

종방향 초음파를 이용한 Au 범프의 솔더링 공정

김정호* · 이지혜* · 유중돈* · 최두선**

*한국과학기술원 기계공학과

**한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부

Soldering Process of Au Bump using Longitudinal Ultrasonic

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

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

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

Abstract

A soldering process with longitudinal ultrasonic is conducted in this work using the Au bump and substrate. Localized heating of the solder is achieved and the stirring action due to the ultrasonic is found to influence the bond strength and microstructure of the eutectic solder. The acceptable bonding condition is determined from the tensile strength. Since the multiple bonds can be formed simultaneously with localized heating, the proposed ultrasonic soldering method appears to be applicable to the high-density electronic package.

* Corresponding author : jh.kim@kaist.ac.kr

(Received November 17, 2003)

Key Words : Ultrasonic soldering process, Longitudinal vibration, Au bump, Electronic packaging

1. 서 론

전자 패키징(electronic packaging)의 1단계 접합(first level of interconnection)에서 와이어 본딩(wire bonding) 방법이 널리 사용되고 있지만, 반도체의 실장 밀도와 입출력 단자수가 증가함에 따라 플립칩(flip-chip)의 사용이 점차 증가하고 있다¹⁾. 플립칩 본딩은 패키징 크기의 감소와 경로의 최소화 및 전자기적 특성을 향상시킬 수 있기 때문에, 기존의 솔더볼(solder ball)을 이용한 방법 이외에 다양한 접합 공정이 시도되고 있다. 최근 횡방향 초음파(lateral ultrasonic vibration)를 이용한 솔더 범프의 접합과 종방향 초음파(longitudinal ultrasonic vibration)를 이용한 Au 범프의 접합을 이용한 플립칩 본딩에 대한 연구가 시도되었다^{2,3)}. 이와 같은 접합 방법을 사용하면 초음파에 의해 접합면의 불순물과 산화막이 제거되고 금속 범프와 패드 사이에 우수한 접합 특성의 금속 접합부가 형

성된다.

본 연구의 선행 연구에서 종방향 초음파 진동을 이용한 금속 범프(bump)와 솔더 간의 접합공정을 제안하였고, 이에 대한 모델링과 기초적인 실험을 수행하여 초음파 솔더링 공정의 타당성을 검증하였다⁴⁾. 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.

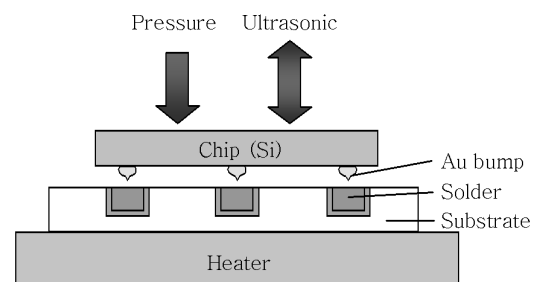


Fig. 1 Schematic of longitudinal ultrasonic soldering process

기판의 아래에 설치된 히터(heater)로 기판을 가열하여 솔더의 온도를 증가시킨 상태에서 압력과 초음파 진동을 가하면, 솔더의 점탄성(viscoelastic) 발열에 의해 금속 범프 주위의 솔더가 국부적으로 용융되어 접합부가 형성된다. 초음파 진동에 의한 단위 부피당 솔더의 발열량은 초음파 주파수에 비례하고 솔더 변형율의 자승에 비례한다 ($Q \propto \omega \epsilon^2$)^{4,5)}.

본 연구에서는 선행 연구의 결과를 바탕으로 Au 범프와 공정 솔더를 이용한 실험을 수행하였다. 공정 변수에 따른 접합부의 미세조직 관찰을 통한 공정 변수의 영향을 분석하였으며, 접합 시편의 인장시험을 통하여 접합 강도를 측정하고 최적 접합 조건을 결정하였다.

