

스트립 형상인 Au 범프의 종방향 초음파 접합

김병철* · 김정호* · 이지혜* · 유중돈* · 최두선**

*한국과학기술원, 기계공학과

**한국기계연구원, 지능형 정밀기계연구부

Longitudinal Ultrasonic Bonding of Strip-type Au Bumps

Byung-Chul Kim*, Jung-Ho Kim*, Ji-Hye Lee*, Choong-Don Yoo* and Doo-Sun Choi**

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

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

Abstract

The strip Au bumps are bonded using longitudinal ultrasonic for the electronic package. Au bumps on the chip and substrate are aligned in a crossed shape, and the ultrasonic is imposed on the chip to form the solid-state bond between the Au bumps. Deformed bump shapes are calculated using the finite element method, and the bond strength is measured experimentally. The crossed strip Au bumps are deformed similar to the saddle, which provides larger contact surface area and higher friction force. Compared with the previous bonding method between the Au bump and planar pad, higher bond strength is obtained using the crossed strip bumps.

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

(Received January 30, 2004)

Key Words : Longitudinal ultrasonic, Au bumps, Crossed strip, Deformed bump shape, Electronic packaging

1. 서 론

실리콘 칩(chip)과 기판(substrate) 간의 접합부를 형성하는 전자 패키징(electronic packaging) 공정으로 와이어 본딩(wire bonding), 솔더링(soldering), TAB (tape automated bonding) 등과 같은 다양한 접합 공정이 사용되고 있다¹⁾. 최근 칩의 입출력 단자수가 증가하고 무연 솔더(Pb-free solder)의 사용이 의무화 되는 추세에 따라 와이어 본딩이나 솔더링 공정을 보완하거나 이를 대체할 수 있는 접합공정에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 초음파를 이용하여 Au 범프(bump)를 접합하였으며, 해석 및 실험을 통하여 초음파 접합 방법의 타당성을 검증하였다.

Au 범프를 이용한 접합은 와이어 본딩이나 솔더링에 비해 전자 패키징의 집적 밀도를 증가시킬 수 있고 플럭스(flux)나 언더필(underfill)의 사용을 생략해도 되는 장점이 있다. Au 범프의 접합 공정으로 열압착

(thermocompression) 공정과 초음파 (ultrasonic) 공정을 들 수 있으며²⁻⁵⁾, 열압착 공정은 확산에 의해 접합이 발생하기 때문에 접합에 소요되는 시간이 초음파 접합 공정에 비해 상대적으로 오래 걸린다. 초음파 접합공정의 대표적인 공정으로 와이어 본딩을 들 수 있다. 와이어 본딩은 압력을 가하여 Au 볼(ball)을 패드(pad)에 접촉시킨 상태에서 횡방향(lateral direction) 초음파 진동을 가하여 접합부를 형성한다⁶⁾.

최근 Au 범프 또는 솔더 범프의 접합에 종방향 초음파를 적용하는 연구가 시도되었다^{7,8)}. 종방향 초음파를 이용한 접합공정은 칩과 패드의 정렬이 용이하고, 칩과 기판이 정확하게 수평을 유지하지 않아도 접합할 수 있는 장점이 있기 때문에 전자 패키징 뿐만 아니라 MEMS 패키징에도 적용되었다⁹⁾.

본 연구에서는 기존의 Au 범프와 평면 패드 간에 접합부를 형성하는 방법을 보완하여 칩과 기판의 패드에 형성된 스트립(strip) 형상의 Au 범프를 십자 형상으로 정렬하고, 압력과 종방향 초음파를 인가하여 접합하

였다. 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용한 변형 해석과 초음파 접합 실험을 통하여 범프 형상이 접합에 미치는 영향을 분석하고 접합 강도를 측정하여 제안한 접합 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 초음파에 의한 고상 접합의 해석

