

미세 부품의 초음파 접합공정 개발

김정호* · 이지혜* · 유중돈* · 최두선**

Development of Ultrasonic Bonding Process for Micro Components

J. H. Kim, J. H. Lee, C. D. Yoo and D. S. Choi

Abstract

The ultrasonic bonding method and its feasibility are investigated in this work for joining the micro components and MEMS packaging. The ultrasonic bonding process is analyzed using a lumped mode, and preliminary experiments using the eutectic solder and copper pin were carried out to verify possibility to MEMS packaging. The ultrasonic bonding process appears to be adequate for MEMS packaging by providing localized heating at the selected area. Microscopic behavior of the bond joint through ultrasonic vibration needs further investigation.

Key Words : Ultrasonic Bonding, MEMS Packaging, Localized Heating

1. 서 론

MEMS의 접합을 위하여 다양한 공정이 개발되었으며, 기존의 MEMS 접합 방법으로 anodic bonding, wafer bonding, 솔더링과 브레이징, 접착제를 사용하는 adhesive bonding 공정 등을 들 수 있다. Anodic bonding 공정은 주로 유리와 금속을 접합하는 방법으로 널리 사용되고 있으며, 접합부의 양단에 높은 전압을 가해야 하므로 전자 회로가 있는 경우에는 사용하기 곤란하다. Wafer bonding은 실리콘 wafer 사이에 직접 화학적인 접합부를 형성하기 때문에 접합강도가 높고 열팽창 계수의 차이에

의한 열응력이 발생하지 않지만, 접합에 높은 온도가 요구되므로 사용 용도가 제한된다.^(1,2) 솔더링과 브레이징 공정은 이종재료의 접합에 널리 사용되고 있으며, 접합 시 부품 전체를 가열하여야 한다. 접착제를 사용하는 방법은 서온에서 이종재료를 효과적으로 접합할 수 있지만, 신뢰성이 떨어지고 완전 밀봉(hermetic sealing)이 불가능하다.

MEMS 에서 사용되는 접합공정은 장단점이 있기 때문에 모든 경우에 적용할 수 있는 공정이 개발되지 못한 상태이므로 재료와 접합 온도 등을 고려하여 공정을 선택하여야 한다.

* KAIST 기계공학과
** KIMM 사능형 정밀기계연구부

MEMS 재료는 주로 Si와 polymer이기 때문에 다양한 MEMS 접합공정 중에서 기존의 연구를 바탕으로 이들 재료를 접합하기 위한 공정을 선정하여 사용하거나 개발하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 MEMS 구조물에 변형과 잔류 응력을 감소시키며, 접합부의 온도를 증가시킬 수 있는 공정의 개발을 연구 목적으로 정하였으며, 이와 유사한 기존의 공정으로 micro heater⁽³⁾를 사용하는 공정을 들 수 있다. Micro heater를 사용하는 공정은 국부적인 부위에 열을 집중시켜 접합부를 형성하기 때문에 접합시 발생할 수 있는 열변형과 잔류응력을 최소화시킬 수 있다. 그러나 micro heater의 제작에 복잡한 반도체 가공이 사용되고, 접합 시간이 5분 정도 소요된다.

본 연구에서는 MEMS의 접합공정으로 초음파 접합공정을 선정하여 적용 가능성에 대하여 기초 연구를 수행하였다. 초음파 접합공정의 우선 적용하는 분야로서 MEMS packaging을 결정하였으며, 이는 packaging 공정이 MEMS 제조 원가의 70% 정도를 차지하기 때문이다. 본 연구에서 초음파 접합공정의 발열 현상에 관한 모델링을 수행하였다. 기초 실험을 수행하여 초음파 접합공정이 MEMS packaging 공정에 적용 가능성이 있음을 보였다.

2. MEMS의 초음파 접합공정

2.1 초음파 접합공정의 모델링

초음파 접합은 압력과 초음파 진동을 이용하여 재료를 접합하는 방법으로서, 초음파 진동 방향에 따라 종방향(longitudinal direction)인 경우에는 주로 polymer 접합에 사용된다. 압력과 직각을 이루는 횡방향(lateral direction)인 경우에는 주로 금속 접합에 사용되며, 종방향 초음파를 이용하여 금속을 접합하는 경우는 거의 없지만, 이를 flip-chip 솔더링에 적용한 사례가 있다.⁽⁴⁾ 종방향 진동을 이용한 plastic 접합공정에서는 돌출부 형상의 energy director를 가공하여 초음파 에너지가 energy director에 집중되도록 설계한다.

