

## 플립칩 솔더링의 자기정렬 효과에 관한 모델링

정용진\* · 안도현\* · 유증돈\* · 김용석\*\*

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*홍익대학교 재료공학과

### Modeling of Self-Aligning Effect in Flip Chip Soldering

Yong J. Jung\*, Dohyun Ahn\*, Choong D. Yoo\* and Yong S. Kim\*\*

\*Dept. of Mech. Eng., KAIST, Daejeon 305-701, Korea

\*\*Dept. of Metallurgical Eng., Hongik Univ., Seoul 121-791, Korea

#### Abstract

The self-aligning effect is useful in the electronic packaging because it compensates the positional errors occurred in flip chip placement. The solder shapes are predicted in this work either by minimizing the energy of the solder profile using the second-order polynomials or by the Surface Evolver program. The restoring forces and spring constants in vertical and horizontal directions are calculated to estimate the self-aligning effect. The calculated results using the second-order polynomial are similar to those using the Surface Evolver in the vertical direction. However, significant discrepancy between the results using the polynomial and Surface Evolver occurs in the horizontal direction. The assumption of the circular cross-section of the solder joint appears to cause the discrepancy. As the horizontal restoring force and spring constant are smaller than those in the vertical direction, larger aligning error can be resulted in the horizontal direction.

(Received June 21, 2002)

Key Words : Self-alignment, Flip chip soldering, Surface energy, Restoring force, Second-order polynomial, Surface evolver

#### 1. 서 론

용융 상태의 솔더볼(solder ball)은 표면 에너지와 위치 에너지를 최소화시키는 형상으로 변화하기 때문에 자기정렬 효과(self-aligning effect)가 발생한다. 자기정렬 효과는 플립칩(flip chip)과 같은 Ball Grid Array 패키징(BGA packaging)에서 칩(chip)의 장착 시 발생하는 위치 오차를 보정하여 칩을 기판 패드(pad)의 중심에 정렬시키는데 이용된다. 칩이 패드 직경의 1/2 이내의 오차로 장착되면 자기정렬 효과에 의해 정렬이 가능하기 때문에 정밀한 위치 보정이 요구되는 광부품이나 직경 300 $\mu$ m 이하의 미세한 솔더볼(solder ball)을 사용하는 플립칩(flip chip) 등의 패키징에 매우 유용하다. 본 연구에서는 플립칩 솔더링

공정에서 발생하는 자기정렬 효과를 2차 함수를 이용한 모델링을 통하여 해석하고, Surface Evolver와 기존의 모델을 이용하여 계산한 결과와 비교하였다.

자기정렬 효과를 해석하기 위한 다양한 연구가 수행되었으며, Patra<sup>1-4)</sup> 등은 솔더볼의 단면이 원형이고 중심선의 궤적이 직선이라는 가정을 이용하여 원형 패드에 형성된 솔더볼의 표면 에너지를 적분식으로 유도하였다. 수직과 수평 방향의 변위에 따른 복원력(restoring force)은 에너지를 미분하여 계산하였다<sup>1)</sup>. Veen<sup>5)</sup>은 수직과 수평방향의 변위에 대하여 솔더 형상을 각각 타원체와 기울어진 실린더 형상으로 가정하여 표면 에너지를 유도하였으며, 스프링 상수와 고유 진동수 등을 계산하였다. Zhu<sup>6)</sup> 등은 표면 에너지를 패드와 솔더의 젖음각으로 모델링하고 Surface Evolver를 이용하여 해석 하였으며, 계산 결과로부터 솔더의 부피와 높이,

패드 반경을 이용한 회귀(regression) 모델을 제시하였다. Subbarayan<sup>7,8)</sup> 등은 Patra<sup>1)</sup>의 가정을 이용하여 표면 에너지를 구하는 식을 유도하고, 중심선의 패적과 반경을 계산하였다. Chiang<sup>9)</sup> 등은 솔더 형상을 기하학적인 방법과 힘평형 모델을 이용하여 예측하고 실험을 통하여 검증하였다. Lin<sup>10)</sup> 등은 솔더볼의 자기정렬효과에 따른 복원력을 패드 반경, 솔더 부피와 및 변위의 함수로 표현하고, 무차원 공정변수가 자기정렬에 미치는 효과를 분석하였다.