2.1 범프 형상의 영향

종방향 초음파를 이용한 Au 범프의 접합은 초음파와 압력에 의해 Au 범프가 소성 변형하여 고상 접합부가 형성된다. 일반적으로 고상 접합에 큰 영향을 미치는 인자로 표면 상태와 소성 변형에 의한 접촉 면적의 증가를 들 수 있다. 초음파가 금속의 소성 변형에 미치는 영향에 대하여 여러 가설이 제안되었지만, 아직 명확하게 규명되지 못한 실정이며 이에 관한 대표적인 이론으로 초음파에 의한 전위(dislocation)의 이동을 들 수 있다¹⁰⁾. 또한, 초음파에 의해 재료의 항복응력이 감소하는 현상을 모델링한 연구도 발표되었다. 그러나 이와 같은 이론은 초음파에 의해 발생하는 힘을 정확하게 측정하지 못하기 때문이며, 초음파에 의한 힘을 고려하면 일반 금속의 항복응력 보다 높은 압축 압력이 작용하고 이에 의해 접합이 발생한다는 연구도 있다¹¹⁾.

기존의 초음파를 이용한 와이어 본딩의 경우, 볼(ball) 형상의 Au 범프와 평면 패드 사이에 접합부를 형성하며, 횡방향 초음파를 사용하기 때문에 마찰에 의해 패드 표면에 존재하는 불순물과 산화막이 제거되어 고상 접합부를 얻는다. 동일한 조건에서 종방향 초음파를 사용하면, 횡방향 초음파에 비해 계면에서 마찰에 의한 전단력이 감소하여 불순물과 산화막을 제거하는 능력은 감소하지만, 소성 변형에 의한 접촉 면적의 증가는 접합 강도를 높일 것으로 판단된다. 그러므로 종방향 초음파를 사용하는 경우에는 소성 변형에 의해 접합 면적이 효과적으로 증가할 수 있도록 범프를 설계하는 것이 중요하다.

종방향 초음파를 이용한 Au 범프의 접합 방법을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 보인 기존의 접합 방법은 Au 범프와 평면 패드 (bump-planar pad, BP)를 사용하며, 압력으로 범프를 패드에 접촉시키고 초음파를 가하여 접합부를 형성한다. 소성 변형이 진행되면서 범프와 평면 패드의 접촉 면적이 증가하지만, 접촉면의 마찰력이 크기 때문에 범프의 중심부에서 벌정(bulging) 현상이 발생한다¹²⁾. 그러므로 소성 변형에 의한 접촉 면적은 크게 증가하지 못한다. Fig. 1(b)는 본 연구에서는 제안한 십자 형상으로 정렬된 스트립 형상의 Au 범프 (crossed strip bump, CSB)를 나타

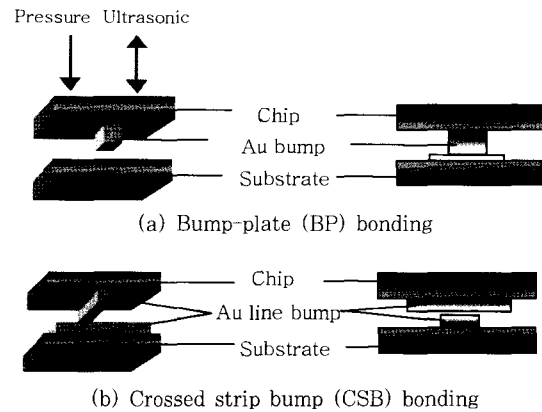


Fig. 1 Configurations of Au bump for longitudinal ultrasonic bonding

내며, 칩과 기판의 패드에 형성된 스트립 형상의 범프를 십자 형상으로 정렬하고 종방향 초음파를 가하여 접합한다. 스트립 범프가 변형하는 과정에서 범프의 길이 방향으로 평면 변형(plane strain) 조건이므로 길이 방향의 변형은 제한되어 주로 범프의 폭 방향으로 변형이 발생한다. 또한, 폭 방향 변형의 경우에 측면에서는 평면 응력(plane stress) 상태이므로 범프의 중심에 비해 외곽에서 큰 변형이 발생한다. 그러므로 Au 범프는 말안장과 유사한 형상으로 변형되며, 이와 같은 형상에 의해 범프간 접촉 면적이 증가하고 접합면에서 마찰력이 증가하여 양호한 고상 접합부를 형성한다.

