

## 광/열유체 부품의 접합공정 개발

김정호\*, 이지혜, 유중돈(KAIST 기계공학과), 최두선(KIMM, 지능형 정밀기계연구부)

### Development of bonding processes for micro-optical and thermo-fluidic components

J. H. Kim, J. Lee, C. D. Yoo(Dept. of Mech. Eng., KAIST), D. S. Choi (KIMM)

#### ABSTRACT

The main objectives in the first year include selection of the MEMS bonding methods and feasibility study of selected methods. The ultrasonic bonding method is chosen for MEMS packaging, and the processes to provide localized heating are proposed. The ultrasonic bonding process is analyzed using a lumped model. Preliminary experiments using the eutectic solder and copper pin were performed to verify possibility to MEMS packaging. The preliminary results show possibility of the ultrasonic bonding method for MEMS packaging.

**Key Words :** MEMS packaging (MEMS 패키징), Ultrasonic bonding (초음파 접합), Localized heating (국부 가열)

#### 1. 서론

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. 솔더링과 브레이징 공정은 이종재료의 접합에 널리 사용되고 있으며, 접합시 부품 전체에 가열을 하여야 한다. 접착제를 사용하는 방법은 저온에서 이종재료를 효과적으로 접합할 수 있지만, 신뢰성이 떨어지고 완전 밀봉(hermetic sealing)이 불가능하다.

MEMS에서 사용되는 접합공정은 장단점이 있기 때문에 모든 경우에 적용할 수 있는 공정이 존재하지 않으며, 일반적으로 재료와 접합 온도 등을 고려하여 공정을 선택하여야 한다. 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[1]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 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 [2]. 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 동일한 역할을 하며, 초음파 에너지는 pin에 집중되어 pin과 솔더부 사이에 국부적인 가열이 가능하다.

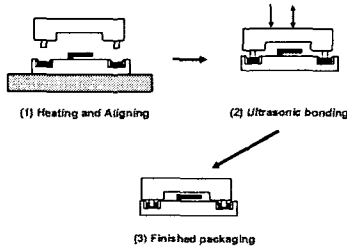


Fig.1 Sequence of ultrasonic MEMS packaging

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 2 자유도의 lumped model을 이용하였다. 넓이가 A, 길이가 L인 고체를 주파수  $\omega$ 인 sine 함수 형태로 진동시키면, 스프링상수 k와 감쇠 계수 b는 복소 탄성 계수로 표현할 수 있으며, 복소 응력  $\sigma^*$ 와 복소 변형률  $\epsilon^*$ 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.

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

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

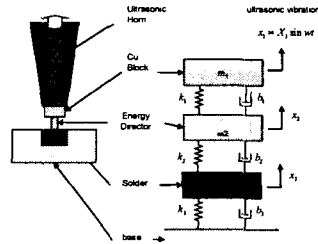


Fig.2 Schematics of lumped model

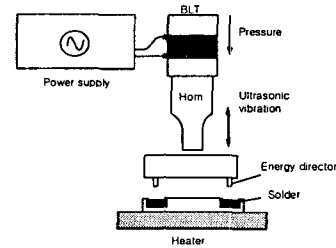


Fig.3 Schematics of experimental system

### 2.2 초음파 접합공정의 기초실험

초음파 접합공정의 타당성을 검증하기 위하여 Cu 재질의 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 초음파 용접기(주파수 28kHz)와 시편을 고정시키기 위한 fixture 및 시편의 예열을 위한 전기 heater로 구성된다. 솔더 블록 또는 socket을 heater를 이용하여 예열하고, 초음파를 Cu pin에

인가하여 접합하였다. Thermocouple 을 이용하여 솔더 블록의 표면 온도를 측정하였으며, eddy current sensor 를 이용하여 horn 의 변위를 측정하였다. IC socket 을 이용한 실험에서는 상온에서 160°C 까지 온도를 증가시키며 실험을 수행하였다. 접합부를 절단하여 접합부의 조직과 성분을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 해석 결과

Pin 의 크기 및 초음파 주파수가 솔더의 온도에 미치는 영향을 계산한 결과를 Fig.4 에 나타내었다. 초음파 진폭이 일정한 조건에서 pin 의 크기가 감소하거나 초음파 주파수가 증가하면 발열량이 증가한다. 솔더의 폭과 두께가 감소할수록 솔더의 변형율이 증가하며, 솔더의 온도가 pin 의 온도에 비하여 크게 증가한다. 계산 결과로부터 발열에 가장 큰 영향을 주는 인자는 솔더의 두께이며, 솔더의 두께가 감소하면 온도는 급격히 증가한다. Thermocouple 을 이용하여 측정한 온도 증가는 30°C 정도이며, 이는 계산 결과와 order of magnitude 범위에서 일치하였다. 모델링을 통하여 초음파 접합 공정의 타당성을 입증할 수 있었으며, 솔더의 크기가 감소함에 따라 온도가 증가하므로 제안한 초음파 접합 공정이 MEMS 접합에 적합하다고 판단된다.

