

研究論文

위킹이 Gullwing 리드의 솔더 접합부 형상에 미치는 영향

최동필* · 유중돈* · 이태수** · 최상균***

Effects of Wicking on Solder Joint Profile in Gullwing Lead

Tong P. Choi*, Choong D. Yoo*, Tae S. Lee** and Sang K. Choi***

Key Words : Wicking effect, Intermetallic formation, Solder joint profile, Wicking constant, Gullwing lead

Abstract

During the reflow process in SMT, the molten solder has been observed to move upward and solidify along the gullwing lead, which is called the wicking phenomenon. In this paper, possible causes of the wicking are investigated, and its effects on the solder joint profile are quantitatively estimated by introducing the wicking constant. The free energy reduction by intermetallic formation between the copper and tin seems to be the major source of wicking action. The joint profiles of the gullwing lead are calculated using the previous finite element formulation incorporated with the wicking constant. The calculated results show reasonably good agreements with the experimental data when the wicking effects are considered.

1. 서 론

솔더(solder)의 젖음성(wettability)은 납접 공정에서 사용하는 플럭스(flux), 솔더의 조성, 표면 상태 등의 다양한 요인에 의하여 영향을 받으며¹⁻⁵⁾, 젖음성은 gullwing 리드(lead)와 패드(pad) 사이에 형성되는 솔더 접합부의 형상과 밀접한 연관이 있다. 솔더 접합부 형상 예측에 관한 대부분의 연구는 경계

조건을 만족시키며 접합부에 작용하는 표면장력과 중력에 의하여 발생하는 에너지를 최소화시키는 과정을 통하여 접합부 형상을 계산하였다. 이러한 방법으로 각형과 gullwing 리드의 접합부 형상을 예측하였으며^{6,7)}, 계산 결과를 바탕으로 적절한 솔더량을 산출하는 방법이 제시되었다⁸⁾.

리플로우(reflow) 공정에서 용융 상태의 솔더가 리드 상단으로 이동하여 응고하는 위킹(wicking) 현상이 많은 경우에 관찰되었다. 위킹으로 인하여

※ 1998년 4월 13일 접수

* 정회원, 한국과학기술원 자동차 및 설계공학과

** 비회원, 서강대학교 기계공학과

*** 정회원, 영남대학교 기계공학부

접합부 필릿 (fillet) 형성에 사용되는 솔더량이 감소하면 리드 하단의 접합 부분에서는 미납 상태가 발생하거나, 리드의 상단 부분에서는 과납 상태가 발생할 수 있다. 미납이 발생하면 접합부의 피로 수명이 감소하므로⁹⁾, 위킹에 의하여 리드 상단으로 이동한 솔더량을 보충하기 위하여 필요 이상의 솔더량을 공급하는 경향이 있다. 기존의 접합부 형상을 예측하는 방법은 이와 같은 위킹의 영향을 고려하지 못하기 때문에 보정 솔더량은 일반적으로 실험을 통하여 구한다. 그러므로 위킹을 고려하여 접합부의 형상을 예측할 수 있으면 접합부의 구조 해석을 보다 정확하게 할 수 있으며, 적정 솔더량을 결정하거나 패드 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

위킹은 솔더 접합부 형상에 많은 영향을 끼치는 요소이지만 위킹의 발생 원인이나 발생량에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 위킹의 발생 원인에 대해서 리플로우 공정시 발생하는 불균일한 온도 분포, 패드와 리드의 표면 상태, 솔더의 조성 등으로 다양하다. 이와 같은 원인 중에서 리플로우 공정 중에 리드 상부의 온도가 리드 하부나 패드 보다 상대적으로 높아져서 발생하는 불균일한 온도 분포가 위킹 발생의 주요 원인으로 설명되고 있다.

본 연구는 기존의 연구 결과들을 바탕으로 위킹 발생의 주된 원인을 분석하고, 위킹의 영향을 위킹 상수 (wicking constant)를 이용하여 정량적으로 계수화하고자 하였다. 유한요소법을 이용한 gullwing 리드의 접합부 형상 예측 알고리즘¹¹⁾에 위킹 상수를 포함시켜 위킹을 고려한 접합부 형상을 계산하고 실험 결과와 비교하였다.