2.2 유한요소법을 이용한 변형 해석

접합부의 접합 강도는 접합 면적의 증가에 비례하기 때문에 변형된 범프 형상을 계산하면 접합 강도를 간접적으로 예측할 수 있다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 소성 변형에 의해 발생하는 접합 면적을 계산하였다. 초음파에 의해 발생하는 힘을 추정하기 곤란하므로 범프에 정하중을 가하는 경우에 소성 변형된 접합부의 형상을 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 이를 위하여 Fig. 1의 BP와 CSB를 사용하는 경우에 대하여 ABACUS 프로그램을 이용하여 소성 변형된 접합부 형상과 접합 면적을 계산하였다.

Au의 표면은 산화막이 없기 때문에 접촉면에 발생하는 전단 응력은 Au의 전단 항복응력과 동일하다는 sticking 조건을 접촉면에 적용하였으며, linear-perfect plastic 조건으로 소성 변형하는 것으로 가정하였다. 계산에 사용된 요소는 27절점 육면체이고, CSB의 mesh 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 압축 변형에 따른 접합면의 형상과 면적을 계산하였으며, 면적 증가율을 다음과 같이 정의하였다.

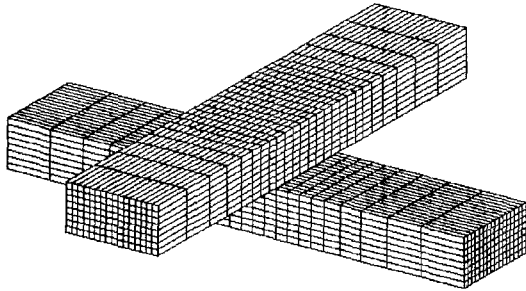


Fig. 2 Mesh of CSB for FEM (2mm×1mm×10mm)

$$RA = (A_f - A_o) / A_o \quad (1)$$

이때, A_o 와 A_f 는 소성 변형 전과 변형 후의 면적을 나타낸다.

3. 실험

Au 범프를 이용하여 실험하는 경우에는 범프의 크기가 수십 μm 로 미세하기 때문에 소성 변형에 의한 범프의 형상 변화를 관찰하기 곤란하다. 그러므로 알루미늄 시편을 이용한 macro-scale의 압축 실험과 Au 범프가 형성된 실리콘 시편을 이용한 micro-scale의 초음파 접합 실험을 수행하였다.

Macro-scale의 실험을 위해 연성이 높은 Al-1000 계열의 판재를 절삭 가공하여 $2 \times 2 \times 18\text{mm}$ 크기의 직육면체 범프를 제작하였다. 인장시험기(INSTRON-5500)를 이용하여 BP와 CSB의 상부 시편에 상온에서 $0.2\text{mm}/\text{min}$ 의 속도로 압력을 가하여 범프를 소성 변형시켰으며, 변형된 형상을 비교하고 접촉 면적의 증가율을 구하였다.

Micro-scale의 실험에 사용되는 Au 범프를 가공하기 위하여 Fig. 3의 LIGA-like 공정을 사용하였다. 스퍼터링(sputtering) 공정으로 실리콘 웨이퍼 표면에 Ti와 Au 층을 형성하고, PR을 도포하고, lithography 공정과 식각 공정을 이용하여 스트립 패턴을 만든 후에 전기 도금으로 Fig. 4에 보인 바와 같이 Au 범프를 형성하였다. 범프 단면의 종횡비(aspect ratio)에 의한 영향을 실험하기 위하여 범프 폭을 $40\mu\text{m}$ 로 고정하고 범프 높이를 18.4, 15.6, $30.4\mu\text{m}$ 로 변화시켜 제작하였으며, 스트립 간의 거리는 $500\mu\text{m}$ 이다. 웨이퍼를 절단하여 $5.3 \times 5.3\text{mm}$ 크기의 시편을 제작하였으며, 각 시편에는 10개의 스트립이 있기 때문에 십자 형상으로 접합하는 경우에 발생하는 접합부의 개수는 100개 이다.

