technology)는 기존의 홀 방식에 비해 무게를 감소시키고, 실장 밀도를 증대시키며 효과적인 생산 라인 자동화의 기술을 제공하기 때문에 활발한 연구가 이루어지고 있는 첨단 기술의 한 분야이다. 지금까지 SMT에 관한 많은 연구가 있어 왔지만 대부분은 열적, 기계적 하중하의 피로 현상에 대한 예측이나 구조 해석에 치중되었다. 그러나, 이러한 연구 결과는 납 접합부 형상을 알고 있다는 가정을 전제로 한 것이다. 그러므로 접합부 형상의 실제적이고 정확한 예측은 그 구조의 건전성 평가에서 중요한 부분을 차지한다.

다양한 솔더링 조건에 따른 필렛 형태에 해당하는 2차원 문제는 다년간 많은 연구가 있어 왔다[1-2]. Nigro등은 미지의 접합부 표면을 표현하기 위해 유한요소법을 바탕으로 하는 일반적인 수치적 방법을 제안했으나, 이들의 수식화는 2차원에 국한되었다[3]. Lee등은 형상 예측과 관련된 다른 접근 방식의 연구로 리드 형태를 수직면으로 가정하여 Fig. 1의 각형 모델(a)에 대하여 납 형상을 모델링하였고, 이를 연장하여 Gullwing 리드(b)에 대해서는 일정하게 기울어진 경사면으로 가정하여 납 접합부 형상을 모델링하였다[4-5].

한편 Fig. 1의 J 리드(c)는 다른 리드와 비교하여 점유 면적이 좁고, 주된 납 접합부 부위가 외부로 드러나므로, 시각 검사(Visual Inspection)가 용이한 장점 등으로 인해 주로 소형화된 고가 칩에 사용된다. 따라서 J 리드의 경우, 다른 리드 부품과 비교하여 납 접합부 형상의 안정성 및 건전성이 강조되고, 이러한 요인으로 J 리드의 납 접합부 형상 모델링은 필수적이다.

본 연구는 기존의 각형 및 Gullwing 리드의 납 접합부 형상 예측에 적용한 방법론을 확장하여, J 리드를 가지는 전자 부품의 표면실장 공정에서 납 접합부 형상을 지배하는 수학적 모델을 정립하고, 유한요소법을 적용하여 납 접합부의 형상을 예측하는 수치 해석 모델링을 수행하고자 한다.

2. 본론

2.1 납 접합부의 수식화

J 리드의 납 접합부 형상을 예측하기 위해서는 먼저 J 리드와 패드 사이에서 용융된 납의 평형 상태를 기술하는 지배방정식이 수학적으로 표현 되어야 한다. 이 수식들은 유체 압력, 대기압, 중력, 표면 장력, 납과 접하는 다른 면과 이루는 접촉각(angle of contact) 및 공정에 소요되는 납의 부피 등 공정 변수로 표현되어진다. 이러한 지배 방정식 중에서 소위 Euler식은 용융납과 공기 사이의 경계면을 기술한다. 이 식은 곡면 위에서 정의되는 2개의 주곡률반경으로 나타내어진다. 임의의 곡면을 따라서 2차 미분 형식으로 정의되는 것을 고려하면 전체 수식은 비선형 자유 경계면 문제가 된다. 즉, 납 접합부의 모양 자체가 미지의 것으로 구해져야 하며, 구하는 과정이 매우 어렵고 복잡하게 된다. 더욱이 납 접합부의 기하학적 형상은 이와 같은 수식과 함께 전체 부피 및 접촉각에 대한 구속 조건을 만족하는 모양을 가져야 된다. 실제로 아주 간단한 경우(예를 들어 축대칭이거나 2차원 문제)가 아니면 이론적인 해석이 불가능하여 주로 수치 해석적인 접근 방식에 의존해야 한다.

J 리드는 기존의 각형이나 Gullwing 리드와는 달리 일정한 반경을 갖는 원주 형태를 띄고 있다. 이러한 리드 형상은 수직면 혹은 경사면으로 가정한 모델링에 비해 복잡한 좌표 변환이 요구된다. 즉, x, y, z 좌표를 r, θ 좌표계로 변환하여 원주에 적합한 형상이 되도록 한다(Fig. 2). 일반적 보편성을 잃지 않으면서 수식화의 단순화를 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- (1) J 리드의 반경은 일정하다.
- (2) 공급되는 납의 물성치는 전 영역에 걸쳐 일정하다.

이러한 가정 아래, 중력 에너지와 표면 장력 에너지를 고려한 전체 에너지식과 체적 제한식을 최소화 하면 최적의 납 접합부 형상을 얻을 수 있다. 이때, 중력항과 표면 장력항으로 표현되는 지배방정식은 다음과 같다.

$$E = \int_s \gamma dA + \int_v \rho g z dV \quad (1)$$

$$V_o = \int dV \quad (2)$$

여기서 V_o 는 주어진 납 체적이다.