2. 초음파 솔더링 공정의 실험

전자 패키징에 적용 가능한 미세 접합을 수행하기 위하여 Fig. 2에 보인 칩과 기판을 제작하였다. 실리콘 웨이퍼에 Au범프를 형성하기 위하여, 실리콘 웨이퍼 표면에 80nm 두께의 TiW층과 100nm 두께의 Al층을 스퍼터링하여UBM (Underbump Metallurgy) 층을 형성하고, 스타드 범핑(stud bumping) 공정을 이용하여 Au 범프를 형성하였다. Fig. 2(a)의 Au 범프의 크기는 직경 95 μ m, 높이 40 μ m 이고, 칩을 8mm \times 8mm

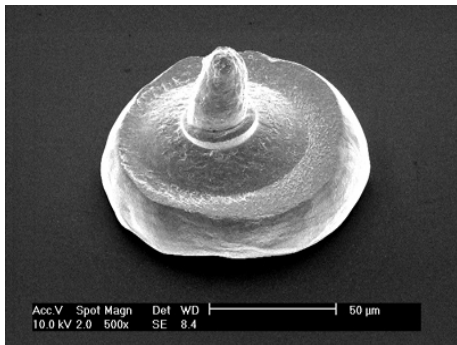
로 절단하였으며 각 칩의 범프 개수는 9개이다. Fig. 2(b)에 보인 기판을 제작하기 위하여 FR4 기판의 표면에 레이저 드릴링 공정으로 직경 150 μ m, 깊이 200 μ m의 micro-via를 기판의 표면에 가공하였다. 전해도금 공정으로 20 μ m두께의 Cu층을 형성하고 via에 HASL (Hot Air Solder Leveling)공정으로 63Sn-37Pb 공정 솔더를 채웠다.

초음파 솔더링은 40kHz의 초음파를 사용하였으며, 히터를 이용하여 기판의 온도를 160 $^{\circ}$ C로 예열한 상태에서 수직 압력과 접합 시간을 변화시키며 실험하였다. 수직 압력 255, 451, 647kPa 경우에 대해 접합 시간은 0.5, 1, 2초로 각각 3가지 경우에 대해 9가지 공정 변수에 대한 조합으로 실험이 수행 되었다. 접합부의 미세 조직을 관찰하기 위하여 광학 현미경과 SEM을 이용하였으며, 금속간 화합물과 금속 조직의 성분조사를 위해 EDS를 이용하였다.

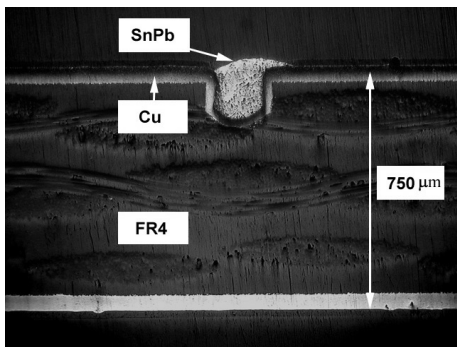
초음파 솔더링의 접합 조건을 결정하기 위하여 인장 시험을 수행하여 접합 강도를 측정하였다. 인장 시험기 (INSTRON-5500)를 이용하여 0.1mm/min의 속도로 초음파 접합된 칩과 기판을 분리시키며 하중을 측정하였고, 각 접합 조건에 대해 8번의 인장 실험 결과에 대한 평균값을 구하였다.

3. 접합 조건에 대한 미세조직

초음파 용접의 공정 변수가 미세 조직에 미치는 영향을 분석하기 위하여 일정한 압력을 가한 상태에서 접합 시간을 변화시키며 접합을 수행하였다. 압력이 255kPa 인 경우에 접합 시간에 따라 발생하는 솔더 조직의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 0.5초 동안 초음파를 가한 경우, 솔더 조직의 변화는 거의 발생하지 않았다. 접합 시간이 0.5초로 짧기 때문에 초음파에 의한 점탄성 발열은 솔더를 용융시키지 못하였지만, Au 범프의 계면에서 0.7 μ m 두께의 금속간 화합물 층이 국부적으로 형성된 것을 SEM을 이용하여 확인하였다. 금속간 화합물의 두께가 얇아 EDS 분석에 의한 성분이 정확하지는 않지만, AuSn_x와 같은 금속간 화합물이 생성된 것으로 판단된다. 이와 같은 조건에서 Au 범프는 솔더와 냉접 상태로 접합되어 약한 충격에 분리되었다. 접합 시간을 증가시켜 1초 동안 초음파를 가한 경우의 접합 단면을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 솔더가 용융되어 범프의 Au와 솔더의 Sn 성분이 AuSn₄를 형성하기 시작하며, Au 계면 부근의 검은 조직은 Pb-rich 조직들이 Au 범프의 인근에 발생한 것이다. 전체적인 솔더 조직은 용융전과 달리 비대한 Pb-rich 조직들이 불규칙하게 발생하기 시작하였다. 초

