

연구논문

종방향 초음파를 이용한 솔더링 공정의 모델링

김정호* · 이지혜* · 유중돈* · 최두선**

*한국과학기술원 기계공학과

**한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부

Modeling of Soldering Process using Longitudinal Ultrasonic

Jung H. Kim*, Jihye Lee*, Choong D. Yoo* and Doo S. Choi**

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

**Div. of Intelligent Precision Machine, KIMM, Daejon 305-343, Korea

Abstract

An efficient soldering process using the longitudinal ultrasonic vibration is introduced in this work for electronic packaging. The effects of the process parameters such as the ultrasonic frequency, amplitude, dimension of the metal bump and solder are analyzed through a viscoelastic lumped model. The viscoelastic properties of the eutectic solder were measured for calculation and evaluation of heat generation capability of the solder. Experiments were conducted to verify the possibility of the proposed ultrasonic soldering method by inserting the Cu and Au bumps into the solder block. Localized heating due to ultrasonic vibration melts the solder near the metal bump, which demonstrates the applicability of the ultrasonic soldering method to the high-density electronic packaging.

* Corresponding author : cdyoo@kaist.ac.kr

(Received April 28, 2003)

Key Words : Ultrasonic soldering process, Longitudinal vibration, Viscoelastic lumped model, Localized heating, Electronic packaging

1. 서 론

솔더링(soldering) 공정은 칩(chip)과 기판(substrate) 간의 접합부를 형성하는 전자 패키징(electronic packaging)에 주로 사용되고 있다. 최근 칩의 입출력 단자수가 증가하고 용융 온도가 높은 무연 솔더(Pb-free solder)의 사용이 의무화 되는 추세이므로 이를 만족시킬 수 있는 솔더 재료에 대한 연구와 함께 새로운 솔더링 공정에 관한 연구가 요구된다. 본 연구를 통하여 종방향 초음파 진동(longitudinal ultrasonic vibration)을 이용한 솔더링 공정에 대한 모델링과 기초적인 실험을 수행하여 초음파 솔더링 공정의 타당성을 검증하였다.

초음파 접합공정은 압력과 초음파 진동을 이용한 접

합 방법으로 전동 방향에 따라 금속의 접합 또는 플라스틱 용접에 사용된다. 횡방향(transverse direction) 초음파 진동은 주로 와이어 본딩(wire bonding)과 같은 금속의 접합에 사용되며, 초음파는 접합면의 산화막과 불순물을 제거하고 재료를 연화시켜 금속간 접촉에 의한 고상 접합부를 형성하는 역할을 한다¹⁾. 종방향(longitudinal direction) 초음파 진동은 주로 열가소성 플라스틱(thermoplastic)의 용접에 사용되며, 플라스틱의 점탄성에 의해 열이 발생하여 용접부를 형성한다^{2,3)}. 최근 횡방향 초음파를 이용한 솔더링 공정과 종방향 초음파를 이용한 Au 범프(bump)의 접합에 대한 연구가 시도되었다^{4,5)}. 열초음파 접합(thermosonic bonding)은 초음파를 열과 함께 인가하여 접합부를 형성하는 공정으로서 주로 와이어 본딩 공정에 사용되고 초음파 접합에 비해 생산성이 증가하는 장점이 있다.

본 연구를 통하여 종방향 초음파를 이용한 효율적인 솔더링 공정을 제안하였으며, 이에 관한 기초 실험을 통하여 공정의 타당성을 검증하였다. 초음파에 의한 솔더의 발열 현상을 점탄성 모델을 통하여 해석하였으며, 공정 솔더(eutectic solder)의 점탄성 특성을 측정하여 초음파 솔더링 공정의 타당성을 검증하였다. 또한, Cu와 Au 범프를 이용한 실험을 통하여 초음파에 의해 금속 범프 주위의 솔더가 국부적으로 용융되는 현상을 관찰하였다.