2.2 에너지 범함수 도출

r, θ 로 정의된 지배 영역을 평면 문제의 유한요소 응용에 적합한 2차원 범함수로 유도한다. 납과 대기 그리고 칩의 삼중점에서 접촉각과 납과 패드 사이의 접촉면은 미리 설정하고, 이를 불변이라 가정한다. 체적 조건식(2)을 고려하기 위해 Lagrange Multiplier(λ)를 도입한다. 식(1)에서의 표면자유에너지 적분 형태를 접촉면과 관련있는 모든 요소가 포함되게끔 다시 정리하면 다음과 같은 범함수를 얻는다.

$$F = \rho g \int_o (R\theta - r \sin \theta) r dr dy + \gamma \int \sqrt{1 + (r\theta_r)^2 + (r\theta_y)^2} dr dy + \gamma \int R \theta \cos \theta_c ds + \lambda (V_o - \int dV) \quad (3)$$

이때, θ_r, θ_y 의 첨자 r, y 는 편미분자(partial differential)를 나타낸다. 경계면에 대한 필요경계조건은 다음과 같다.

$$\theta_i = \cos^{-1}(R/r_i) \quad (4)$$

R 는 리드의 납과 접하는 바깥쪽 반경이며, r_i 는 경계면까지의 반경이다.

2.3 유한 요소법 적용

일단 2차원 적분형태로 에너지 범함수가 기술되면 유한요소 수식화 과정은 다음을 따른다. 먼저 2차원 지배 영역을 m 개의 C^0 요소로 분할한다. 요소 내의 회전 함수 θ 는 형상 함수 N 과 회전각 θ 로 보간할 수 있다. 범함수의 최적조건에 해당하는 대수 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \quad (5)$$

이를 벡터식으로 표현하면,

$$K_{ij}\theta_j + \Psi_i + \lambda E_i = 0 \quad (6a)$$

$$E_i\theta_i + V_o = 0 \quad (6b)$$

이다. 이때 식(5)의 행렬 K_{ij}, E_i, Ψ_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_{ij} = \gamma \int \frac{r^2}{\sqrt{1 + (r\theta_r)^2 + (r\theta_y)^2}} \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dr dy$$

$$E_i = - \int r N_i dr dy$$

$$\Psi_i = - \int \gamma R N_i \cos \theta_c ds + \rho g \int [r R N_i - r^2 N_i \cos(\theta_i^0 N_i)] dr dy$$

계수행렬 K_{ij} 는 비선형이므로 식(6a)과(6b)를 미지수 θ 와 λ 항으로 반복적 계산하여 해를 얻어야 한다.

2.4 시뮬레이션 결과

증력에너지와 표면장력에너지를 고려한 수식화 결과를 여러 가지 기하학적 조건과 실제 부품의 리드 사양으로 시뮬레이션하였다. 이때 계산되어지는 납의 물성치는 $\rho=8.9\text{g/cm}^3$, $\gamma=490\text{erg/cm}^2$ 이며 일정하게 유지된다고 가정하였다.

먼저 기하학적 조건이 다른 경우에 대하여 형상을 예측하였다. 반경 0.1cm의 J 리드에 접하는 경우로 가정하였고, 패드 길이는 각각 0.1, 0.13, 0.17cm, 단면적은 0.0011, 0.0029, 0.0037 cm^2 로 하였다. Fig. 3에서 나타나듯이 접촉각을 만족시키면서 주어진 단면적에 대해 표면장력을 최소화하기 위해 최소 접선을 이루면서 형상을 이루었다. 특히, 패드 길이와 체적이 작은 경우 구해지는 오목한 형상은 물리적 현상과 비교하면 유사성을 갖는다.

또, 본 모델링의 적용 대상인 J 리드를 갖는 부품 40-SOJ-400의 리드 수치를 기초로 하여 납 형상을 예측하였다. 리드의 반경은 0.049cm, 두께는 0.02cm이며, 폭은 0.043cm이다[6]. 패드 길이는 리드의 지름으로 하였다. 입력에 사용된 납량은 $4.9 \times 10^{-5}\text{cm}^3$ 이며, 이는 메탈 마스크의 두께를 150 μm 로 가정하여 패드 면적과의 곱에서 얻은 값이다. 공급되는 페이스트에서 납이 차지하는 비율은 55%로 하였다. Fig. 4는 주어진 납량과 J 리드의 기하학적 조건을 만족하는 접합부 형상을 나타낸다.

3. 결론

본 연구는 납 접합부 형상을 예측할 수 있게끔 표면 실장시 생기는 에너지 함수를 수식화하고, 리드의 곡면을 따르는 자유도를 부여하여 납과 리드 사이의 간섭을 배제하여 정확성을 높였다. 수치 해석 방법으로 유한요소법을 이용하여 J 리드의 납 접합부 형상을 계산하였다. 패드의 크기, 납 체적 등의 정보로 접합부의 회전각으로 표면 형상을 예측할 수 있었다. 여러 기하학적 조건 변화에 따른 수치 결과를 비교하였고, 실제 부품의 사양으로 납 접합부 형상을 얻었다.

