

종방향 열초음파 방법을 이용한 솔더링 공정의 모델링

Modeling of Soldering Process using Longitudinal Thermosonic Method

김 정호*, 이 지혜*, 유 중돈*, 최 두선**

* 한국과학기술원, 기계공학과

** 한국기계연구원, 지능형 정밀기계연구부

ABSTRACT The longitudinal thermosonic bonding method is investigated in this work for its application to the soldering process for electronic packaging. The effect of the ultrasonic is analyzed through lumped modeling, and the material properties of a viscoelastic model are measured experimentally. The thermosonic bonding method is verified by inserting the Cu pin and Au bump into solder block. As the solder thickness decreases, temperature of the solder is calculated to increase rapidly because of larger strain. Localized heating due to ultrasonic vibration is observed to melt the solder near the pin, which is adequate to the high density electronic package and Pb-free solder having high melting temperature.

1. 서 론

전자 패키징(electronic packaging)에서 집적 밀도를 증가시키기 위하여 다양한 접합 공정이 개발되고 있으며, 최근 용융점이 높은 무연 솔더(Pb-free solder)의 사용이 의무화 되는 추세이다. 본 연구에서 솔더링에 적용한 열초음파 접합 공정(thermosonic bonding)은 압력과 초음파 진동을 이용한 고상(solid state) 접합 방법으로서^{1,2)}, 와이어 본딩 공정에 적용 되어왔고 최근 솔더링 공정에 적용되고 있으며³⁾, 종방향 초음파를 이용한 Au 범프(bump)의 접합이나 미세 접합에 대한 연구가 시도되었다⁴⁾.

본 연구에서는 종방향 열초음파 방법을 이용하여 칩에 가공된 핀(pin)을 솔더가 채워진 기판의 홈(hole)에 삽입하여 접합부를 형성하는 방법을 제안하였으며, 점탄성 모델링을 통하여 초음파에 의한 발열 효과를 해석하였다. 모델링에 필요한 물성치를 측정하였으며, 기초 실험을 통하여 제안한 점탄성 모델과 열초음파 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 열초음파 접합공정의 모델링

본 연구에서 제안한 종방향 열초음파 접합 방법은 Fig.1에 보인 바와 같이 칩과 기판에 각각 핀과 홈을 가공하고 금속층으로 도금된 홈의 내

부에 솔더를 채운 형태이다. 히터를 이용하여 기판의 온도를 증가시킨 상태에서 핀을 홈에 삽입하고 압력과 초음파 진동을 가하면 초음파 에너지는 핀에 집중되어 핀 주위의 국부적인 가열로 인하여 솔더가 용융되어 접합부를 형성한다.

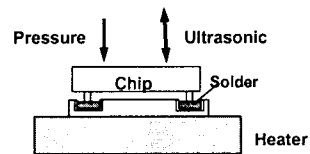


Fig.1 Schematic of longitudinal thermosonic soldering

이와 같은 구조에서 초음파 진동에 의해 솔더부가 가열되는 현상을 해석하여 공정 변수와 온도의 관계를 예측하기 위한 모델링이 필요하다. 초음파 진동에 의한 점탄성 재료의 발열 현상을 해석하기 위하여 Fig.2에 보인 바와 같이 2자유도의 lumped model을 이용하였다. 일정한 주파수로 진동시키면 질량에 가해지는 힘으로부터 응력과 변형율의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma^* A = k\varepsilon^* L + i\omega b\varepsilon^* L \quad (1)$$

이때, σ^* 는 복소 응력, A와 L은 요소별 면적과 길이, k는 스프링 상수, ε^* 는 복소 변형율, ω 는 진동 주파수, b는 감쇠 상수를 나타낸다. 위의 식

으로부터 복소 탄성 계수를 구할 수 있으며, 스프링상수와 감쇠계수는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E' + iE'' = \frac{kL}{A} + i \frac{\omega bL}{A} \quad (2)$$

$$k = \frac{E' A}{L}, b = \frac{E'' A}{\omega L} \quad (3)$$

이때, E'과 E''는 storage modulus와 loss modulus를 나타낸다.