2. 초음파 솔더링 공정의 점탄성 모델링

본 연구에서 제안한 초음파 솔더링 공정은 Fig. 1에 보인 바와 같이 압력과 종방향 초음파를 가하여 칩에 형성된 금속 범프를 솔더가 채워진 기판의 홈에 삽입하는 공정이다. 기판 아래에 설치된 히터(heater)로 기판을 가열하여 솔더의 온도를 증가시킨 상태에서 압력과 초음파 진동을 가하면, 솔더의 점탄성 발열에 의해 금속 범프 주위의 솔더가 국부적으로 용융되어 접합부를 형성한다. 이때 초음파 에너지는 금속 범프에 집중되기 때문에 금속 범프는 초음파 플라스틱 용접의 energy director와 동일한 역할을 한다³⁾.

종방향 초음파 진동에 의해 솔더부에서 열이 발생하는 현상을 해석하고 공정 변수와 발열량의 관계를 예측하기 위하여 점탄성 모델링을 수행하였다. 초음파 진동에 의한 점탄성 재료의 발열 현상을 해석하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 lumped 모델을 이용하였다. 일정한 주파수로 질량을 진동시키면 힘의 평형으로부터 응력과 변형율의 관계는 다음과 같다.

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

이때, σ^* 와 ε^* 는 복소 응력과 복소 변형율, A와 L은 질량의 면적과 길이, k는 스프링 상수, b는 댐퍼(damper)의 감쇠 상수, ω 는 진동 주파수를 나타낸다. 위의 식으로부터 복소 탄성 계수를 구하면 스프링 상수와 감쇠 계수는 다음과 같다.

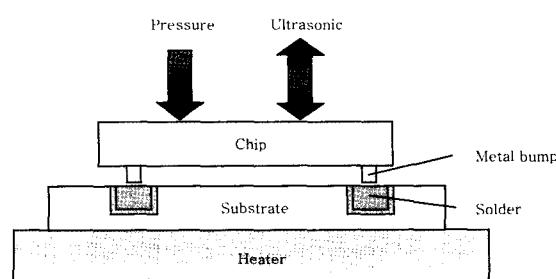


Fig. 1 Schematic of longitudinal ultrasonic soldering

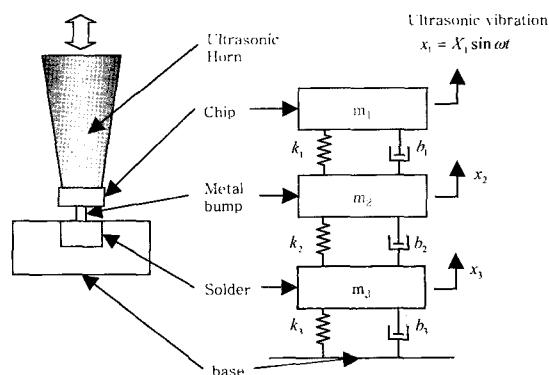


Fig. 2 Schematic of viscoelastic lumped model

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E' + jE'' = \frac{kL}{A} + j \frac{\omega b L}{A} \quad (2)$$

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

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

초음파 진동에 의한 단위 부피당 솔더의 발열량은 다음과 같다.

$$Q = \frac{1}{TV} \int_T b \dot{x}^2 dt = \frac{1}{2} E'' \omega \left(\frac{x}{L} \right)^2 = \frac{1}{2} E'' \omega \varepsilon^2 \quad (4)$$

이때, T는 사인파의 주기이며, V는 솔더의 체적을 나타낸다. 위의 식으로부터 솔더의 발열량은 초음파 주파수와 loss modulus에 선형적으로 비례하고 변형율의 제곱에 비례한다.