Hideki<sup>11)</sup> 등은 마이크로 BGA에서 솔더볼 개수의 증가에 따라 정렬오차가 급격히 감소하는 현상을 측정하였으며, Hung<sup>12)</sup> 등은 유체의 흐름, 점성(viscosity), 플럭스(flux) 등이 정렬오차에 미치는 영향에 대해 실험하였다. Bingzhi<sup>13)</sup> 등은 대류식 리플로우 공정(convection-dominant reflow process에서 항력(drag force)에 의해 발생하는 정렬오차를 계산하고 실험을 통하여 검증하였다.

본 연구에서는 수직과 수평 방향의 변위에 의한 풀립 칩의 솔더 형상을 2차 함수를 이용하여 모델링하고 복원력 및 스프링 상수를 계산하였다. 솔더 형상을 2차 함수로 모델링하면 계산이 간편하고 칩과 기판의 패드 크기가 상이한 경우나 수평방향의 변위가 발생하는 경우에도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 2차 함수를 이용한 모델링으로 계산된 표면 에너지와 복원력 및 스프링상수를 Surface Evolver를 통한 계산 결과와 비교하여 오차 발생의 원인을 분석하였다.

### 2. 자기정렬 효과의 모델링

용융 상태의 솔더에 작용하는 에너지는 표면장력에 의한 표면 에너지와 중력에 의한 위치 에너지로 구성된다. 표면 에너지는 표면장력과 솔더 표면적의 함수이며, 위치 에너지는 솔더와 칩의 무게와 높이의 함수로 나타낼 수 있다. 솔더의 부피가 일정한 조건에서 ( $V_0 = \int dV$ ), 솔더는 표면 에너지와 중력에 의한 위치 에너지를 최소화시키는 형상으로 변화한다.

$$\min E = \min (E_s + E_g) \tag{1}$$

$$E_s = \int_S \gamma dS \tag{2}$$

$$E_g = \int_{V_0} \rho g z dV + m_c g H \tag{3}$$

이때, E는 솔더의 전체 에너지, E<sub>s</sub>와 E<sub>g</sub>는 표면 에너지와 위치 에너지, γ는 표면장력 계수, ρ는 솔더의 밀도, V<sub>0</sub>는 솔더의 부피, m<sub>c</sub>와 H는 칩의 질량과 높이

를 나타낸다.

솔더의 표면 에너지를 계산하기 위하여 다음과 같이 가정하였다<sup>1)</sup>: (1) 표면 장력 계수는 일정하고, (2) 칩과 기판의 패드 형상은 원(circle)이며, (3) 솔더 변형시 x-y 평면의 솔더 단면은 원을 유지한다. 용융 솔더의 표면장력이 일정하면 표면 에너지는 솔더의 표면적에 비례하기 때문에 솔더 표면적을 계산하기 위한 다양한 모델이 제안되었다.

본 연구에서는 솔더 형상을 2차 함수로 모델링하는 방법과 Surface Evolver를 사용하는 방법으로 솔더 표면적을 계산하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 칩과 기판의 원형 패드 사이에 형성되는 솔더 좌우 형상을 2차 함수 x<sub>L</sub>과 x<sub>R</sub>로 모델링 하였다.

$$\begin{aligned} x_L &= c_{L2}z^2 + c_{L1}z + c_{L0} \\ x_R &= c_{R2}z^2 + c_{R1}z + c_{R0} \end{aligned} \tag{4}$$

이때, 첨자 L과 R은 좌측과 우측을 나타낸다. 식(4)의 6개 미지수는 칩과 기판의 패드가 솔더와 만나는 위치로부터 얻어지는 4개의 조건과 솔더 부피가 일정하다는 조건 및 에너지를 최소화시키는 식(1)을 이용하여 결정한다.

솔더의 전체 표면적을 계산하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 솔더를 다수의 요소로 나누고 각 요소의 단면을 원으로 가정하면, 전체 표면적 S는 각 요소의 옆 면적의 합으로 나타낼 수 있다<sup>1)</sup>.

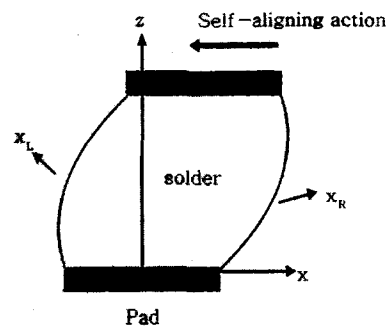


Fig. 1 Solder profile represented using second-order polynomial

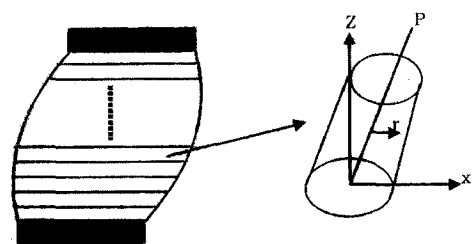


Fig. 2 Solder element to calculate surface area

$$S = \sum_{i=1}^n \int_0^{2\pi} \int_{-h/2}^{h/2} r_i(z) \left[ 1 + \left( \frac{\partial r_i}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial p_i}{\partial z} \right)^2 - 2 \left( \frac{\partial r_i}{\partial z} \right) \left( \frac{\partial p_i}{\partial z} \right) \cos \theta \right]^{1/2} dz d\theta \quad (5)$$