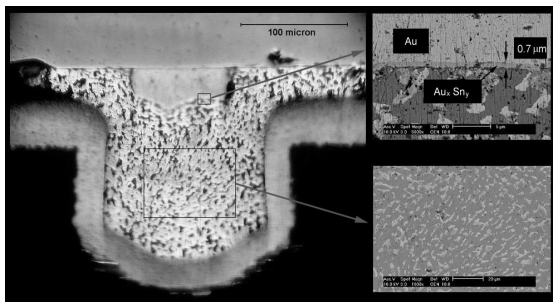


(a) Au stud bump on Si wafer

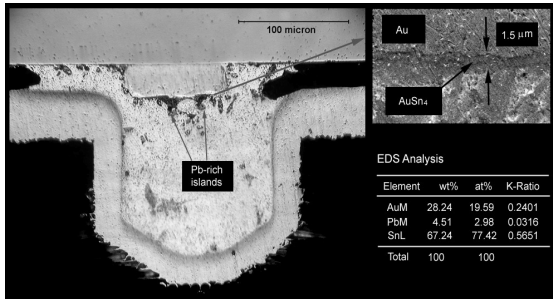


(b) Cross-section of FR4 substrate

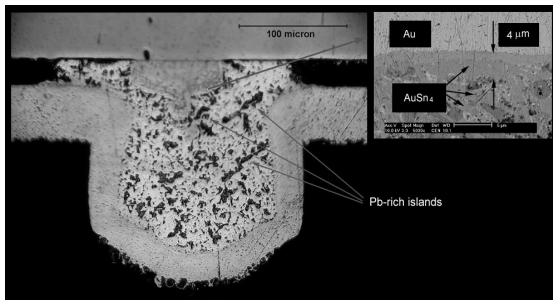
Fig. 2 Configurations of Au stud bump and substrate



(a) 0.5s



(b) 1s

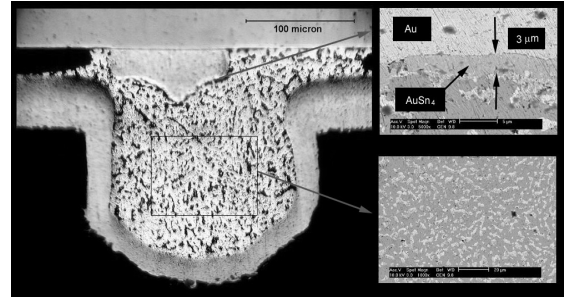


(c) 2s

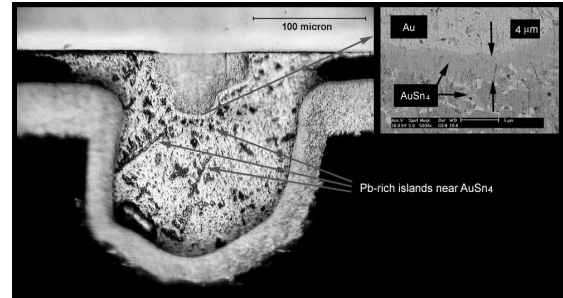
Fig. 3 Effect of bonding time on microstructure ($\times 400$) with pressure of 255kPa

음파를 2초 동안 가한 경우, Fig. 3(c)에 보는 바와 같이 솔더 영역에 전반적으로 Pb-rich 조직이 퍼져있는 형상이 나타났다. 이를 통하여 솔더가 용융되면서 Au가 용해되어 Au와 Sn간에 금속간 화합물을 형성하기 시작하고 솔더 전체 영역에서 Pb-rich 조직이 분포하게 되었음을 알 수 있다.

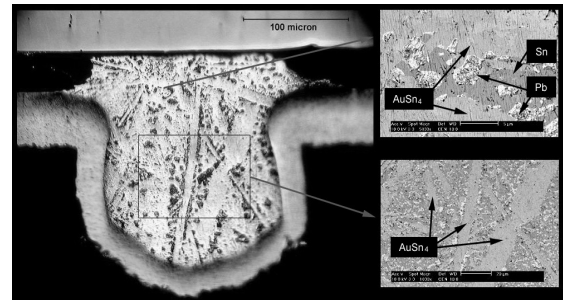
압력을 451kPa로 증가시킨 경우에 접합 시간에 의한 솔더 조직의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 초음파를 0.5초 동안 가한 경우, Fig. 4(a)에 보는 바와 같이 전반적인 솔더의 조직 변화는 거의 없지만, Fig. 3(a)와 비교하여 Au의 계면에 검은 무늬의 Pb-rich 조직들이 인접해 있는 것을 확인하였다. 수직 압력이 증가함에 따라 솔더의 변형이 증가하여 점탄성 발열 효과가 증가하고, 계면에서 Au의 확산에 금속간 화합물의 생성을 촉진하였을 것으로 판단된다. Fig. 4(b)는 초음파