솔더의 점탄성 물성치는 온도와 주파수에 따라 변화한다. 초음파 영역의 점탄성 물성치를 구하기 위하여 "thermorheologically simple"한 점탄성 거동의 특성과 temperature-frequency equivalence principle을 이용하며^{6,7)}, 일정 온도 범위에서 측정한 거동 특성을 평행 이동시켜 확장된 주파수 영역에서의 점탄성 특성을 간접적으로 구한다. 솔더의 점탄성 거동을 표현하기 위하여 Fig. 3에 보인 바와 같이 다수의 Maxwell

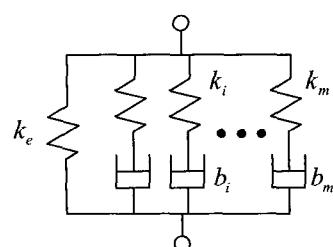


Fig. 3 Generalized Maxwell element

element들의 조합인 generalized Maxwell model (Prony series)을 사용하였으며, 다음의 식과 같다.

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

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

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

이때, τ_i 는 i번째 Maxwell element의 relaxation time을 나타내고($\tau_i = k_i / \eta_i$), m은 Maxwell element의 개수를 나타낸다. 주파수에 대한 솔더의 점탄성 물성치 결과로부터 Fig. 3에 보인 Maxwell element의 k_i 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_1^2 \tau_1^2}{\omega_1^2 \tau_1^2 + 1} & \frac{\omega_1^2 \tau_2^2}{\omega_1^2 \tau_2^2 + 1} & \dots & \frac{\omega_1^2 \tau_m^2}{\omega_1^2 \tau_m^2 + 1} \\ \frac{\omega_2^2 \tau_1^2}{\omega_2^2 \tau_1^2 + 1} & \frac{\omega_2^2 \tau_2^2}{\omega_2^2 \tau_2^2 + 1} & \dots & \frac{\omega_2^2 \tau_m^2}{\omega_2^2 \tau_m^2 + 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\omega_m^2 \tau_1^2}{\omega_m^2 \tau_1^2 + 1} & \frac{\omega_m^2 \tau_2^2}{\omega_m^2 \tau_2^2 + 1} & \dots & \frac{\omega_m^2 \tau_m^2}{\omega_m^2 \tau_m^2 + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'(\omega_1) - k_e \\ E'(\omega_2) - k_e \\ \vdots \\ E'(\omega_m) - k_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

Prony series fitting 과정을 통해 점탄성 모델의 물성치로 사용되는 storage modulus와 loss modulus 및 loss factor ($\tan \delta = E' / E''$)를 주파수에 대한 함수 형태로 구한다.

3. 초음파 솔더링 공정의 실험

초음파 솔더링 공정의 실험과 관련하여, (1) 해석에 필요한 솔더의 점탄성 물성치를 구하는 실험과 (2) 초음파 솔더링 공정의 타당성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 주파수와 온도에 따라 변화하는 솔더의 점탄성 물성치를 측정하기 위하여 Thermal Analysis사의 DMA-2980장비를 사용하였다. DMA(Dynamic Mechanical Analyzer)의 측정 범위가 수백 Hz로 제한되기 때문에 20kHz 이상인 초음파 영역에서 솔더의 점탄성 물성치를 구하기 위해 thermorheologically simple한 점탄성 거동의 특성과 temperature-frequency equivalence principle을 적용하였다. 본 연구에서는 온도 -60~100°C, 주파수 0.1~100Hz의 범위에서 솔더의 점탄성 거동을 측정하였으며, 일정 온도 범위에서 측정한 거동 특성을 평행 이동시켜 주파수 영역을 확장함으로써 초음파 영역에서 솔더의 점탄성 특성을 구하였다.