이때, n은 요소의 개수, h와 r<sub>i</sub>는 요소의 높이와 반경, p<sub>i</sub>는 솔더 요소의 단면 중심의 직선 패적을 나타낸다.

자기정렬 효과를 예측하기 위하여 수직과 수평 방향의 변위에 대한 솔더의 복원력과 스프링 상수를 다음과 같이 표면 에너지의 1차와 2차 미분 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_v = \frac{\partial E_s}{\partial z}, \quad F_h = \frac{\partial E_s}{\partial x} \quad (6)$$

$$k_v = \frac{\partial F_v}{\partial z} = \frac{\partial^2 E_s}{\partial z^2}, \quad k_h = \frac{\partial F_h}{\partial x} = \frac{\partial^2 E_s}{\partial x^2} \quad (7)$$

이때, 첨자 v와 h는 수직(vertical)과 수평(horizontal) 방향을 나타낸다.

Surface Evolver는 에너지를 최소화시키는 액체 형상을 계산하는 일반적인 FEM 프로그램이며<sup>14)</sup>, 본 연구에서는 public domain의 프로그램을 사용하였다. Surface Evolver에서 솔더의 표면에너지, 솔더와 칩의 위치 에너지는 다음과 같이 면적분 형태로 나타낸다.

$$E = \int_s \gamma dS + \int_s \rho g \frac{z^2}{2} \bar{k} \cdot d\bar{A} + m_c g H \quad (8)$$

이때,  $\bar{k}$ 는 중력과 반대 방향의 단위 벡터이다. 식 (8)의 두번째 항은 솔더의 위치 에너지  $\int \rho g z dV$ 를 면적분으로 변환한 형태이며, Surface Evolver에서 부피 적분을 지원하지 않기 때문에 면적분을 사용한다<sup>15)</sup>. 복원력과 스프링 상수는 2차 함수의 경우와 동일하게 식 (6)과 (7)을 이용하여 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수직방향의 변위에 대한 해석 결과

솔더에 수직방향의 변위가 가해지는 경우에 대한 솔더 형상, 표면 에너지, 복원력 및 스프링 상수를 계산하였으며, 계산에 사용된 63Sn-37Pb 솔더(eutectic solder)의 물성치와 상수는 다음과 같다. 솔더 밀도는 8.4g/cm<sup>3</sup>, 표면장력 계수는 325dyne/cm, 솔더볼의 부피는 9.83x10<sup>-13</sup>m<sup>3</sup>, 패드 직경은 100μm, 하나의 솔더볼에 가해지는 칩의 무게는 4mg이다<sup>1)</sup>.

Fig. 3은 2차 함수와 타원체를 이용하여 계산한 솔

더 형상을 나타낸다. 솔더 높이가 증가함에 따라 솔더 형상은 볼록한 oblate 타원체, 구형, prolate 타원체, 실린더, 오목한 실린더 형상으로 변화하며, 2차 함수와 타원체로 모델링한 솔더 형상은 매우 유사하다.