2. 젖음 현상의 원리

표면의 젖음 (wetting)은 표면 에너지 γ 로 나타낼 수 있으며, 표면 에너지는 일정한 압력과 온도에서 표면적의 변화에 따른 Gibbs 자유 에너지의 변화율로 아래와 같이 정의된다¹²⁾.

$$\gamma = (dG/dA)_{P,T,n} \quad (1)$$

이때, P, T, n, A는 각각 압력, 온도, 원자 수, 원자의 면적을 나타낸다. 젖음의 정도는 Fig. 1의 접촉각 크기에 따라 접촉각이 90°보다 크게 되면

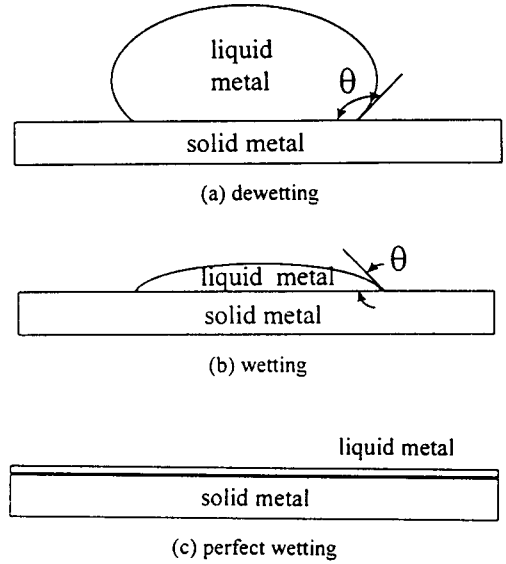


Fig.1 Typical wetting phenomena

젖음 불능 (dewetting), 90°보다 작은 예각을 이루면 젖음 (wetting), 그리고 접촉각이 0°인 경우 완전 젖음 (perfect wetting)으로 구분된다. 전자 부품을 납 접하는 경우, 일반적인 솔더의 접촉각은 40°이하의 예각을 이룬다^{13,14)}.

서로 다른 표면 에너지 준위를 갖는 물체가 만나서 이루는 평형 상태에서, 표면 에너지 또는 표면 장력과 접촉각의 관계는 아래의 Young 식으로 표현된다.

$$\cos\theta = (Y_s - Y_{sl}) / Y_l \quad (2)$$

이때, 아래 첨자 S와 L은 고체 (solid)와 액체 (liquid)를 나타내며, SL은 고액 경계 (solid-liquid interface)를 나타낸다. 젖음을 최대화하려면 접촉각을 최소화시켜야 하며, 접촉각을 감소시키려면 Y_s 를 증가시키거나 Y_l 과 Y_{sl} 를 감소시켜야 한다. 이를 위하여 리드 표면에 산화 방지를 위한 도금 처리를 하거나 플럭스를 사용한다. 납접 공정 중에 솔더와 구리 사이의 고액 경계면에서 화학 반응이 발생하여 금속간 화합물 (intermetallics)이 생성되면 Y_{sl} 이 감소한다. 금속간 화합물이 생성되면 Gibbs 에너지와 식 (1)에 의해 표면 에너지가 감소한다. 또한, 온도 구배에 대한 표면장력의 변화로 인하여 발생하는 Marangoni 유동에 의하여 솔더가 이동할 수 있다.

이와 같이 다양한 요인에 대한 기존의 연구를 분석하여 위킹의 발생 원인을 추정하였다.

위킹 발생의 주된 원인으로 가장 널리 인용되는 리플로우 공정에서 발생하는 불균일한 온도 분포가 솔더의 이동에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 리플로우 공정시 열원에 가까운 칩과 리드 상부의 온도는 열원에서 먼 패드의 온도보다 높기 때문에, 패드와 리드 사이의 온도차가 발생한다. 리드 상부의 솔더는 상대적으로 높은 온도로 인하여 표면 에너지가 감소하고, 용융 상태의 솔더는 에너지를 감소시키는 방향으로 퍼지게 되어 리드의 상부로 이동하는 위킹이 발생한다고 설명되어 왔다. 이와 관련하여 Wang⁹⁾은 솔더의 젖음성 실험을 통하여 온도가 증가함에 따라 솔더의 접촉각이 감소하며 젖음이 증가하는 현상을 보였으며, Moon¹³⁾은 실리콘 오일과 솔더의 젖음성을 온도에 따라 비교하는 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 측정된 젖음 높이(wetting height)와 젖음력(wetting force)은 계산 결과와 많은 차이를 보였으며, 실험으로 측정된 젖음력은 계산 결과보다 작았다. Moon은 이러한 젖음력의 차이가 온도 구배에 의한 Marangoni 효과에 의하여 발생하는 것으로 추정하였으며, 이와 같은 추정은 온도 구배에 예민하게 반응하는 실리콘 오일의 경우는 타당하다. 그러나, 솔더는 오일보다 온도 변화에 따른 표면 에너지의 변화율이 크지 않고, 특히, 용융점 부근에서 표면 에너지 변화율은 매우 작으므로 Marangoni 유동이 솔더의 이동에 미치는 영향은 크지 않았다.