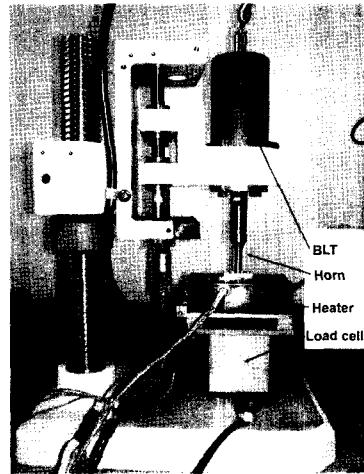


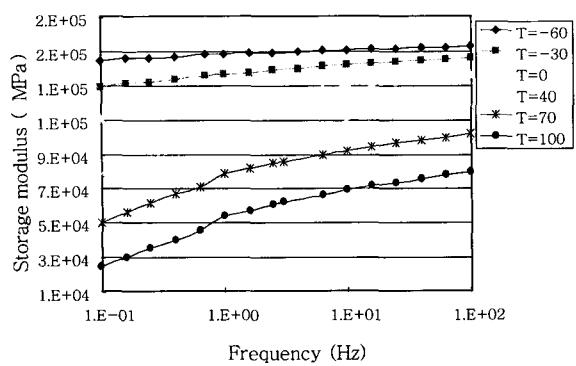
Fig. 4 Ultrasonic soldering system

초음파 솔더링 공정의 타당성을 검증하기 위하여 Cu와 Au 범프를 63wt%Sn-37wt%Pb 조성의 솔더 블록에 삽입하는 실험을 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 4에 보인 바와 같이 초음파 용접기와 시편을 고정시키기 위한 치공구 및 솔더 블록의 예열을 위한 전기 히터로 구성하였으며, 실험에 사용한 초음파 용접기의 주파수는 28kHz와 40kHz이다. Cu 범프의 경우, K형 열전대(thermocouple)를 이용하여 접합부 근처의 온도를 측정하였으며, load cell을 이용하여 압력을 측정하였다. Cu 범프는 폭 0.5mm와 높이 2mm인 핀(pin) 형상으로 기계 가공하였으며, 솔더 블록을 예열한 상태에서 Cu 시편의 상부에 1.5kgf/cm²의 압력과 28kHz의 초음파를 가하여 Cu 범프를 솔더 블록에 삽입하였다. 실리콘 기판에 형성된 Au 범프의 높이는 20μm이며, 솔더 블록을 예열한 상태에서 40kHz의 초음파를 가하여 Au 범프를 솔더 블록에 삽입하였다. 솔더 블록의 예열 온도는 150°C이며, 접합 후에 시편을 절단하여 접합부의 조직을 관찰하였다.

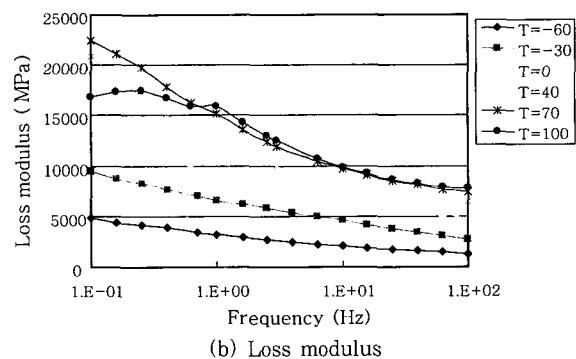
4. 결과 및 고찰

4.1 해석 결과

DMA장비를 사용하여 측정한 솔더의 점탄성 물성치인 storage modulus와 loss modulus를 Fig. 5에 나타내었다. 측정한 Fig. 5의 modulus를 주파수에 대해 평행 이동시킨 modulus와 loss factor를 Fig. 6에 나타내었으며, 확장된 주파수 영역에서 thermorheologically simple한 솔더의 점탄성 특성을 확인할 수 있다. 초음파 영역인 28kHz에서 식(6)~(8)의 Prony series를 이용하여 계산한 솔더의 loss factor는 대략 1.7X10⁻²이며, 이는 점탄성 효과가 우수한 플라스틱 재료의 loss