본 연구에서는 종방향 진동을 사용하였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 접합하고자 하는 부위에 미세한 핀(micro pin)과 홈(micro hole)을 가공하여 접합하는 방법을 제안하였다. 홈의 표면은 금속층으로 도금하고, 금속층 내부에 솔더와 같은 접합재를 형성한다. Pin을 홈에 삽입하고 초음파를 진동을 가하여 솔더 사이에 접합부를 형성한다. Pin은 초음파 접합에서 energy director와 동

일한 역할을 하며, 초음파 에너지는 pin에 집중되어 pin과 솔더부 사이에 국부적인 가열이 가능하도록 하였다

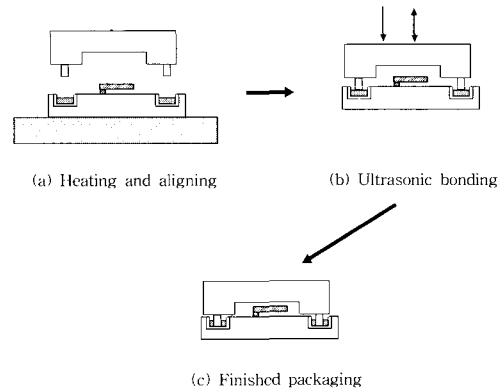


Fig. 1 Sequence of ultrasonic MEMS packaging

이와 같은 구조에서 초음파 진동에 의해 솔더부가 가열되는 현상을 해석하여 공정 변수와 온도의 관계를 예측하기 위한 모델링이 필요하다. 초음파 진동에 의한 발열 현상을 해석하기 위하여 점탄성 효과를 고려한 Voigt 모델을 적용하였으며, Fig. 2에 보인 바와 같이 2자유도의 lumped model을 이용하였다. 넓이가 A, 길이가 L인 고체를 주파수 ω 인 sine 함수 형태로 진동시키면, 스프링 상수 k와 감쇠 계수 b는 복소 탄성 계수로 표현할 수 있으며, 복소 응력 σ^* 와 복소 변형률 ϵ^* 의 관계식은 다음과 같다.

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

식(1)로부터 복소 탄성 계수는 다음과 같다.

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

식(2)로부터 스프링상수와 감쇠계수는 각 요소에 대하여 다음과 같다.

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

댐퍼로부터의 열발산 에너지는 $b\dot{x}$ 이므로 i 번째 요소에서 단위 시간 및 단위 부피당 발산되는 열량은 다음과 같다.

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

이때, T 는 입력 사인파의 주기이다. 식(4)로부터 점탄성 효과에 의한 발열량은 초음파 주파수 ω 및 E' (loss modulus of elasticity)에 비례하며 변형률 ε' 의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제안한 단순한 model로 pin과 솔더의 온도를 정확하게 예측하기 곤란하지만, pin과 hole의 크기가 발열에 미치는 영향을 예측할 수 있고 접합 방법의 타당성을 입증할 수 있다.

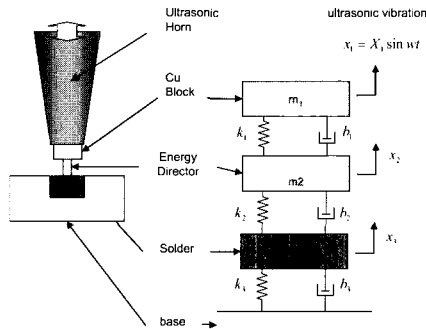


Fig. 2 Schematics of lumped model

2.2 초음파 접합공정의 기초실험

초음파 접합공정의 타당성을 검증하기 위하여 Cu 재료의 pin과 63%Sn 37%Pb 조성인 eutectic 솔더를 이용한 기초 실험을 수행하였으며, 실험 장치의 개략도를 Fig.3에 나타내었다. 기초 실험은 (1) 솔더 블록(solder block)에 energy director 형태의 pin이 가공된 Cu 시편을 삽입하는 실험과, (2) IC chip 삽입용 socket을 이용한 실험을 통하여 초음파 접합공정의 타당성을 검증하였다. 솔더 블록을 이용한 실험의 경우, Cu pin의 두께는 0.5~2mm이며, 초음파를 가하여 pin을 솔더 블록에 삽입하였으며, IC socket을 이용하는 경우에는 내경 1mm의 socket에 직경 0.3mm의 솔더볼을 채우고, 직경 0.5mm인 pin을 초음파를 가하여 socket의 구멍에 삽입하였다.

실험 장치는 Fig. 3에 보인 바와 같이 플라스틱 접합용 28kHz 초음파 용접기와 시편을 고정시키기 위한 치공구 및 시편의 예열을 위한 전기 히터(heater)로 구성된다. 솔더 블록 또는 socket을 히터를 이용하여 예열하고, 초음파를 Cu pin에 인가하여 접합하였다.