초음파 접합을 위한 실험 장치는 Fig. 5에 보인 바와 같이 28kHz의 종방향 초음파를 발생시키는 초음파 용

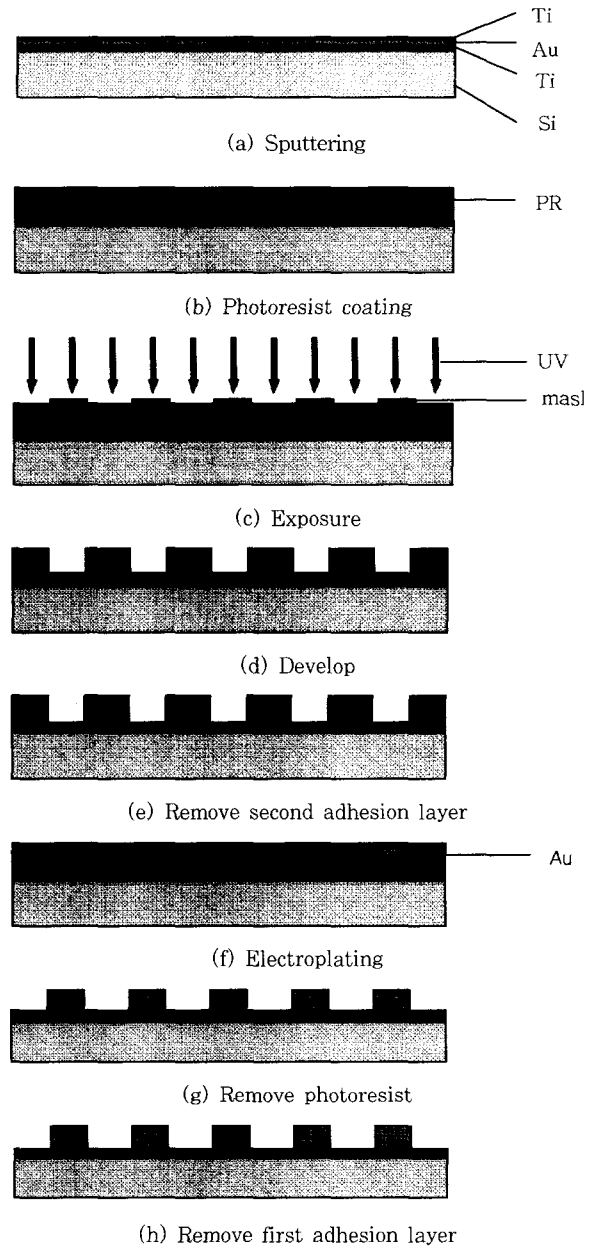


Fig. 3 LIGA-like process

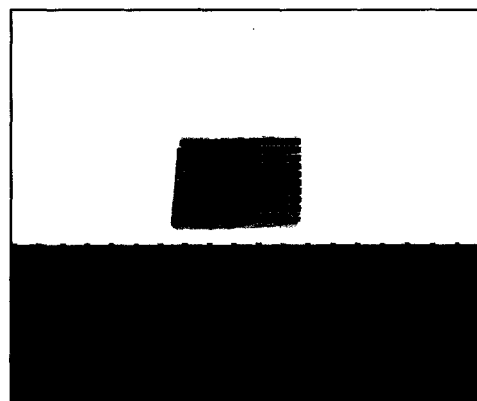


Fig. 4 Fabricated specimen with Au strip bumps

접기와 시편을 고정시키는 지그(jig), 시편을 예열하기 위한 히터(heater), 압력을 측정하기 위한 load cell로 구성된다. 시편의 불순물을 아세톤과 초음파 세정 작업으로 제거하고, 상부와 하부 시편의 Au 범프를 십자형으로 정렬한 상태에서 상부 시편에 압력과 초음파를 가하여 접합부를 형성하였다. 시편을 180℃로 예열한 상태에서 2~4kgf의 하중을 가하고 28kHz의 초음파 진동을 1~1.5초 동안 부가하여 접합부를 형성하였으며, 인장 시험기(INSTRON-5500)를 이용하여 제작된 지그에 시편을 고정시켜 0.1mm/min의 속도로 접합부의 전단 강도를 측정하였다. Au 범프의 변형된 형상을 측정하기 위하여 평면 정밀도 1μm, 깊이 정밀도 1nm인 백색광 주사 간섭계(white-light scanning interferometer) 장비인 Nanosystem사의 Nanoscan E-1000 모델을 사용하였으며, 광학 현미경을 이용하여 접합부 조직을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Al 범프의 압축 실험 결과