Eftychiou¹⁰⁾는 리플로우 공정에서 전도 및 복사에 의한 열이 전자 부품에 미치는 영향을 규명하기 위하여 패키지 상단과 패드 사이의 온도를 측정하였으며, 정상적인 납접 공정에서 패키지 상단이 패드보다 10°C 정도 높았다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 솔더의 조성비에 따라 액상의 표면 에너지는 크게 변화하지만⁴⁾, 조성이 일정한 경우에 온도차에 의한 솔더의 표면 에너지 변화는 크지 않으며, 솔더의 용융 온도 부근에서의 표면 에너지 변화는 매우 작다. 또한, 리드의 주성분은 구리의 합금이므로 열전도 계수가 크기 때문에 열전달이 매우 빠르다. 그러므로 불균일한 온도 분포가 위킹을 발생시키는 주된 인자는 아니라고 추정된다.

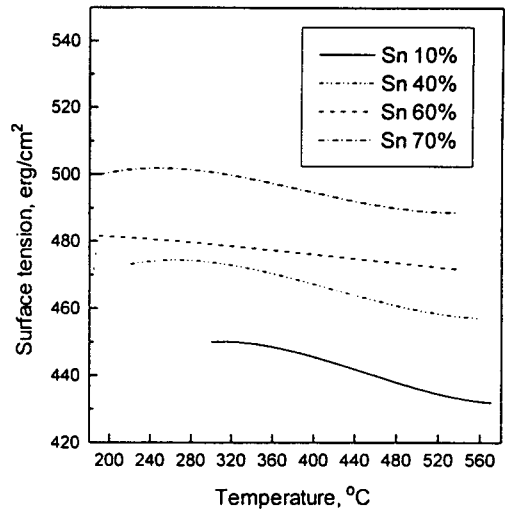


Fig. 2 Solder surface energy variation according to temperature⁴⁾

3. 고액 경계의 화학 반응을 고려한 젖음

3.1 위킹 영향의 정량화

납접 공정에서 플럭스는 Fig. 3에 보인 바와 같이 패드와 리드에 존재하는 불순물과 산화막을 제거하며, 솔더와 접하는 패드와 리드의 경계면에는 주석과 구리의 확산에 의하여 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn 의 금속간 화합물을 생성한다^{17, 18)}. 금속간 화합물은 고액 경계의 표면 에너지 γ_{SL} 을 감소시키며, 식 (2)에서 γ_{SL} 의 감소는 접촉각을 최소화시켜 솔더의 퍼짐이 증가한다. 고액 경계의 결합력이 증가할수록 γ_{SL} 은 감소하며¹⁹⁾, 완전 젖음 상태에서 화학 반응에 의한 표면 에너지의 감소는 추가의 젖음력으로 작용한다. 이와 같은 금속간 화학 반응을 고려한 젖음 현상은 다음의 퍼짐 조건식으로 표현된다²⁰⁾.

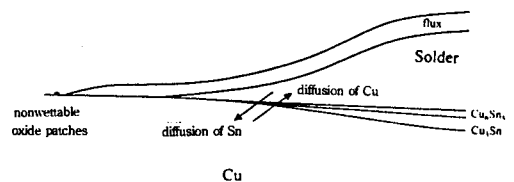


Fig. 3 Schematic presentation of soldering process

$$Y_s - (Y_{sl} + (\Delta G/\Delta A)) > Y_L \tag{3}$$

위의 식에서 $(\Delta G/\Delta A)$ 는 화학 반응에 의하여 고액 경계의 단위 면적에서 발생하는 표면 에너지의 변화량을 나타낸다.

Wassink¹⁹⁾는 철의 표면에서 용융 상태의 은과 구리의 젖음 실험을 수행하여 고액 경계면의 화학 반응이 젖음에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 구리의 표면 에너지 ($Y_L=1300\text{erg/cm}^2$)가 은의 표면 에너지 ($Y_L=900\text{erg/cm}^2$) 보다 크기 때문에 은이 구리보다 잘 퍼져야 하지만, 실제로는 구리가 은보다 더 잘 퍼지는 현상을 관찰하였다. 이와 같은 현상은 은과 철은 잘 용융되지 않지만, 구리와 철은 고액 경계면에서는 화학 반응이 발생하기 때문에 경계의 표면 에너지가 감소하여 젖음성이 증가하기 때문이다. 또한, Abbot²⁰⁾는 니켈 합금에서 위킹이 발생하지 않는 원인으로 니켈과 솔더의 금속간 화합물을 생성하는 반응 속도가 느리기 때문인 것으로 추정하였다.