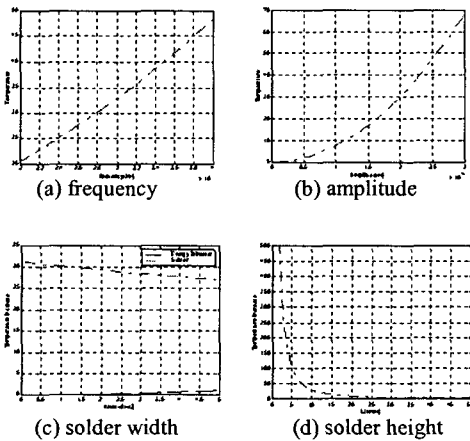


Fig.4 Effects of process parameters on temperature

현재의 모델은 공정의 타당성을 검증하기 위한 단순 모델링이기 때문에 보다 정확한 해석을 위한 보완이 필요하다. 해석에 사용된 eutectic 솔더의 용융 온도는 183°C 이므로 솔더의 온도가 증가하면 점성 효과가 증가할 것으로 예상되지만, 용융 온도 이상에서는 점탄성 모델은 유효하지 않다. 또한, 접합이 진행되면서 소성 변형이 발생하고 pin 의 측면에 마찰열이 발생할 것으로 생각되기 때문에

점탄성 모델에 소성 변형과 마찰열의 효과를 포함시키는 것이 필요하다.

#### 3.2 실험 결과

솔더 블록을 150°C 로 예열한 경우, 접합부 단면을 Fig.5 에 나타내었다. 단면의 금속 조직의 변화로부터 pin 과 솔더의 경계면에 두께 50µm 정도의 솔더의 용융부가 발생하는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 Cu pin 과 솔더 사이의 계면에서 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 와 같은 금속간 화합물이 발생하지 않는다.

IC socket 을 이용한 실험 결과를 Fig.6 에 나타내었다. Socket 의 온도를 160°C 로 예열하면 socket 내부에 충전된 솔더볼이 완전히 용융되며, 100°C 이상의 온도로 예열을 하면 socket 내부의 솔더볼이 완전히 용융되었다. 상온에서 초음파만으로 접합을 하는 경우에는 pin 의 주위에서 용융이 발생하고 충전된 솔더볼의 경계를 관찰할 수 있다. 이와 같은 결과로부터 pin 주변에만 열이 집중되어 국부적인 용융부가 형성되었다.

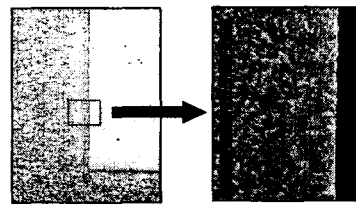


Fig.5 Cross-section of solder joint using solder block

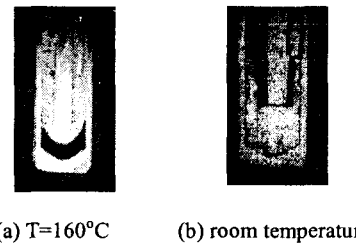


Fig.6 Cross-section of solder joint using IC socket

IC socket 의 접합부 계면의 형상과 성분을 Fig.7 에 나타내었다. 계면에 10µm 이내의 용융부가 발생하였으며, EDS 를 이용하여 측정한 pin 과 솔더의 성분으로부터 확산에 의한 금속간 화합물이 발생하지 않았다. 금속간 화합물이 발생하지 않는 이유는 다음과 같이 추정할 수 있다: (1) 접합이 5 초 이내의 짧은 시간에 발생하기 때문에 Cu 의 확산이 발생하지 못하거나, (2) 28kHz 의 빠른 초음파 진동으로 인하여 계면에서 stirring 현상이 금속간 화합물의 발생을 방해하거나, (3) Cu pin 의 표면에 도금된 Zn 의 영향 등을 들 수 있다. (3)의 경우는 솔더 블록의 경우에도 금속간 화합물이

발생하지 않았기 때문에 제외할 수 있을 것으로 생각되며, 향후 이에 관한 추가의 연구가 필요한 것으로 판단된다. 금속간 화합물이 발생하지 않으면 화학적 결합이 발생하지 않았기 때문에 접합 강도가 감소하고, 과도한 금속간 화합물의 발생은 취성으로 인하여 접합부가 취약하게 된다. 본 연구의 경우에는 annealing 등의 공정을 통하여 원하는 두께의 금속간 화합물을 생성시킬 수 있기 때문에 유리할 것으로 판단된다.

2. Tan, Q., "Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration", IEEE Trans. on components, packaging and manufacturing tech., Vol.21(1), pp.53-58, 1998.

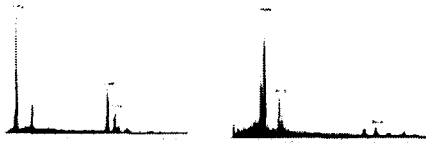
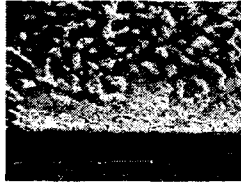


Fig.7 Microstructure and compositions at interface

#### 4. 결론

초음파 접합에 대하여 점탄성 modeling 을 수행하여 pin 과 hole 의 크기가 발열에 미치는 영향을 해석하였다. 솔더의 크기가 감소함에 따라 온도가 급격히 증가하기 때문에 미세접합에 적용 가능할 것으로 판단된다.

초음파 접합에 대한 솔더 블록과 IC socket 을 이용한 기초 실험을 수행하였다. 국부적인 접합부가 형성되는 현상을 확인하였으며, 초음파 접합 공정의 타당성을 검증하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

#### 참고문헌

1. Lin, L., "MEMS post-packaging by localized heating and bonding", IEEE Trans. On advanced packaging, Vol.23(4), pp.608-616, 2000.