점탄성 모델에서 열은 loss modulus E''에 의해 발생하며, 댐퍼(damper)에서 발생하는 열은 $b\dot{x}^2$ 이므로 i 번째 요소에서 단위 시간에 발생하는 단위 부피당 열량은 다음과 같다.

$$Q_{\text{loss},i} = \frac{1}{TV_i} \int_0^T b_i \dot{x}_i^2 dt = \frac{1}{2} E_i'' \omega \varepsilon_i^2 = \frac{1}{2} E_i'' \omega \left(\frac{x_i}{L_i} \right)^2 \quad (4)$$

이때, T는 사인파의 주기이다. 식(4)로부터 점탄성 효과에 의한 발열량은 초음파 주파수 ω 와 E''에 비례하며 변형을 ε 의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다. E''은 재료에 의해 결정되는 물성치이며, 주파수와 온도 등에 의해 많은 영향을 받기 때문에 실험을 통하여 구한다.

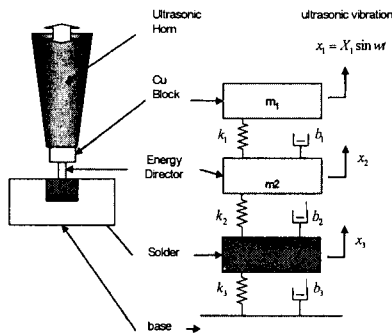


Fig.2 Schematic of lumped model

솔더에 대한 초음파 주파수 영역에서의 점탄성 물성을 측정하기 위하여 DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) 장비를 이용하지만, 장비의 특성상 점탄성 특성의 측정 영역은 최대 1kHz 수백 Hz로 제한되기 때문에 20kHz 이상인 초음파 영역에서의 측정은 불가능하다. 그러므로 "thermorheologically simple"한 점탄성 거동의 특성과 temperature-frequency equivalence

principle을 이용하여 초음파 영역의 점탄성 물성치를 예측한다⁶⁾.

확장된 주파수에 대한 storage modulus 또는 loss modulus의 그래프를 이용하여 다수의 Maxwell element들의 조합인 Prony series로 솔더의 점탄성 거동을 표현할 수 있다.

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad (5)$$

$$E'(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^m \frac{\omega^2 \tau_i^2 E_i}{\omega^2 \tau_i^2 + 1} \quad (6)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^m \frac{\omega \tau_i E_i}{\omega^2 \tau_i^2 + 1} \quad (7)$$

이때, $\tau_i = k_i / \eta_i$ 로써 i번째 Maxwell element의 relaxation time을 나타낸다. Prony series fitting 과정을 거쳐 주파수에 대한 modulus와 loss factor (tan δ)를 구할 수 있으며, 점탄성 효과에 의한 온도상승을 예측하기 위한 모델링의 물성치로 사용된다.

3. 열초음파 접합공정의 기초실험

초음파 접합공정의 타당성을 검증하기 위하여 63%Sn-37%Pb 조성의 솔더를 이용한 기초 실험을 수행하였다. 기초 실험은 28kHz 초음파를 이용하여 (1) 솔더 블록(solder block)에 energy director 형태의 핀이 가공된 Cu 시편을 삽입하는 실험을 통하여 접합부에서의 온도상승을 측정하였으며, (2) Au 범프가 형성된 실리콘 기판을 이용하였다. 솔더 블록을 이용한 실험의 경우, Cu 핀의 두께는 0.5-2.0mm이며, 초음파를 가하여 핀을 솔더 블록에 삽입하였다. 실리콘 기판을 이용한 실험은 실리콘 웨이퍼 표면에 높이 20 μ m, 폭 40 μ m의 Au 범프가 형성된 시편에 초음파를 가하여 솔더 블록에 삽입하였다.

K형 thermocouple을 이용하여 접합부 근방의 온도 변화를 측정하였으며, eddy current 변위센서를 이용하여 혼(horn)의 변위를 측정하였다. 상온에서 160°C까지 온도에 대하여 실험을 수행하였으며 접합부를 절단하여 접합부의 조직과 성분을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 해석 결과

Thermal Analysis사의 DMA-2980장비를 사용하여 온도 -60~100°C, 주파수 0.1~100Hz의 범위에서 솔더의 점탄성 거동을 측정된 결과를 주파수에 대해 평행 이동시켜 확장된 주파수 영역에서의 storage modulus를 Fig.3에 나타내었으며, thermorheologically simple한 솔더의 점탄성 특성을 확인하였다.