기존의 연구를 종합하면, 솔더의 젖음성은 고액 경계의 표면 에너지 변화에 의하여 크게 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 고액 경계의 표면 에너지를 이론 또는 실험을 통하여 구할 수 있다면 위킹의 영향을 고려하여 접합부 형상을 계산할 수 있다. 고액 경계의 표면 에너지를 계산하는 방법으로 Gibbs 에너지 변화를 방법과 용융도 방법 등이 있다¹²⁾. Gibbs 에너지는 엔탈피와 엔트로피의 변화율로 나타낼 수 있으며 ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$), 이론적으로 화학 반응 전후의 엔탈피와 엔트로피 변화로부터 Gibbs 에너지 변화를 구할 수 있다. ΔG 의 값이 (-)인 경우에는 에너지가 감소하므로 퍼짐 조건식 (3)을 만족한다.

두 금속의 용융도가 작은 경우에는 용융도를 이용하여 고액 경계의 표면 에너지를 계산하였으며, Sasabe²⁰⁾는 동일한 방법으로 솔더의 주석 함량에 대한 솔더와 구리 사이의 표면 에너지 값을 계산하였다. 주석의 조성비가 증가하면 경계면의 표면 에너지가 급격하게 감소하였다. 이와 같은 기존의 연구 결과로부터, 화학 반응에 의하여 발생한 고액 경계의 표면 에너지 감소가 퍼짐 조건식 (3)을 만족하며 위킹의 중요한 원인이 될 수 있음을 보였다. 그러나 위의 방법으로 얻어진 결과는 이상적인 조건에서 실험 또는 계산을 통하여 구하였으므로 위킹의 영향을 정량적인 수식으로 표현하여 접

합부의 형상을 계산하는데 적용하기 어렵다.

앞에서 지적한 바와 같이 표면 에너지 변화를 수식으로 표현하기 어렵기 때문에, 본 연구에서는 Moon¹³⁾의 실험 결과에 근거하여 $(\Delta G/\Delta A)$ 항을 위킹 상수 Y_w 로 정의하였다. 위킹 상수의 값은 젖음 평형 실험 (wetting balance test)을 통하여 구한다. 즉, 솔더와 구리 기판 사이에 화학 반응이 발생하지 않으면, 계산에 의한 젖음력은 실험 결과로 측정된 젖음력과 동일하게 되지만, 실제 솔더와 구리의 젖음 평형 실험에서는 계산값이 측정값보다 크게 된다 ($f_w > f_m$). 이와 같은 차이는 솔더와 구리의 화학 반응에 의하여 발생하며, 화학 반응에 의해 발생하는 추가의 힘 f_w 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_w = f_m - f_c \tag{4}$$

$$f_c = C Y_L \cos\theta, f_w = -C Y_w \tag{5}$$

이때, C는 솔더와 시편이 접하는 부분의 길이를 나타낸다. Moon의 실험과 계산을 통하여 구한 젖음력으로 부터 계산된 위킹 상수 Y_w 는 31.9erg/cm^2 이며, 위킹에 의한 젖음력 f_w 의 (-)부호는 고액 경계면에서의 표면 에너지 감소를 의미한다. 이와 같은 위킹 상수를 이용하면 위킹의 영향을 정량적으로 표현할 수 있으며, 유한요소 모델링에 쉽게 도입하여 수식화할 수 있는 장점이 있다.

3.2 위킹을 포함한 접합부 형상의 수식화

구리와 솔더의 고액 경계면에서 발생하는 표면 에너지 변화를 위킹 상수를 이용하여 gullwing 리드에 대한 유한요소법의 수식화 과정에 대입하였다. 접합부에 작용하는 중력 에너지와 위킹을 고려한 표면 에너지를 최소화하여 접합부의 형상을 계산하며, 에너지 식은 다음과 같다¹¹⁾.

$$E = \int_{S_L} Y_{SL} dA + \int_S Y_s dA + \int_L Y_L dA + \int_V \rho g z dV \tag{6}$$

체적 제한 조건식을 만족시키기 위해 Lagrangian 연산자 λ 를 도입하고, 위킹 상수는 고액 경계의 표면 에너지에 영향을 미치므로 Y_{SL} 항에 첨가하면 다음과 같다.

$$E = \int_{sl} \{ (Y_{sl} + Y_w) - Y_s \} dA + \int_L Y_L dA + \int_V \rho g z dV + \lambda (V_o - \int dV) \quad (7)$$

패드의 경계선을 따라 접합부의 높이가 0인 경계 조건을 부가하므로 위킹 상수 Y_w 는 리드와 솔더가 접촉하는 경계선을 따라 부가하였다. 수정된 에너지 식(7)은 위킹의 영향을 고려하였으므로 식(6)보다 일반적이며, 기존 연구의 유한요소법을 이용한 에너지 최소화 과정을 통하여 접합부 형상을 계산하였다¹¹⁾.