(a) Storage modulus

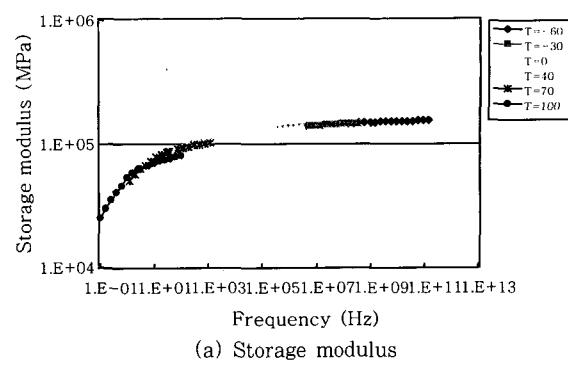


(b) Loss modulus

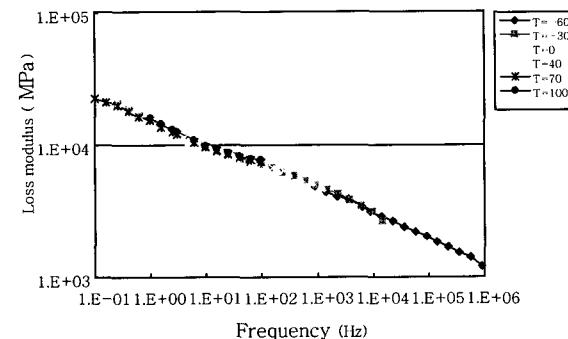
Fig. 5 Storage modulus and loss modulus of eutectic solder measured at different temperatures

factor 값인 1에 비해 작지만, 일반 금속의 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 에 비해 상당히 크다⁶⁾. 측정된 loss factor 값으로부터 솔더의 점탄성에 의해 솔더의 온도를 상당히 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

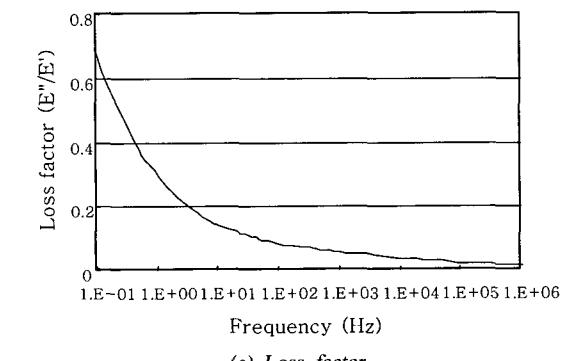
초음파 주파수와 진폭, Cu 범프와 솔더의 크기가 솔더의 온도 증가에 미치는 영향을 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 계산에 사용된 주파수 28kHz에서 솔더와 Cu의 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 초음파의 주파수와 진폭이 증가하면 발열량이 증가한다. 식(4)로부터 발열량은 주파수에 선형적으로 비례하며, 진폭은 변형율과 연관이 있기 때문에 진폭이 증가하면 변형율의 자승에 비례하여 발열량이 증가한다. 그러나 초음파 용접기의 주파수와 진폭은 고정된 값으로 사용하기 때문에 임의로 변경할 수 없기 때문에 공정 변수로 사용하기 곤란하다. Cu 범프의 형상이 솔더의 온도에 미치는 영향은 Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 Cu 범프의 높이는 솔더의 온도 증가에 큰 영향을 주지 못한다. Fig. 7(d)는 솔더의 두께가 온도 상승에 주는 영향을 나타내며, 솔더의 두께가 감소할수록 솔더의 변형율이 증가하여 솔더의 발열이 크게 증가한다. 이는 식(4)에서 나타난 바와 같이 발열량이 변형율의 제곱에 비례하기 때문이며,



(a) Storage modulus



(b) Loss modulus



(c) Loss factor

Fig. 6 Viscoelastic behavior of eutectic solder in extended frequency domain

Table.1 Material properties for calculation

	Cu	Solder(63Sn-37Pb)
Storage modulus, E'	125GPa	35GPa
Loss factor, tan δ	0.002	0.017
Density	8910 kg/m ³	8770 kg/m ³
Specific heat	386 J/kg · K	226 J/kg · K

이와 같은 특성은 솔더부의 크기가 작은 경우에 발열 효과가 증가하므로 칩의 접적 밀도가 높은 경우에 유리할 것으로 판단된다. 금속 범프와 솔더의 폭은 두께에 비해 발열에 큰 영향을 주지 못한다.