Al을 이용한 BP와 CSB 시편에 대한 압축 실험과 CSB 시편에 대한 FEM 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. BP의 경우 (Fig. 6(a)), 접촉면의 마찰로 인하여 범프의 중심부에서 벌징(bulging)이 발생하면서 접촉 면적이 증가하였다. CSB의 경우 (Fig. 6(b)), 범프 간의 접촉면은 말안장 형상으로 변형되었으며, FEM을 이용하여 예측한 변형 형상(Fig. 6(c))과 유사하다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 평면 변형을 조건에 의해 직육면체 범프에서 길이 방향의 변형이 구속

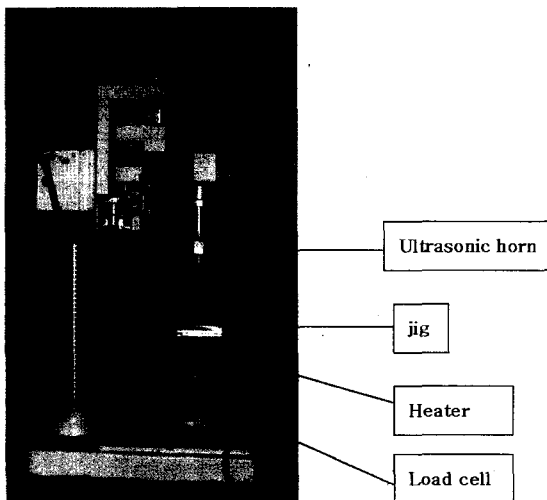
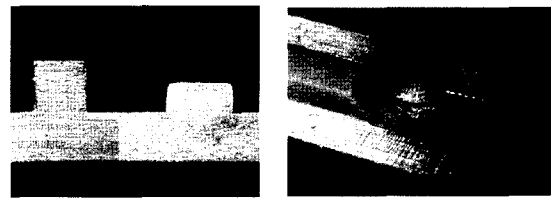
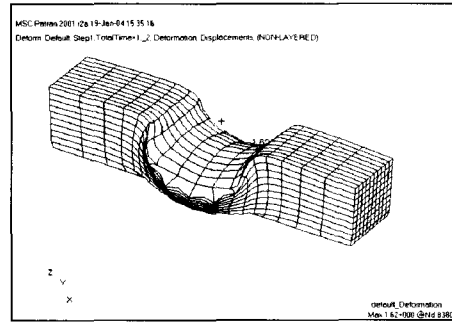


Fig. 5 Ultrasonic bonding system



(a) BP (b) CSB



(c) Deformed CSB bump using FEM

Fig. 6 Deformed bump shapes of Al specimens

되어 주로 폭 방향으로 변형이 발생하고, 폭 방향의 변형은 측면에서 평면 응력 조건에 의해 중심부에서 멀어질수록 변형이 증가하기 때문이다.

압축 실험에 의한 접촉 면적의 증가율을 측정하여 Fig. 7에 나타내었으며, BP에 비해 CSB를 이용한 실험에서 접촉 면적의 증가율이 증가하였다. 그러므로 BP에 비해 CSB를 이용하면 접촉 면적을 증가시켜 양호한 접합부를 형성할 수 있을 것으로 판단된다. CSB를 이용하면 접촉 면적을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 소성 변형된 접합부의 형상이 접합에 영향을 미친다. Fig. 8은 말 안장 형상인 Al 범프의 단면을 나타내며, 초음파에 의해 접촉면에서 발생한 압력은 다음과 같이 수직 응력과 전단 응력으로 접합면에 가해진다.