4. 결과 및 고찰

위킹이 발생하지 않는 경우와 발생하는 경우에 대하여 사각 패드와 수직면에 형성되는 3차원 접합부의 형상을 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 계산에 사용된 사각 패드의 길이와 폭은 각각 0.3과 0.5mm, 솔더량은 0.008mm³이며, 솔더의 표면장력과 밀도는 각각 490erg/cm² 과 8.7g/cm³ 이다. 위킹 상수를 25erg/cm²로 설정한 경우, 솔더와 구리 패드의 경계면 에너지가 감소하여 솔더가 수직면의 상단으로 이동하였고, 접합부의 최대 높이가 위킹을 고려하지 않은 경우와 비교하여 증가하였다.

실험을 통하여 gullwing 리드의 접합부의 형상을 측정하여 (Fig. 5), 위킹의 영향을 관찰하였다. 실험에 사용된 패드 폭은 0.635mm, 패드 길이는 1.5, 1.9, 2.3mm이며, 리드는 패드의 중앙에 위치한다. 패드 길이와 무관하게 일정한 솔더량을 공급하였으며, 실제 공급된 솔더량은 0.045mm³이지만 리드의 곡면에 채워진 솔더량을 제외한 값인 0.039mm³을 접합부 계산에 사용하였다. 위킹의 영향으로 경사면 리드에 형성된 대략 두께 0.02mm의 얇은 솔더

의 층이 측정되었다.

경사각이 12°인 gullwing 리드의 솔더 접합부에 대한 계산과 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 계산에서 위킹을 고려하는 경우, 위킹 상수는 Moon¹³⁾의 실험 결과로부터 구한 31.9erg/cm²를 사용하였

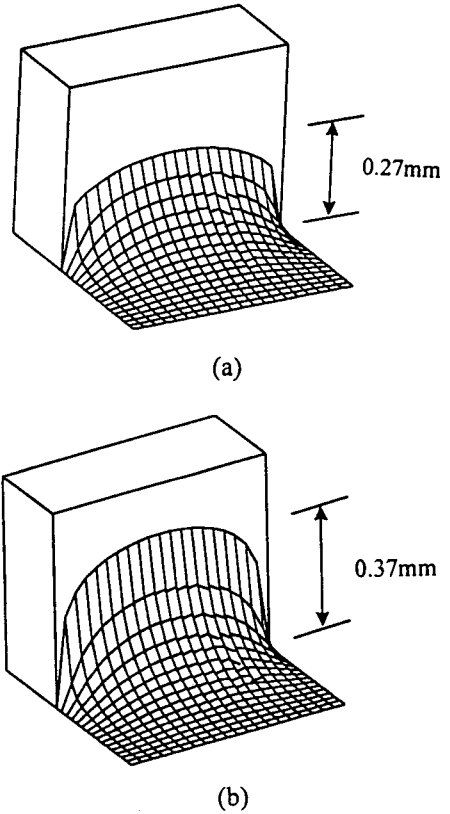


Fig. 4 Calculated solder profiles on the vertical plane (a) no wicking (b) wicking ($Y_w = 25\text{erg/cm}^2$)

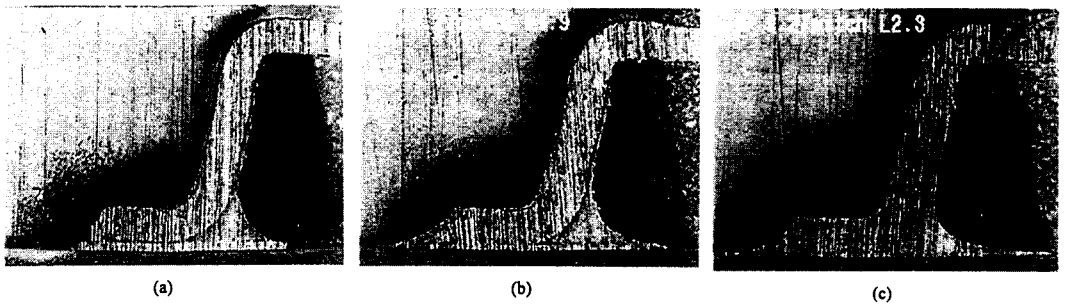


Fig. 5 Cross section of solder joint profile with different pad length (a) L=1.5mm (b) 1.9mm (c) 2.3mm

다. 패드 길이가 1.5mm인 경우 (Fig. 6a), 위킹을 고려하지 않은 접합부의 앞부분인 토우(toe)는 거의 직선 형태의 필릿으로 계산되었다. 접합부의 뒷부분인 힐(heel)은 최대 높이는 0.6mm정도이고 완만하게 오목한 필릿 형상을 가지는 과남 형태로 계산되었다. 위킹을 고려하지 않으면 접합부의 형상을 정확하게 예측할 수 없었다. 위킹을 고려하여 접합부의 형상을 계산한 결과, 힐에서 리드 상단으로 솔더가 이동하는 위킹 현상을 계산할 수 있었다. 위킹으로 인해 발생하는 솔더층의 두께와 계산에 의한 두께는 거의 일치하였고, 일반적으로 계산 결과는 실험 결과를 상당히 정확하게 일치하였다.