솔더의 점탄성 물성치 측정 결과와 점탄성 모델을 이용한 해석 결과로부터 종방향 초음파를 이용한 솔더링

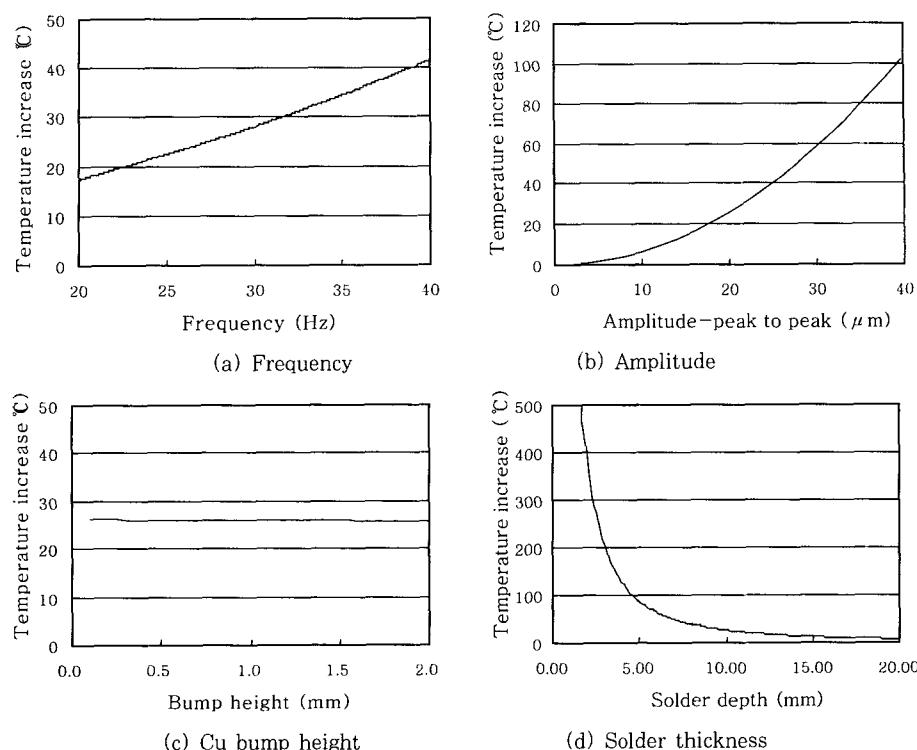


Fig. 7 Effects of process parameters on temperature increase of solder

공정의 타당성을 입증하였다. 그러나 솔더의 두께가 감소하여 변형율이 증가하면 점소성 영역의 거동이 발생하기 때문에 점탄성에 의한 발열과 차이가 있을 것으로 예상된다. 그러므로 정확한 해석을 위하여 점소성 해석과 금속 범프와 솔더 계면의 마찰에 의한 발열 등을 고려한 추가의 연구가 필요할 것으로 생각한다.

4.2 실험 결과

종방향 초음파를 이용한 솔더링 공정의 타당성을 검증하기 위하여 Cu와 Au 범프를 솔더 블록에 삽입하는 실험을 수행하고 단면을 관찰하였다. Cu범프와 솔더 블록을 이용한 초음파 접합부의 단면을 Fig. 8에 나타내었으며, 실험 조건으로 사용한 예열온도는 150°C이고 초음파 주파수는 28kHz이다. 계면에서 솔더가 국

부적으로 용융되었으며, 용융층의 두께는 대략 50μm이다. 열전대로 측정한 솔더의 온도 증가는 30°C이며, 계산 결과인 25.7°C 와 비교적 정확하게 일치하였다. EDS를 이용하여 계면의 성분을 조사한 결과, Cu₆Sn₅와 같은 금속간 화합물이 계면에서 거의 발생하지 않았으며, 이는 예열 온도가 150°C로 낮고 접합이 5초 이내의 짧은 시간에 완료되기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 초음파에 의한 계면의 유동도 금속간 화합물의 성장에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며, 향후 금속 조직에 대한 추가의 연구가 필요하다.