Thermocouple을 이용하여 솔더 블록의 표면 온도를

측정하였으며, eddy current sensor를 이용하여 horn의 변위를 측정하였다. IC socket을 이용한 실험에서는 상온에서 160°C까지 온도를 증가시키며 실험을 수행하였다. 접합부를 절단하여 접합부의 조직과 성분을 분석하였다.

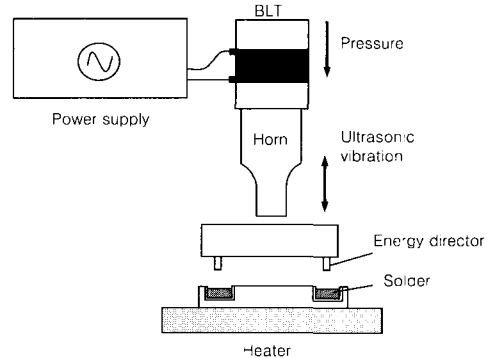


Fig. 3 Schematics of experimental system

3. 결과 및 고찰

3.1 해석 결과

Pin의 크기 및 초음파 주파수가 솔더의 온도에 미치는 영향을 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 초음파 진폭이 일정한 조건에서 pin의 크기가 감소하거나 초음파 주파수가 증가하면 발열량이 증가한다. 솔더의 폭과 두께가 감소할수록 솔더의 변형율이 증가하며, 솔더의 온도가 pin의 온도에 비하여 크게 증가한다. 계산 결과로부터 발열에 가장 큰 영향을 주는 인자는 솔더 두께이며, 솔더 두께가 감소하면 온도는 급격히 증가한다.

Thermocouple을 이용하여 측정된 온도 증가는 30°C 정도이며, 이와같은 측정값은 시편의 중심에서 측정하였기 때문에 pin에서의 온도 증가보다 상당히 낮은 값으로 추정된다. 실제 온도가 증가함에 따라 재료의 강성이 떨어지게 되며 loss factor(E''/E')가 상승하여 발열 효과는 고온에서 증가할 것으로 판단되며, 솔더의 온도에 더한 강성의 변화와 loss factor의 변화를 고려한 계산을 통하여 보다 정확한 예측을 할 수 있다. 모델링을 통하여 초음파 접합 공정의 타당성을 입증할 수 있었으며, 솔더의 크기가 감소함에 따라 온도가 증가하므로 제안한 초음파 접합 공정이 MEMS 접합에 적합하다고 판단된다.

현재의 모델은 공정의 타당성을 검증하기 위한 단순 모델링이기 때문에 보다 정확한 해석을 위한 보완이 필요하다. 해석에 사용된 eutectic 솔더의 용융 온도는 183°C이므로 솔더의 온도가 증가하면 점성 효과가 증가할 것으로 예상되지만, 용융 온도 이상에서는 점탄성 모델은 유효하지 않다. 또한, 접합이 진행되면서 소성 변형이 발생하고 pin의 측면에 마찰열이 발생할 것으로 생각되기 때문에 향후 점탄성 모델에 소성 변형과 마찰열의 효과를 포함시키는 것이 필요하다.

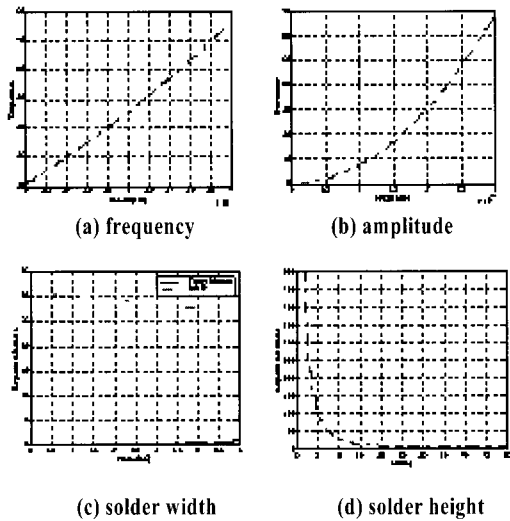


Fig. 4 Effects of process parameters on temperature

3.2 실험 결과

솔더 블록을 150°C로 예열한 상태에서 실험한 경우, 접합부 단면을 Fig. 5에 나타내었다. 단면의 금속 조직의 변화로부터 pin과 솔더의 경계면에 두께 50µm 정도의 솔더의 용융부가 발생하는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 Cu pin과 솔더 사이의 계면에서 Cu₆Sn₅와 같은 금속간 화합물이 발생하지 않는다.