패드 길이가 1.9와 2.3mm인 경우 (Fig. 6b, 6c),

토우는 완만하게 오목한 형상으로 변화하였다. 위킹을 고려하지 않은 경우, 패드 길이가 1.5mm인 경우와 비교하여 동일한 솔더량을 사용하므로 힐의 최대 높이는 감소하였으며, 위킹의 영향은 계산되지 않았다. 위킹을 고려한 접합부의 형상은 실험 결과와 비교하여 패드 길이가 1.5mm인 경우에 비하여 오차가 증가하지만, 실험 결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 패드 길이가 증가하면 실험과 계산 결과의 오차가 증가한다. 이는 계산에서 솔더가 패드면에 완전히 퍼진다고 가정하여 패드 경계면에 필요 경계 조건을 부과하였기 때문에 패드 길이가 증가할수록 오차가 증가하는 것으로 추정된다. 또한, 계면의 조건에 따라 위킹 상수의 값이 변화할 수도 있을 것이다. 그러나, 일반적으로 위킹을 고려하여 접합부를 계산하면 위킹을 고려하지 않은 경우보다 접합부의 형상을 정확하게 계산할 수 있으며, 계산에 사용된 위킹 상수값인 31.9erg/cm²가 타당함을 알 수 있었다.

일정한 솔더량을 공급할 때, 위킹 상수가 접합부 형상에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 계산에 사용된 패드 길이는 1.9mm, 솔더량은 0.04mm³이며, 위킹 상수는 5, 25, 45erg/cm²로 변화시켰다. 위킹 상수의 값이 변화하여도 토우와 힐의 아래 부분의 형상은 거의 변화하지 않았다. 위킹 상수값이 증가할수록 힐의 위 부분의 형상은 변화하고, 최대 높이는 위킹 상수가 증가함에 따라 크게 증가하였다. 그러므로 솔더량이 동일한 조건에서 위킹은 토우나 힐의 아래 부분보다 힐의 위 부분에 영향을 미치게 된다.

솔더량 변화에 대한 접합부 형상을 위킹을 고려하여 계산한 결과를 Fig. 8에 비교하였다. 패드 길이는 1.9mm, 솔더량은 0.03, 0.04, 0.05mm³이며, 위킹 상수는 31.9erg/cm²이다. 솔더량이 증가할수록 토우의 오목한 정도가 감소하였으며, 힐의 높이와 솔더층의 두께가 증가하였다. 이와 같은 결과로부터 위킹 상수는 힐의 상부 형상에 큰 영향을 미치고, 솔더량은 접합부의 전체 형상에 많은 영향을 끼침을 알 수 있다.

본 연구에서 위킹 상수를 일정하다고 가정하여 접합부의 형상을 예측하였다. 그러나 위킹 상수는 솔더와 모재 사이의 계면 상태에 따라 변화하므로, 위킹을 고려한 접합부의 형상을 정확하게 예측하려면 계면의 상태와 리플로우 공정의 조건이 실제와 유사한 조건에서 실험을 수행하여 얻은 위

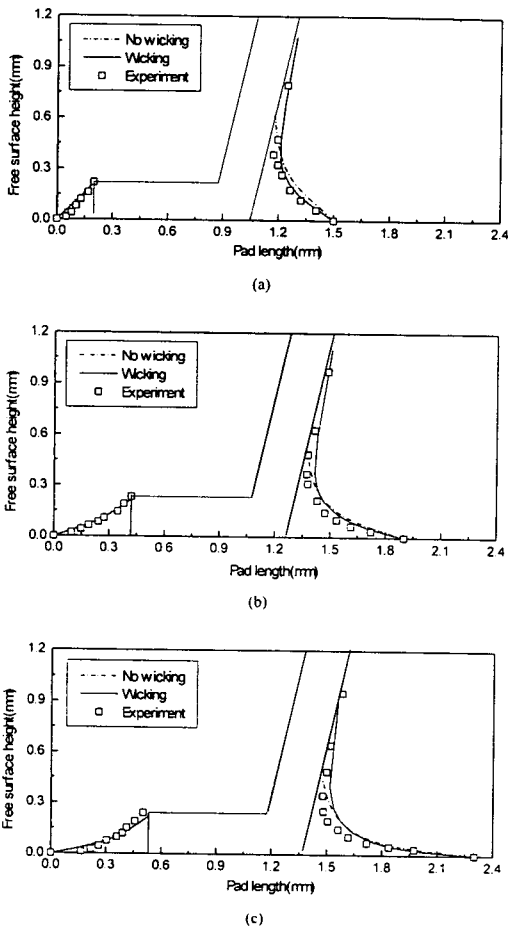


Fig.6 Comparisons between calculated and measured joint profiles with pad length (a) 1.5mm (b) 1.9mm (c) 2.3mm