Fig. 4에 2차 함수를 이용하여 계산한 에너지 성분을 나타내었으며, 2차 함수와 타원체 및 Surface

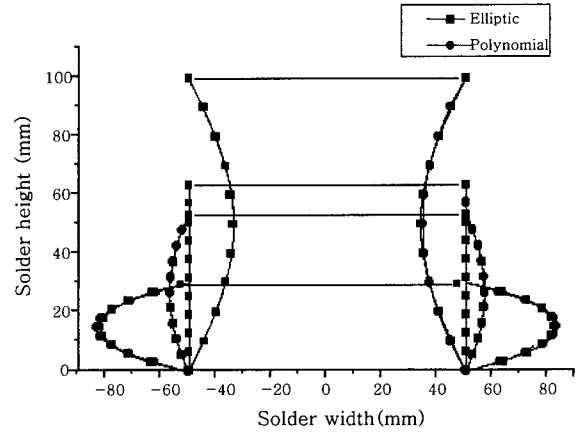
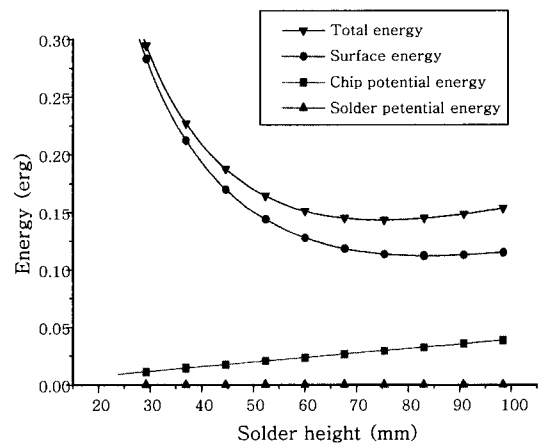
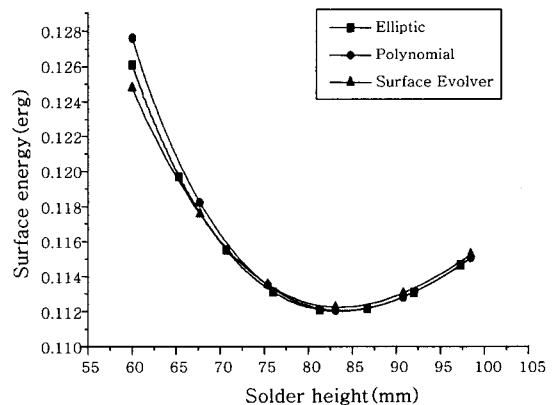


Fig. 3 Solder profiles in vertical direction using polynomial and elliptic



(a) Energy components using polynomial

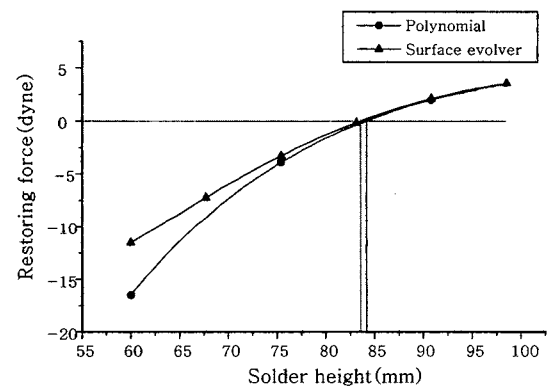


(b) Surface energy with respect to solder height

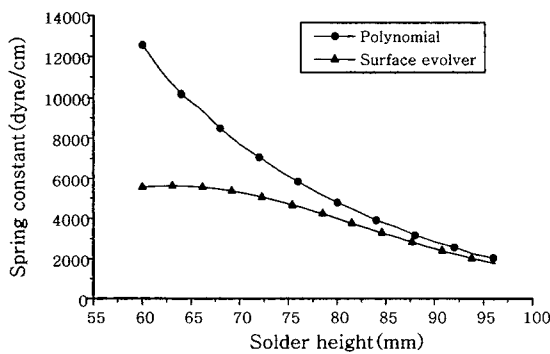
Fig. 4 Comparison of energy components and surface energy

Evolver를 이용하여 계산한 솔더의 표면 에너지를 비교하였다. Fig. 4(a)는 2차 함수를 이용하여 계산한 수직 변위에 대한 에너지 성분을 비교한 결과이며, oblate 형상에서 솔더 높이가 증가하면 에너지가 감소하고 평형 위치에서 에너지는 최소값을 갖는다. 솔더 높이가 계속 증가하여 prolate 형상으로 변화하면 에너지는 증가하지만, oblate 형상에 비하여 에너지 증가율은 감소한다. 에너지 성분을 비교하면 표면 에너지가 칩과 솔더 무게에 의한 위치 에너지에 비해 크고, 솔더 무게에 의한 위치 에너지는 매우 작기 때문에 플립칩의 경우 솔더의 위치 에너지가 자기 정렬에 미치는 영향은 무시할 수 있을 것으로 생각된다. 2차 함수와 타원체 및 Surface Evolver를 이용하여 계산한 솔더의 표면 에너지를 Fig. 4(b)에 비교하였다. 솔더 높이가 평형 위치보다 낮은 경우, Surface Evolver로 계산한 에너지가 2차 함수와 타원체를 이용한 결과보다 낮기 때문에 oblate 형상에서 Surface Evolver로 계산한 솔더 형상이 에너지를 최소화시킨 형상이다. 솔더 높이가 증가함에 따라 2차 함수와 타원을 이용하여 계산한 표면 에너지는 Surface Evolver의 결과와 거의 일치한다.