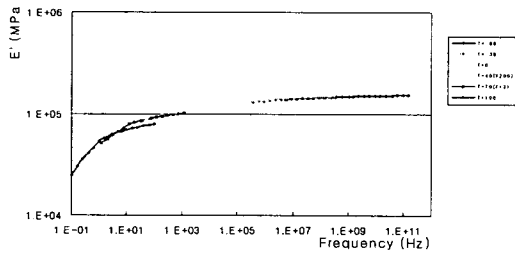


Fig.3 Viscoelastic behavior of eutectic solder in frequency domain after frequency-shifting

유사한 방법으로 loss modulus에 대한 주파수 특성을 구하고, Prony series 모델링을 통하여 구한 loss factor (tanδ)를 Fig.4에 나타내었다. 초음파 영역인 28kHz에서 loss factor는 대략 1.7×10^{-2} 이며, 이와 같은 값은 점탄성 효과가 우수한 종류의 플라스틱 재료의 loss modulus 값인 1에 비해 매우 작지만, 일반 금속의 값인 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 에 비해 매우 크다. 그러므로 솔더의 경우에는 점탄성에 의한 발열이 접합에 영향을 미친다.

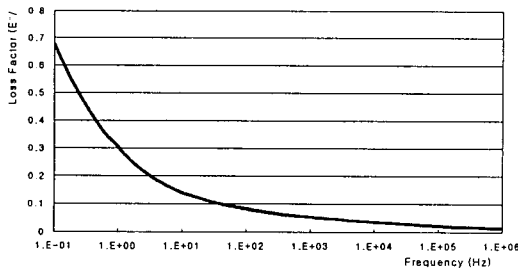


Fig.4 Loss factor of eutectic solder.

솔더의 물성치를 이용하여 핀의 크기 및 초음파 주파수가 솔더의 온도에 미치는 영향을 계산한 결과를 Fig.5에 나타내었다. 초음파 진폭이 일정한 조건에서 핀의 크기가 감소하거나 초음파 주파수가 증가하면 발열량이 증가한다. 솔더의 폭과 두께가 감소할수록 솔더의 변형율이 증가하며, 솔더의 온도가 핀의 온도에 비하여 크게 증

가한다. 계산 결과로부터 솔더의 두께가 발열에 가장 큰 영향을 주며 이는 식(4)에서 나타난 바와 같이 발열량이 변형율의 제곱에 비례하기 때문이다. 이와 같은 특성은 플립칩(flip-chip)과 같이 솔더부의 크기가 작은 경우에 열초음파 접합 방법이 적합할 것으로 판단된다. 그러나 솔더의 두께가 감소하는 경우에는 소성 영역의 변형율이 발생하므로 Fig.5(d)와 같이 높은 온도가 발생하지는 못할 것으로 예상된다. Thermocouple을 이용하여 측정된 온도 증가는 평균 30°C 정도이며, 이는 계산 결과와 10°C의 오차 범위에서 일치하였다.

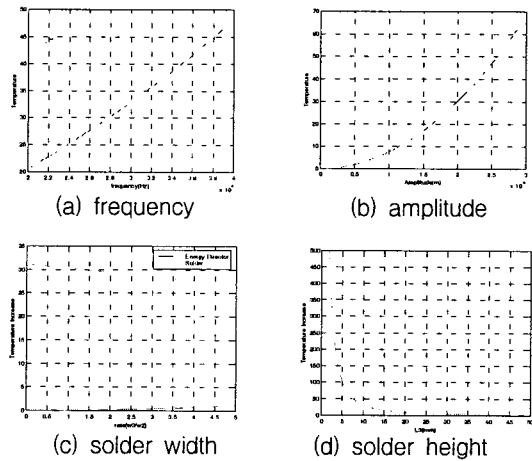


Fig.5 Effect of process parameter on temperature

4.2 기초 실험 결과

솔더 블록을 150°C로 예열한 경우, 접합부 단면을 Fig.6에 나타내었다. 단면의 금속 조직의 변화로부터 핀과 솔더의 경계면에 두께 50μm 정도의 용융부가 발생하는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 Cu 핀과 솔더 사이의 계면에서 Cu₆Sn₅와 같은 금속간 화합물이 발생하지 않았다. 열초음파 접합에서 금속간 화합물이 발생하지 않는 이유로서, 접합이 3초 이내의 짧은 시간에 접합되기 때문에 확산이 발생하지 못하거나, 28kHz의 빠른 초음파 진동으로 인하여 계면에서 계면에서 발생하는 빠른 유동이 금속간 화합물의 발생을 방해하는 것으로 추정된다. 향후 이에 대한 추가의 분석이 필요한 것으로 판단된다.