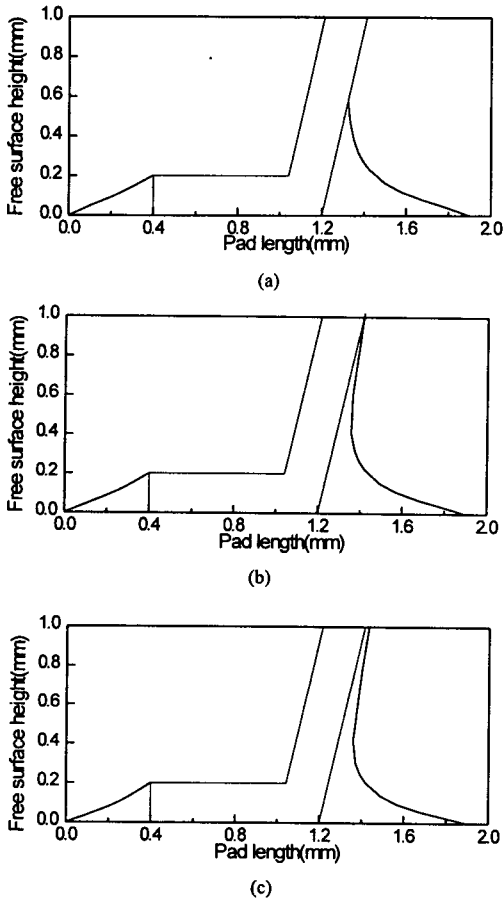


Fig.7 Comparisons of predicted and experimental cross-section profile (a) pad length = 1.5mm (b) 1.9mm (c) 2.3mm

킹 상수를 적용하여야 한다. 이와 함께 위킹이 발생하는 조건에 대한 실험적인 연구가 요구되며, 본 연구에서 위킹의 주된 원인으로 추정된 화학 반응에 의한 표면 에너지의 변화뿐만 아니라 불균일한 온도 분포의 영향을 고려할 수 있는 방법에 관한 추가의 연구가 선행 연구로서 요구된다.

5. 결 론

기존의 연구 결과를 분석하여 납접 공정에서 발생하는 위킹 현상은 불균일한 온도 분포보다 솔더와 구리의 경계면에서 생성된 금속간 화합물에 의

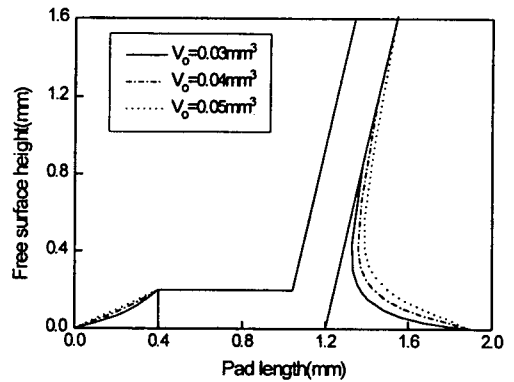


Fig.8 Effect of solder volume on solder joint profile

하여 고액 경계의 표면 에너지가 감소하기 때문에 발생하는 것으로 추정하였다. 위킹 상수를 도입하여 위킹의 영향을 정량적으로 계수화하였으며, 이를 유한요소 모델링에 적용하여 gullwing 리드의 3차원 접합부 형상을 계산하였다. 위킹 상수를 이용하여 리드 상단까지 필릿이 형성되는 위킹 현상을 계산할 수 있었고, 위킹을 고려하지 않는 경우와 비교하여 접합부의 형상을 정확하게 예측할 수 있었다. 위킹 상수는 접합부의 토우와 힐의 아래 부분보다 힐의 위 부분 형상에 큰 영향을 미치며, 공급 솔더량이 증가하면 위킹에 의한 솔더층의 두께가 증가하고 접합부의 형상에 큰 영향을 미친다. 정확한 위킹 상수를 설정하면 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 위킹을 고려한 적정 솔더량의 산출과 접합부의 형상 예측 및 패드 설계 등에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 지원 받았으며, 이에 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. A. J. Sunwoo, H. Hayashigatani, J. W. Morris, G. K. Lucey : The effect of pretinning on the solderability of copper, JOM, June, (1991), pp.21-24
2. X. H. Wang, H. Conrad : Effects of Sn content of Pb-Sn solder alloys on wetting