(a) 0.5s



(b) 1s



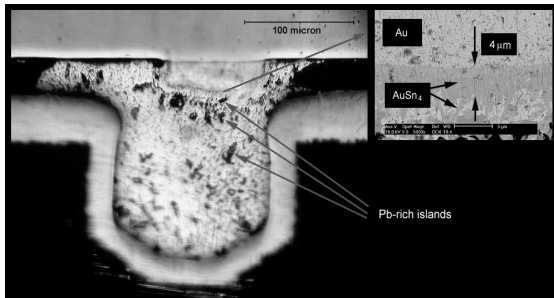
(c) 2s

Fig. 4 Effect of bonding time on microstructure ($\times 400$) with pressure of 451kPa

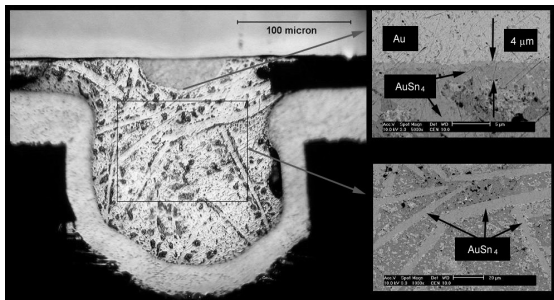
를 1초 동안 가한 경우에 발생한 조직을 나타낸다. Au 범프의 계면을 따라 AuSn₄의 금속간 화합물이 발생하였으며, 솔더 전반적으로 침상의 AuSn₄ 패턴이 생성되고 그 주변에 Sn의 고갈로 인한 Pb-rich island 들이 분포되는 현상이 관찰되었다. 짧은 접합 시간에 솔더 전체 영역에서 금속간 화합물이 형성된 것은 초음파 진동이 용융 솔더의 유동을 발생시켜 용해된 Au를 확산시키기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 204°C에서 Au의 용융 솔더에 대한 확산 속도는 1.33 $\mu\text{m/s}$ 인 점을 고려하면⁶⁾, 1초의 접합 시간에 200 μm 범위까지 AuSn₄가 형성되는 현상은 초음파 진동으로 발생한 용융 솔더의 유동에 의해 계면에서 용해된 Au를 솔더의 전체 영역으로 분포시키는 것으로 사료된다. 접합 시간을 2초로 증가시킨 경우, Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 대부분의 Au 범프는 솔더에 용해되고 솔더 영역 전

체에 걸쳐 침상의 AuSn₄ 조직이 형성된다. 이는 점탄성 발열에 의해 솔더의 온도가 증가하면서 확산 속도가 증가하고 초음파에 의한 유동이 계면에서 Au의 용해를 증가시키기 때문이다. 그러므로 Au 범프가 2초 이상 초음파에 노출되면, Au범프가 거의 소실되어 접합 강도를 저하시킬 것으로 생각된다.

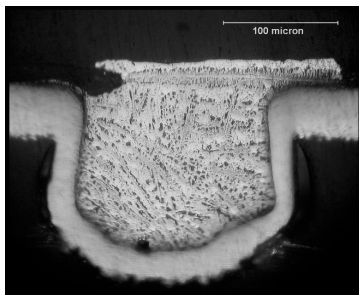
압력이 647kPa인 경우에 솔더 조직의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 초음파를 0.5초 동안 가한 경우, Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 Au범프의 계면을 따라 3~4 μm 두께의 AuSn₄층이 형성되었으며, Fig. 4(b)의 조직과 유사하게 AuSn₄층 주위에 Pb-rich island들이 분포된 형상이 관찰 되었다. 솔더에 가해지는 압력의 증가로 인한 점탄성 발열이 증가하여 짧은 시간에 AuSn₄ 층을 형성하고, 솔더의 조직에 침상의 AuSn₄가 형성되지 않은 것은 솔더 전체가 용융되지 않았기



(a) 0.5s



(b) 1s



(c) 2s

Fig. 5 Effect of bonding time on microstructure (×400) with pressure of 647kPa

때문이다. 초음파를 1초 동안 가한 경우, Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 솔더 전 영역에 걸쳐 침상의 AuSn₄가 선명하고 두껍게 형성되었으며, Au 범프의 상당 부분이 용해되었다. 초음파를 2초 동안 가하면, Fig. 5(c)에 보인 바와 같이 Au범프가 완전히 용해되어 접합이 발생하지 않았다.