표면 에너지에 의한 복원력과 스프링 상수를 2차 함



(a)Energy compon



(b) Spring constants

Fig. 5 Comparison of restoring force and spring constant in vertical direction

수와 Surface Evolver로 계산하여 Fig. 5에 비교하였다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 솔더 높이가 낮은 oblate 형상에서 복원력의 차이가 발생하지만, 솔더 높이가 증가하면 복원력의 차이가 감소하여 prolate 형상에서의 복원력은 거의 동일하다. 복원력이 0인 평형 상태에서 Surface Evolver와 2차 함수로 계산한 표면 에너지에 의한 솔더 높이는 각각 83.6와 84.2 $\mu$ m이다. 솔더와 칩의 무게에 의한 위치 에너지를 고려하면, Surface Evolver와 2차 함수로 계산한 평형 상태의 솔더 높이는 각각 74.2와 75 $\mu$ m로 감소하며, 솔더 높이의 감소는 대부분 칩의 무게에 의한 것이고 솔더 무게에 의한 높이 변화는 무시할 정도로 작다. 솔더의 스프링 상수는 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 솔더 높이가 증가함에 따라 비선형적으로 감소한다. Surface Evolver로 계산한 스프링 상수는 2차 함수의 결과보다 작으며, 솔더 높이가 증가할수록 차이는 감소한다. 칩의 무게가 일정하기 때문에 스프링 상수는 칩의 무게와 무관하고 표면 에너지에 의해 결정된다.

### 3.2 수평방향 변위에 대한 해석 결과

칩의 장착과정에서 주로 수평방향의 오차가 발생하기 때문에, 수평방향 오차에 대한 자기 정렬 효과는 매우 중요하다. 평형 상태의 솔더 높이를 유지하면서 수평방향 변위에 의해 변화하는 솔더 형상과 표면 에너지, 복원력 및 스프링 상수를 2차 함수와 Surface Evolver를 이용하여 계산하였다. Fig. 6은 2차 함수를 이용하여 계산한 솔더 형상을 나타내며, 솔더 높이가 일정하기 때문에 솔더와 칩의 위치 에너지는 일정하다. 그러므로 솔더 형상은 표면 에너지에 의해 결정되고, 모델링에 사용된 가정에 의해 x-y 평면에서 솔더의 단면은 원을 유지한다.

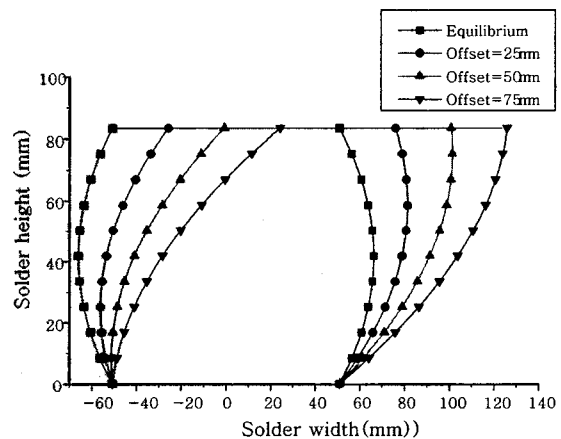
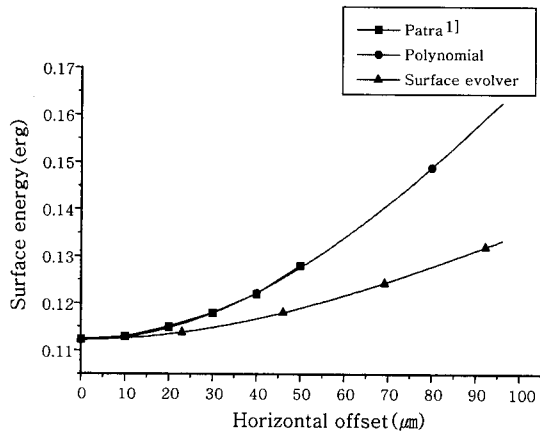
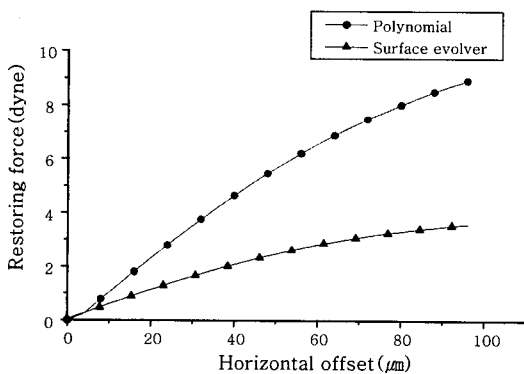