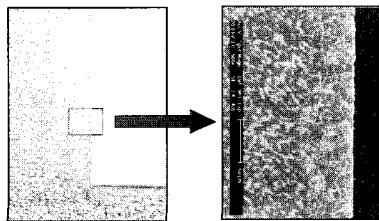


Fig. 5 Cross-section of solder joint using solder block

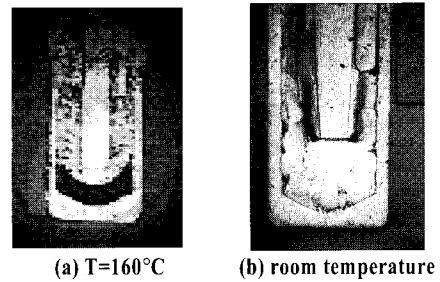


Fig. 6 Cross-section of solder joint using IC socket

IC socket을 이용한 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Socket의 온도를 160°C로 예열하면 socket 내부에 충전된 솔더볼이 완전히 용융되며, 100°C 이상의 온도로 예열을 하면 socket 내부의 솔더볼이 완전히 용융되었다. 빈 공간이 주로 솔더 아랫쪽에 물려 있는 현상이 공통적으로 나타났으며, 이는 솔더볼 사이의 기체가 외부로 배출되지 못하여 발생하였다. 상온에서 초음파만으로 접합을 하는 경우에는 pin의 주위에서 용융이 발생하고 충전된 솔더볼의 경계를 관찰할 수 있다. 이와 같은 결과로부터 pin 주변에만 초음파에 의한 발열이 집중되어 국부적인 용융부가 형성되는 현상을 확인하였다.

IC socket의 접합부 계면의 형상과 성분을 Fig. 7에 나타내었다. 계면에 10µm 이내의 용융부가 발생하였으며, EDS를 이용하여 측정된 pin과 솔더의 성분으로부터 확산에 의한 금속간 화합물이 발생하지 않았다. 접합부 계면에 금속간 화합물이 발생하지 않으면 화학적 결합이 약하기 때문에 접합 강도가 감소하고, 금속간 화합물이 과도하게 발생하면 취성이 증가하여 접합부가 취약하게 된다.

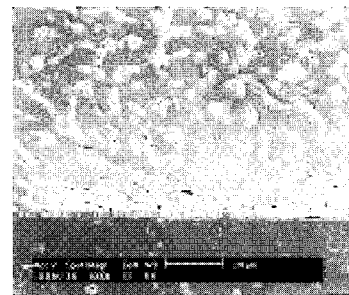


Fig. 7 Microstructure and compositions at interface

초음파를 이용한 접합공정에서 금속간 화합물이 발생하지 않는 이유를 다음과 같이 추정할 수 있다. (1) 접합이 5초 이내의 짧은 시간에 발생하기 때문에 Cu의 확산

이 발생하지 못하거나, (2) 28kHz의 빠른 초음파 진동으로 인하여 계면에서 stirring 현상이 급속간 화합물의 발생을 방해하거나, (3) Cu pin의 표면에 도금된 Zn의 영향 등을 들 수 있다. Zn이 도금되지 않은 Cu pin을 사용한 솔더 블록의 경우에도 급속간 화합물이 발생하지 않았기 때문에 (3)의 경우는 제외할 수 있다. 본 연구의 경우에는 annealing 등의 공정을 통하여 원하는 두께의 급속간 화합물을 생성시킬 수 있기 때문에 유리할 것으로 판단되며, 향후 이에 관한 추가의 연구가 필요하다.

4. 결 론

초음파 접합에 대하여 점탄성 modeling을 수행하여 pin과 hole의 크기가 발열에 미치는 영향을 해석하였다. 솔더부의 크기가 감소함에 따라 온도가 급격히 증가하기 때문에 미세접합에 적용 가능할 것으로 판단된다. 솔더를 이용한 기초 실험을 통하여 접합 계면에서 급속간 화합물이 발생하지 않았으며 국부적인 가열이 가능한 것을 확인하였다. 본 연구를 통하여 초음파 접합 공정의 타당성을 검증하였으며, 향후 micro scale에서 모델링 및 실험을 통한 접합 현상을 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Tan, Q.-Y. and Gosele, U., 1999, "Semiconductor wafer bonding", John Wiley & Sons.
- (2) Madou, M., 2001, "Fundamentals of microfabrication", CRC Press.
- (3) Lin, L., 2000, "MEMS post-packaging by localized heating and bonding", IEEE Trans. On advanced packaging, Vol. 23(4), pp. 608~616.
- (4) Tan, Q., 1998, "Thermosonic flip chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration", IEEE Trans. on components, packaging and manufacturing tech., Vol. 21(1), pp. 53~58.