이러한 J 리드의 형상 예측 결과는 J 리드 접합부의 피로 및 구조 해석의 기초 자료로 응용될 수 있으며, 패드 설계시 불량 방지를 위한 지침을 제시할 수 있다. 또한 J 리드와 유사한 원주 형태의 실장 부품에 대한 납 접합부 형상도 예측할 수 있다.

4. 참고문헌

- (1) Heinrich, S.M., Elkouh, A.F., Nigro, N.J., and Lee, P.S. : "Solder Joint Formation in Surface Mount Technology - Part I : Analysis," Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.112, 1990, pp.210-218.
- (2) Heinrich, S.M., Elkouh, A.F., Nigro, N.J., and Lee, P.S. : "Solder Joint Formation in Surface Mount Technology - Part II : Design," Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.112, 1990, pp.219-222.
- (3) Nigro, N.J., Heinrich, S.M., Elkouh, A.F., Zou, X., Fournelle, R., and Lee, P.S. : "Finite Element Method for Predicting Equilibrium Shapes of Solder Joints," Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.115, 1993, pp.141-146.
- (4) Lee, T.S., Choi, T.P., and Yoo, C.D. : "Finite Element Modeling of 3-Dimensional Solder Joint Geometry in SMT", EEP-Vol.10-2, Advances in Electronic Packaging, ASME, 1995, pp.1031-1041
- (5) Lee, T.S., Yoo, C.D., Choi, T.P., and Koh, B.C. : "Development of CAD Tools for Pad and Metal Mask Design in SMT", Pan Pacific Microelectronics Symposium, SMTA, 1997, pp.55-61
- (6) Private Communication, 1996

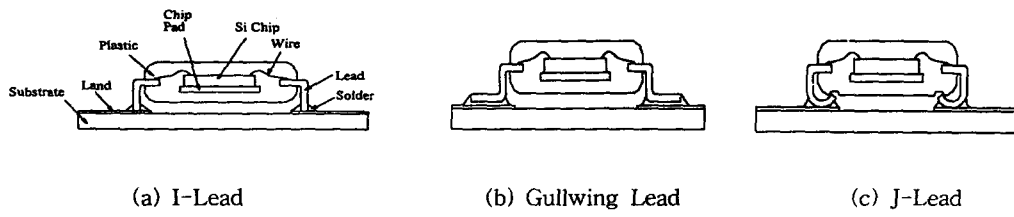


Fig. 1 SMT Lead Configuration

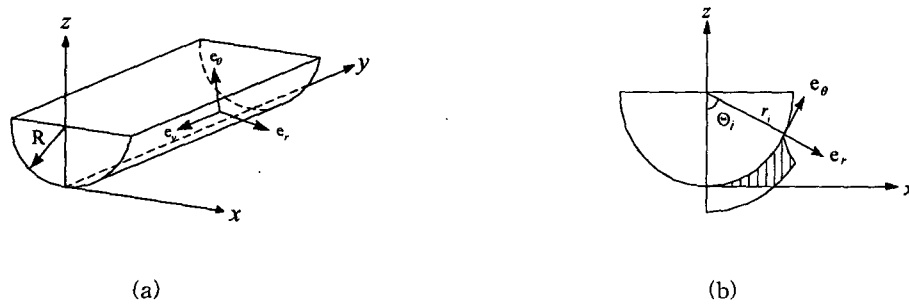


Fig. 2 Coordinates of J Lead Modeling

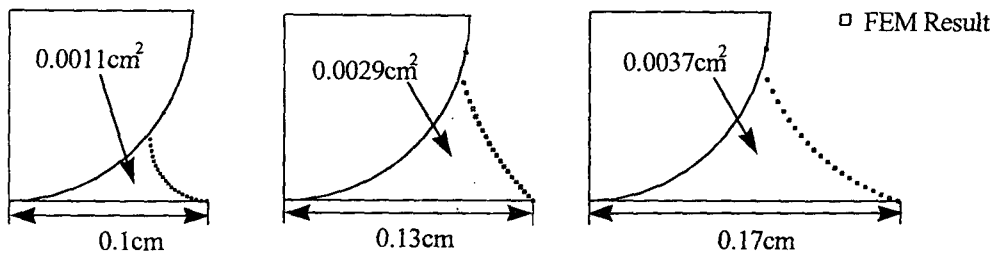


Fig. 3 Results of Various Geometric Condition

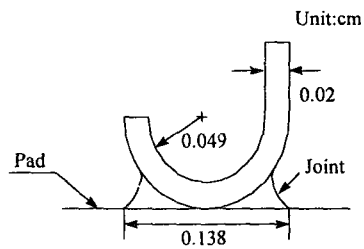


Fig. 4 Solder Joint of 40-SOJ-400