Fig. 6 Solder profiles in horizontal direction using polynomial

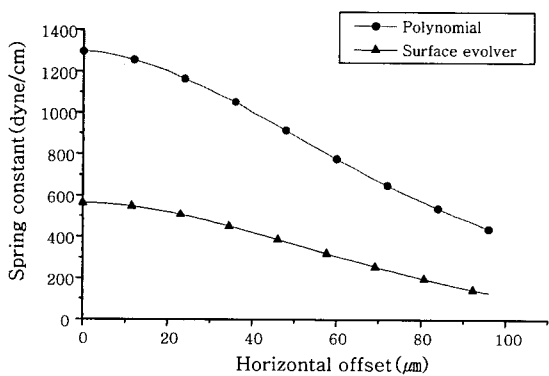
2차 함수와 Surface Evolver를 이용하여 계산한 솔더의 표면 에너지와 복원력 및 스프링 상수를 Fig. 7에 비교하였다. 표면 에너지는 Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 수평방향 변위가 증가함에 따라 에너지가 증가한다. 2차 함수와 Patra<sup>1)</sup>의 방법으로 계산된 표면 에너지는 거의 동일하지만, Surface Evolver로 계산한 표면 에너지는 2차 함수로 계산한 결과에 비해서 상당히 작고, 수평방향의 변위가 증가하면 에너지의 차이가 증가한다. Surface Evolver를 이용하여 계산한 표면 에너지



(a) Surface energy



(b) Restoring forces



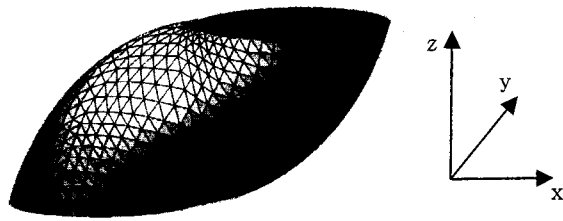
(c) Spring constants

Fig. 7 Comparison of self-aligning effects in horizontal direction

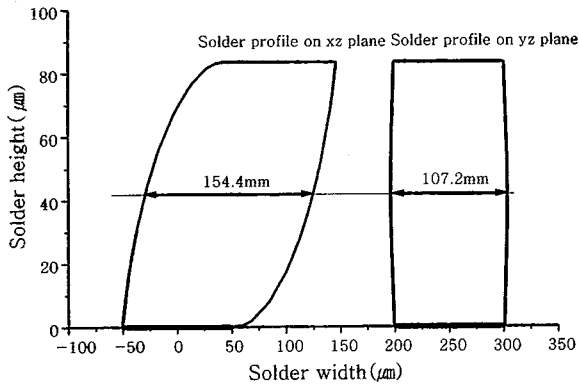
가 2차 함수를 이용한 모델링이나 Patra의 모델링으로 구한 표면 에너지에 비해 낮기 때문에 Surface Evolver가 보다 정확하게 솔더 형상과 자기 정렬 효과를 예측한다. 2차 함수와 Surface Evolver를 이용하여 계산한 복원력은 Fig. 7(b)에 보인 바와 같이 변위가 감소하면 복원력이 감소하며, 2차 함수를 이용하여 계산한 복원력에 비해 Surface Evolver로 계산한 복원력이 상당히 작다. 평형 위치로 이동하면서 복원력이 0에 접근하기 때문에 평형 위치 부근의 자기정렬 효과가 작아지며 정렬오차가 발생하는 것으로 판단된다. 솔더의 스프링 상수는 Fig. 7(c)에 보인 바와 같이 수평방향의 변위가 증가함에 따라 스프링 상수는 감소하며, Surface Evolver로 구한 스프링 상수가 2차 함수로 계산한 결과보다 작다.