실리콘 기판에 형성된 높이 20μm인 Au 범프와 솔더 블록의 접합부 단면 형상을 Fig. 9에 나타내었으며, 예열 온도는 160°C이고 초음파 주파수는 40kHz이다. Cu 범프를 사용한 Fig. 8의 결과와 유사하게 Au 범프

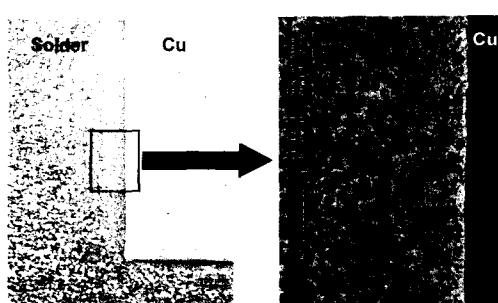


Fig. 8 Cross-section of solder joint with Cu bump

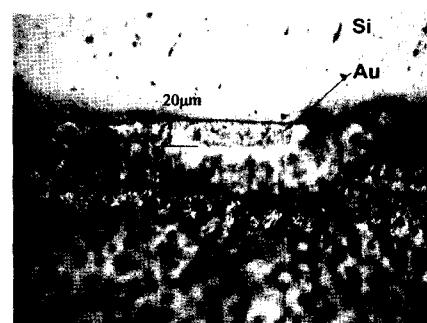


Fig. 9 Cross-section of solder joint with Au bump

주위의 솔더가 국부적으로 용융되는 현상을 확인하였다. 미세한 Au 범프를 사용하여도 종방향 초음파에 의해 국부적인 용융부가 발생하기 때문에 집적 밀도가 높은 전자 패키징에 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구를 통하여 종방향 초음파를 이용한 솔더링 방법의 타당성을 검증하였으며, 향후 체계적인 해석과 실험을 통한 금속 조직, 접합 강도, 최적 접합 조건 등에 대한 추가의 연구가 요구된다.

5. 결 론

종방향 초음파를 이용한 솔더링 공정에 대한 점탄성 모델링을 수행하고 해석에 필요한 솔더의 물성치를 측정하였으며, 기초 실험을 통하여 제안한 공정의 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 모델링을 통한 해석 결과로부터 솔더의 발열은 초음파의 주파수와 진폭, 솔더의 물성치와 형상에 영향을 받으며, 특히 솔더의 두께가 감소하면 변형율이 증가하여 솔더의 온도가 크게 증가하였다.

2) DMA를 이용하여 측정한 솔더의 loss factor는 1.7×10^{-2} 으로 플라스틱에 비해 작지만 일반 금속에 비해 매우 크기 때문에 솔더의 점탄성 특성이 발열에 상당한 영향을 미친다.

3) Cu 범프를 솔더 블록에 삽입하는 실험을 수행하였으며, 솔더의 점탄성에 의한 발열로 인하여 Cu 범프 주위의 솔더가 국부적으로 용융하는 현상을 관찰하였으며, 낮은 온도와 짧은 접합 시간으로 인하여 계면에서 금속간 화합물이 거의 발생하지 않았다.

4) 길이 $20\mu\text{m}$ 인 Au 범프와 솔더 블록을 이용한 실험에도 점탄성에 의한 발열로 솔더가 국부적으로 용융되며, 집적 밀도가 높은 전자 패키징에 종방향 초음파 솔더링 방법을 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.

참 고 문 헌

1. J. B. Jones, J. J. Powers, "Ultrasonic welding", Welding Journal, Vol. 35(8), 761-766, 1956
2. E. Sancaktar, "Polymer adhesion by ultrasonic welding", Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 13(2), 179-201, 1999
3. A. Benatar, V. E. Raman, K. N. Satiner, "Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field", Polymer Engineering and Science, Vol.29(23), 1689-1697, 1989
4. 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), 700-705, 2002
5. Q. Tan, "Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Tech., Vol.21(1), 53-58, 1998
6. R. S. Lakes, Viscoelastic Solids, CRC Press, 1999.
7. R. M. Christensen, Theory of Viscoelasticity, Academic Press, 1982