높이 20μm인 Au범프가 형성된 실리콘 기판을 이용한 실험 결과를 Fig.9에 나타내었으며, 솔더 블록과 실리콘 기판의 온도를 160°C로 예열한 상태에서 종방향 초음파를 가하였다. Fig.7의 접합부 단면에서 Au범프 주위에 열이 집중되어 솔

더가 국부적으로 용융되는 현상을 확인하였다. 향후 기초 실험 결과를 바탕으로 마이크로 핀과 홈을 이용한 실험을 수행할 예정이다.

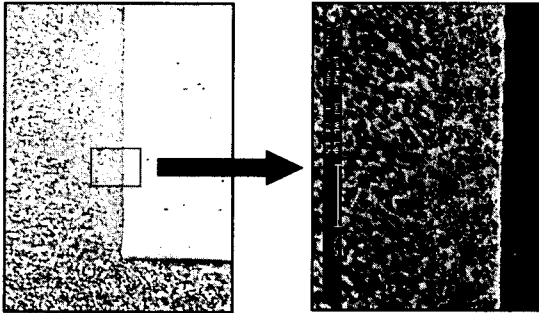


Fig.6 Cross-section of solder joint using Cu pin

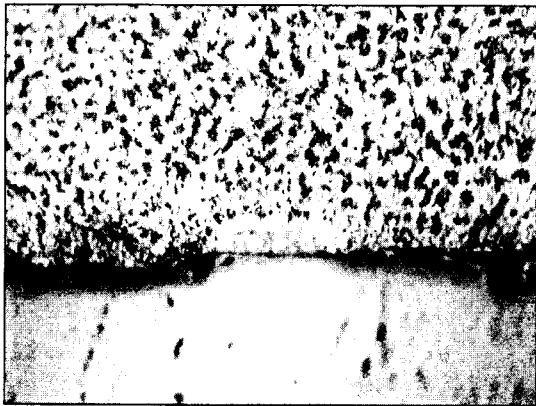


Fig.7 Experimental results using Au bumped wafer

5. 결 론

열초음파 접합에 대하여 점탄성 모델링을 수행하고 해석에 필요한 물성치를 측정하였으며, 기초 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 모델링을 통한 해석 결과로부터 솔더의 발열은 주파수, 솔더의 크기 및 loss factor에 영향을 받으며, 특히 솔더의 두께가 감소함에 따라 변형율이 증가하여 솔더의 온도가 크게 증가하였다. DMA 실험을 통하여 측정한 솔더의 loss factor는 플라스틱에 비해 작지만 일반 금속에 비해 매우 크기 때문에 솔더의 점탄성 효과가 발열에 상당한 영향을 준다. 기초 실험을 통하여 점탄성에 의한 발열로 솔더가 국부적으로 용융되는 현상을 확인하였으며, 접합 계면에서 금속간 화합물이 발생하지 않았다. 이와 같은 결과로부터 종방향 열초음파 접합 방법을 전자 패키징을 위한 솔더링에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원이 주관하는 차세대 신기술 개발 사업 중 고기능 초미세 광열유체 마이크로 부품 기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. B. Jones, J. J. Powers, "Ultrasonic welding", *Welding Journal*, Vol. 35, No. 8, pp.761-766, 1956.
2. E. Sancaktar, "Polymer adhesion by ultrasonic welding", *Journal of adhesion science and technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 179-201, 1999.
3. S. M. Hong, C. S. Kang, J. P. Jung, "Fluxless thermosonic bonding of Sn-3.5Ag solder bump flip chip", *J. of Korea Inst. Met. & Mater.*, Vol.40(6), pp.700-705, 2002.
4. Q. Tan, "Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration", *IEEE Trans. on components, packaging and manufacturing tech.*, Vol.21(1), pp.53-58, 1998.
5. R. S. Lakes, *Viscoelastic solids*, CRC Press, 1999.