수직방향에 비해 수평방향 변위가 발생하는 경우에는 Surface Evolver의 계산 결과와 2차 함수 등을 이용한 모델로 계산한 결과와 차이가 크게 발생한다. 이와 같은 차이는 기존의 솔더 형상 모델링에서 솔더의 단면 형상을 원으로 가정하였기 때문에 발생하는 것으로 추정되며, 솔더에 수평방향으로 96μm의 변위가 발생하는 경우에 Surface Evolver로 계산한 솔더의 형상은 Fig. 8에 나타내었다. Surface Evolver로 계산된 솔더 중심부 단면의 장축과 단축 길이는 각각 154.4와 107.2μm로서 타원 형상과 유사하다. 그러므로 수평방향의 변위가 발생하는 경우의 솔더 단면 형상은 타원 형상으로 변화하고 원에 비해 낮은 에너지 상태가 되기 때문에 솔더의 단면이 원을 유지한다는 가정은 타당하지 않다. 이 가정에 의한 추가의 구속조건으로 인하여 기존의 모델로 계산한 표면 에너지는 Surface Evolver의 결과에 비하여 매우 높아진다. Veen<sup>5)</sup>은 수평방향 변위에 의한 솔더 형상을 기울어진 실린더로 가정하였으므로 단면은 타원 형상이지만, Fig. 6과 8에 나타난 바와 같이 솔더 형상은 기울어진 실린더 형상과 다르고 솔더의 높이도 변화하기 때문에 Veen의 모델도 수평방향의 변위에 적합하지 않다. 수직방향 변위가 발생하는 경우, 솔더 단면의 형상이 원형을 유지하기 때문에 다른 모델을 사용하여도 수평방향의 경우와 달리 계산 결과의 오차는 감소한다. 이와 같은 결과로부터 2차 함수를 포함하는 기존의 솔더 형상 모델링 방법으로 구한 에너지 값에 비해 Surface Evolver로 계산한 에너지가 낮기 때문에 Surface Evolver를 이용하여 가장 정확한 솔더 형상을 구할 수 있을 것으로 판단된다. 추가의 2차 함수를 정의하여 정확한 솔더 형상을 계산할 수 있지만, 계산이 복잡해지는 단점이 있다.

수직과 수평 방향으로 발생하는 동일한 변위에 대한 복원력과 스프링 상수의 비인  $F_v/F_h$ 와  $k_v/k_h$ 를 Fig. 9



(a) Three-dimensional solder profile



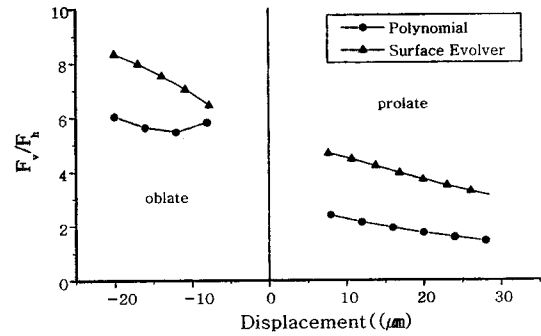
(b) Cross-sections of solder joint

Fig. 8 Solder profile in horizontal direction using surface evolver

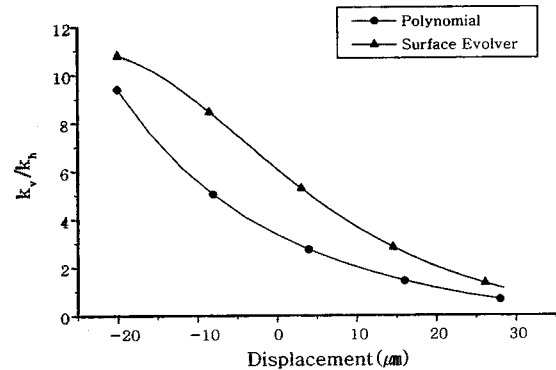
에 나타내었다. 평형상태에서 수직과 수평 방향의 복원력은 모두 0이기 때문에 Fig. 9(a)에서  $F_v/F_h$ 를 정의할 수 없지만, 수직방향의 복원력이 수평방향에 비해 항상 크다 ( $F_v/F_h > 1$ ). Oblate 형상에서 Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 수직방향의 복원력이 크기 때문에  $F_v/F_h$ 는 증가하며, 변위가 감소할수록  $F_v/F_h$ 는 감소한다. Surface Evolver로 계산한 수평방향의 복원력이 2차 함수를 이용하여 계산한 결과보다 작기 때문에, Surface Evolver로 계산한  $F_v/F_h$ 는 2차 함수를 이용하여 계산한 결과보다 크다. Fig. 9(b)에 보인 스프링 상수의 경우에도 oblate 형상에서 수직과 수평방향의 스프링 상수 비인  $k_v/k_h$ 는 10배에 달하지만, prolate 형상으로 변화하면  $k_v/k_h$ 는 감소한다. 수평방향의 복원력과 스프링 상수가 수직방향에 비해서 작기 때문에, 수직방향 보다 수평방향으로 정렬오차가 발생하기 쉽다. 그러므로 자기정렬 효과를 이용하여 플립칩과 광부품을 정렬시키는 경우, 수평방향의 외란(disturbance)을 감소시켜 칩의 정렬 오차를 줄이는 것이 중요하다.