초음파 솔더링의 접합 조건에 따른 솔더 조직과 Au 범프 형상의 변화로부터 압력과 접합 시간은 상호 보완적인 관계인 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 압력을 증가시키고 접합 시간을 감소시키는 조건과 압력을 감소시키고 접합 시간을 증가시키는 조건에서 유사한 솔더 조직을 얻을 수 있으며, 이는 점탄성 발열량이 압력과 접합 시간에 비례하기 때문이다. 또한, 초음파 진동에 의한 용융 솔더의 유동이 솔더 조직과 Au 범프의 용해에 큰 영향을 준다. 유동은 계면에 형성된 금속간 화합물을 이탈시켜 Au 범프의 용해를 촉진시키고, 계면에서 용해된 Au는 유동에 의해 용융부 전반에 퍼지도록 하는 역할을 한다. 이와 같은 초음파의 역할은 접합 강도에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 접합조건에 따른 접합강도 변화

Fig. 6은 각 접합 조건으로 초음파 솔더링한 시편을 이용하여 인장 시험을 수행한 결과를 나타낸다. 압력이 255kPa로 낮은 경우, 접합 시간이 증가할수록 인장 강도가 높아지며, 접합시간이 0.5초인 경우는 Au범프와 솔더 사이에 냉접이 발생하여 거의 접합이 발생하지 않았다. Au 계면의 솔더가 부분적으로 용융되는 1초의 경우와 솔더 전체가 용융되는 2초의 경우에 접합 강도가 시간에 비례하여 증가 하였다.

중간 단계의 압력인 451kPa을 가하는 경우, 접합 시간이 0.5초로 짧으면 Au 계면에서 냉접에 의해 20MPa 이하의 낮은 인장 강도를 보이지만, 접합 시간

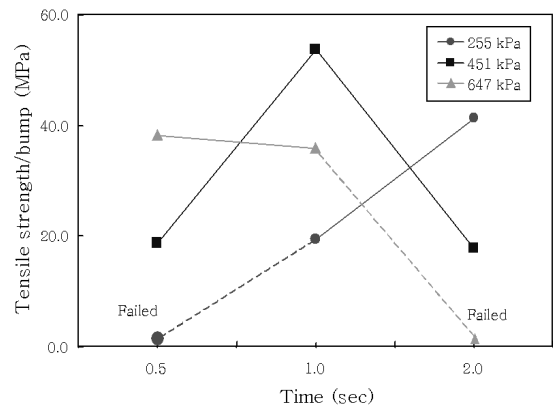


Fig. 6 Effects of bonding time and pressure on tensile strength

이 1초로 증가함에 따라 솔더의 용융이 발생하고 계면에 Fig. 7에 나타난 바와 같이 균일한 금속간 화합물의 층이 형성되어 가장 높은 인장 강도인 53.7MPa를 얻을 수 있었다. 그러나 접합 시간이 2초로 증가하면 Au 범프가 용융된 솔더에 급속하게 확산되어 Au 범프의 크기가 줄어들고 과도한 금속간 화합물의 생성으로 인하여 접합 강도가 20MPa이하로 감소하는 현상을 보였다.

압력이 647kPa로 높은 경우, 접합 시간이 0.5초로 짧아도 계면에서 솔더의 국부적인 용융이 발생하고 계면에 급속한 화합물층을 형성하여 40MPa 정도의 인장 강도를 얻을 수 있었다. 그러나 접합 시간을 1초로 증가하면 Au의 확산에 따른 범프 크기 감소 및 과도한 금속간 화합물 형성으로 인하여 인장 강도가 감소하였다. 접합 형성하고 접합이 발생하지 않았다.