- dynamics, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 31(4), (1994), pp. 375-380
3. M. A. Carroll, M. E. Warwick, M. E. : Surface tension of some Sn-Pb alloy-Part 1: Effect of Bi, Sb, P, Ag, and Cu on 60Sn-40Pb solder, *Materials Science and Technology*, Vol. 3, (1987), pp. 1040-1045
 4. A. E. Schwaneke, W. L. Falke, V. R. Miller : Surface tension and density of liquid tin-lead solder alloys, *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 23(4), (1978), pp. 298-301
 5. D. W. G. White : The surface tensions of Pb, Sn, and Pb-Sn alloys, *Metallurgical Transactions*, Vol. 2(12), (1971), pp. 3067-3071
 6. T. S. Lee, T. P. Choi, C. D. Yoo : Finite element modeling of 3-dimensional solder joint geometry in SMT, *Journal of Electronic Packaging*, ASME, (1997), pp. 119-126
 7. T. S. Lee, T. P. Choi, C. D. Yoo, B. C. Koh : Development of CAD tools for pad and metal mask design in SMT, *Pan Pacific Microelectronics Symposium*, SMTA, (1997), pp. 55-61
 8. 김성관, 최동필, 유중돈 : 3차원 납 접합부 형상을 이용한 표면실장기술의 적정 납량 결정, *대한용접학회지*, Vol. 14(2), (1996), pp. 71-78
 9. R. Darveaux : Optimizing the reliability of thin small outline package solder joints, *EEP-Vol. 10-2, Advances in Electronic Packaging*, ASME, (1995), pp. 675-685
 10. J. H. Lau : Solder joint reliability-theory and applications, *Van Nostrand Reinhold*
 11. 최동필, 유중돈, 이태수 : 유한요소 모델링을 이용한 Gullwing 리드의 3차원 솔더 접합부 형상 예측, Vol. 16(4) (1998)
 12. R. J. Klein Wassink : Wetting of solid-metal surface by molten metals, *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 95, (1967), pp. 38-43
 13. K. W. Moon, W. J. Boettinger, M. E. Williams, D. Josell : Dynamic aspects of wetting balance tests, *Journal of Electronic Packaging*, ASME, Vol. 118, (1996), pp. 174-183
 14. P. T. Vianco, F. M. Hosking, J. A. Rejent : Solderability testing of Kovar with 60Sn-40Pb solder and organic fluxes, *Welding Journal*, Vol. 65(6), (1990), pp. 230s-240s
 15. M. Miyazaki, M. Mizutani, T. Takemoto and A. Matsunawa : Measurement of surface tension with wetting balance, *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, Vol. 15(4), (1997), pp. 681-687
 16. M. Eftychiou, T. L. Bergman, G. Y. Masada : Thermal effects during infrared solder reflow-Part II A model of the reflow process, *Journal of Electronic Packaging*, ASME, Vol. 114(3), (1992), pp. 48-54
 17. H. Takao, N. Yamamoto, H. Hasegawa : Wettability of Cu and Cu-Sn intermetallic compound by Sn-Pb solder alloy, *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, Vol. 15(4), (1997), pp. 623-630
 18. B. J. Lee, N. M. Hwang, H. M. Lee : Prediction of interface reaction products between Cu and various solder alloys by thermodynamic calculation, *Acta Metallurgica*, Vol. 45(5), (1997), pp. 1867-1874
 19. I. A. Aksay, C. E. Hoge, J. A. Pask : Wetting under chemical equilibrium and non-equilibrium conditions, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 78(12), (1974), pp. 1178-1183
 20. J. F. Lancaster : *Metallurgy of welding*, 5th ed., *Chapman & Hall*, (1994)
 21. D. C. Abbott, R. M. Brook, N. McLelland, J. S. Wiley : Palladium as a lead finish for surface mount integrated circuit packages, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 14(3), (1991), pp. 567-572
 22. N. Saunders, A. P. Miodownik : The Cu-Sn system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, Vol. 11(3), (1990), pp. 278-287
 23. N. Eustathopoulos : Energetics of solid/liquid interfaces of metals and alloys, *International Metals Reviews*, Vol. 28(4), (1983), pp. 189-210
 24. K. Sasabe, and O. Ohashi : Interface structure at wetting tip of molten Sn-Pb alloy on pure Cu plate : Part II, *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, Vol. 11(3), (1993), pp. 405-409