#### 4. 결 론

플립칩 솔더링에서 발생하는 자기정렬 효과를 해석하기 위하여 솔더 형상을 2차 함수로 모델링하였으며, Surface Evolver를 이용한 계산 결과와 비교하였다.



(a) Restoring force ratio



(b) Spring constant ratio

Fig. 9 Comparison of restoring force and spring constant in vertical and horizontal direction

1) 수직방향의 변위에 대한 솔더 형상을 2차 함수로 모델링하여 솔더볼의 표면에너지, 복원력, 스프링 상수를 계산하였다. 2차 함수를 이용한 계산 결과는 기존의 모델과 Surface Evolver의 결과와 대부분 일치하였으며, 솔더 무게가 자기 정렬에 미치는 영향은 표면 에너지에 비해 매우 작다.

2) 수평방향의 변위가 발생하는 경우, 2차 함수를 이용하여 계산한 표면 에너지는 Surface Evolver로 계산한 결과에 비해서 매우 크며, 이와 같은 차이는 2차 함수를 이용한 모델이나 기존의 모델에서 솔더의 단면 형상을 원으로 가정하였기 때문에 발생한다.

3) 수평방향의 복원력과 스프링 상수는 수직방향의 복원력과 스프링 상수보다 작기 때문에 수평방향의 외란에 의해 큰 정렬오차가 발생할 수 있다.

4) 2차 함수를 포함하는 기존의 솔더 형상 모델링 방법으로 구한 에너지 값에 비해 Surface Evolver로 계산한 에너지가 낮기 때문에 Surface Evolver를 이용하여 가장 정확한 솔더 형상을 구할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 (1999-2-301-007-4)과 BK-21의 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. S. K. Patra, Y. C. Lee : Quasi-static modeling of the self alignment mechanism in flip-chip soldering, part I - single solder joining, Trans. of ASME, Journal of Electronic Packaging, 1991, 337-342
2. S. K. Patra, Y. C. Lee : Modeling of self alignment mechanism in flip chip soldering, part II - multichip solder joints, IEEE, Electronic Components and Technology Conference, Proceedings., 1991, 783-788.
3. S. K. Patra, S. S. Sritharan, Y. C. Lee : Quantitative characterization of a flip chip solder joint, Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 62 (1995), 390-397
4. M. Landry, S. K Patra, Y. C. Lee : Experiment and modeling of the self alignment mechanism in flip chip soldering, ASME, Materials challenges in microelectronic packaging, AMD-Vol. 31/EEP-Vol. 1 (1991), 49-56.
5. N. Veen : Analytical derivation of the self alignment motion of flip chip soldered components, Trans. of ASME, Journal of Electronic packaging, Vol. 121 (1999), 116-121
6. Q. Zhu, C. Wang, L. Lue : Optimization of design and manufacturing parameters for solder joint geometry and self-alignment in flip chip technology, Solid-State and Integrated Circuit Technology, Proceedings of 1998, 5th International Conference, 1998, 554-558.
7. G. Subbarayan, A. Deshpande : The nature of centroidal locus in misaligned flip chip solder joints, Trans. of ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol. 119 (1997), 156-162
8. A. M. Deshpande, G. Subbarayan, R. L. Mahajan: Maximizing solder joint reliability through optimal shape design, Trans. of ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol. 119 (1997), 149-155.
9. K.N. Chiang, C. A. Yaun : An overview of solder bump shape prediction algorithms with Validations, IEEE Trans. on Advanced Packaging, 24-2(2001), 158-162
10. W. Lin, S. K. Patra, Y. C. Lee : Design of solder joints for self aligned optoelectric assembly, IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology - Part B, 18-3 (1995), 543-551
11. T. Hideki, H. Tsuyoshi, K. Kohsuke : Micro alignment technique using 26 diameter microsolder bumps and its shear strength, Electronic Manufacturing Technology Symposium, Proceedings of 1995 Japan International, 18th IEEE/CPMT International, 196, 52-55
12. K. C. Hung, Y. C. Chan : Study of self alignment of (BGA packaging, IEEE Trans. on Advanced Packaging, 23-4(2000), 631-636
13. B. Su, M. Gershovich, Y. C. Lee : Gas flow effects on precision solder self-alignment, IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology -Part C, 20-4 (1997), 305-311
14. K. Brakk : The Surface Evolver, Experimental Mathematics, 1-2 (1992), 141-165
15. K. Brakke, Surface Evolver Manual, Mathematics Department, Susquehanna University, 1999