압력이 낮고 접합 시간이 긴 경우와 압력이 높고 접합 시간이 짧은 경우에는 접합 강도가 40MPa 정도로 비슷하게 나오지만, 압력이 높은 경우나 초음파 작용 시간이 길어지는 경우는 칩이나 기판에 손상이 발생하기 때문에 접합 조건으로 부적절한 것으로 판단된다. 반면, 중간 단계의 압력인 451kPa를 사용하는 조건에서 접합이 이루어지는 접합 시간이 0.5~2초로써 범위가 넓고 최대 인장 강도를 얻을 수 있기 때문에 적합한 조건으로 판단된다.

인장 시험 후 파단이 발생하는 위치를 관찰한 결과, 솔더가 용융되지 않는 냉접의 경우는 Au범프와 솔더 사이에서 파단이 발생하였다. 그러나 솔더가 용융하여 Au범프 계면에 급속한 화합물이 형성된 경우에는 Au 범프와 실리콘의 UBM 사이에서 분리되었다. 그러므로 초음파 솔더링의 접합 강도는 접합 조건 뿐만 아니라 스테드 범핑 공정으로 접합된 Au범프와 UBM간의 접합력에 의해 큰 영향을 받는다. 전단 시험의 경우 전단

강도는 Au 스테드 범핑의 강도가 직접적인 영향을 주며, 공정 조건에 의한 영향은 크게 받지 않는 것으로 측정 되었다. 측정된 전단 강도는 30~50gf/bump로써 MIL-STD-883 규격에서 제시한 5gf/bump를 만족시키는 결과를 확인 하였다.

5. 결 론

종방향 초음파를 이용한 솔더링 공정에 대한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초음파 솔더링의 적용 가능성을 확인하기 위하여 Au 스테드 범핑된 실리콘 칩과 솔더가 매립된 기판을 이용하여 접합 실험을 수행하였으며, 초음파에 의한 국부적인 발열로 인해 솔더가 용융되는 현상을 확인하였다.

2) 초음파에 의한 솔더의 점탄성 발열로 솔더가 용융되면서 Au 범프의 계면에서 급속한 화합물인 AuSn₄가 생성되고 접합이 발생하였다. Au 범프의 용해와 솔더 조직은 초음파에 의해 발생한 용융 솔더의 유동에 의해 큰 영향을 받는다.

3) 인장 시험을 통하여 측정된 접합 강도는 금속 조직에 의해 큰 영향을 받으며, 최적 접합 조건에서 범프당 50MPa 이상의 높은 접합 강도를 얻을 수 있었다.

4) 본 연구에서 제안한 초음파 솔더링 방법을 이용하여 다수의 Au 범프를 1초 이내에 접합할 수 있고 높은 접합 강도를 얻을 수 있기 때문에 전자 패키징에 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

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. G. Messner, I. Turlik, J. W. Balde, and P. E. Garrou, Thin film multichip modules(1st Edition), International society for hybrid microelectronics, 1999
2. S. M. Hong, C. S. Kang, and J. P. Jung, "Fluxless thermosonic bonding of Sn-3.5Ag solder bump flip chip", J. of Korea Inst. Met. & Mater., **40-6**, 2002, 700-705 (in Korean)
3. Q. Tan, "Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Tech., **Vol. 21**(1), 1998, 53-58
4. J. H. Kim, J. H. Lee, C. D. Yoo, and D. S. Choi.

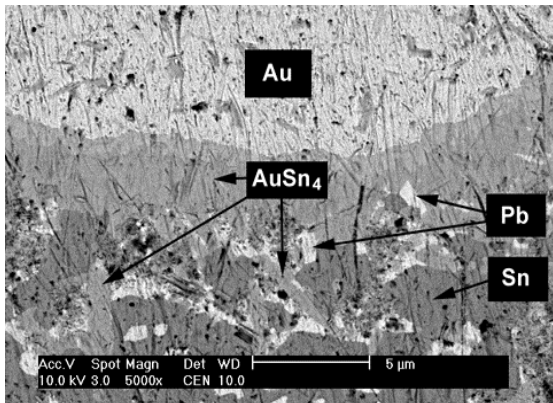


Fig. 7 SEM image of Au bump interface (bonding time=1s, pressure=451kPa)

- “Modeling of soldering process using longitudinal ultrasonic”, J of Korea Welding Society, **21-5**, 2003, 534-539 (in Korean)
5. A. Benatar, V. E. Raman, and K. N. Satiner. “Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field”, Polymer Engineering and Science, **29-23** 1989, 1689-1697
6. Zribi. and R. R. Chromik. “Solder metallization interdiffusion in microelectronic interconnects”. IEEE Electronic Components and Technology Conference. 1999, 451-457