$$\tau_n = p \cos \theta, \quad \tau_t = p \sin \theta + \tau_y \quad (2)$$

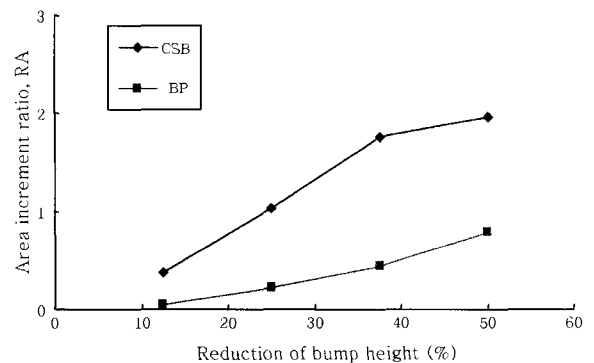


Fig. 7 Comparison of increased area ratio for BP and CSB

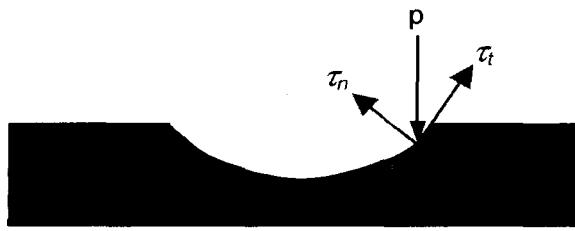
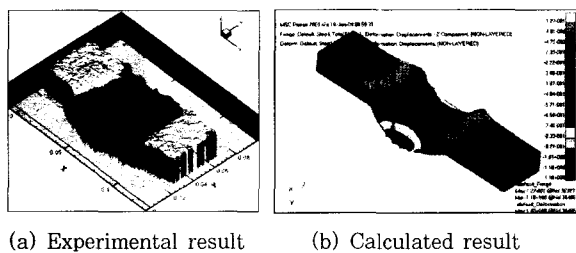


Fig. 8 Normal stress and shear stress on contact surface

이때, 첨자 n 과 s 는 접촉면의 수직(normal)과 접선(tangential) 방향, p 는 압력, θ 는 접합면의 각도, τ_v 는 sticking 조건의 전단 항복응력을 나타낸다. 범프의 소성 변형이 증가할수록 접촉면의 각도 θ 가 커지기 때문에 접선 방향의 전단 응력이 증가하고, 전단 응력에 의해 와이어 본딩의 마찰력과 동일하게 불순물이나 산화막을 제거하는 역할을 하는 것으로 판단된다. 그러므로 기존의 BP 접합에 비해 CSB의 접합 방법은 접합 면적을 증가시킬 뿐만 아니라 접합면의 말안장 형상에 의해 마찰력이 증가하기 때문에 접합 강도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 Au 범프의 초음파 접합 결과

Au CSB의 변형 형상을 측정된 결과와 유한요소법을 이용한 해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Au 범프도 말 안장 형상으로 소성 변형하였으며, 해석과 실험 결과는 비교적 정확하게 일치하였다. Fig. 9(c)는 시편을 180°C로 예열하고 초음파를 1초 동안 가하였을 때, 접합부의 단면 형상을 나타낸다. 범프의 외곽에는 간격이



(a) Experimental result (b) Calculated result



(c) Cross-section of bonded Au CSB (×400)

Fig. 9 Deformed shape and cross-section of Au CSB

있지만 범프의 중심 부근에서는 계면을 구분할 수 없을 정도의 양호한 접합부를 얻을 수 있었다. 변형 형상에 의한 접합 강도의 증가 현상을 검증하기 위하여 CSB 형상의 범프를 180°C로 예열한 조건에서 초음파를 사용하지 않고 압축력만을 가하여 접합 실험을 수행하였다. 이 경우에 접촉면의 변형된 형상은 초음파를 가하는 경우와 유사하지만, 접합력은 매우 낮았다. 그러므로 CSB 형상에서 말 안장 형상의 계면에서 초음파에 의해 발생하는 전단력이 접합에 매우 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다.

Au 접합부의 전단력을 측정된 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 변형의 증가에 따라 접합력이 선형적으로 증가하여 0.1mm 정도의 변위에서 110N의 최대 전단력이 발생하고 접합부의 파단이 발생하였다. 범프당 최대 전단력은 1.1N/bump (=110/100)이고 접합부의 높이를 대략 25μm이라고 하면 파단시 변형율은 4 (=100/25)에 달한다. CSB의 접합부 크기가 대략 80×80μm이기 때문에 최대 전단응력은 170MPa (=1.1/(80×10⁻⁶)²Pa)이며, Au의 전단 항복 강도인 133MPa (=230/√3)보다 높다. 이는 Au 범프의 변형율이 높기 때문에 범프가 변형되면서 전단력이 스트립 전체에 가해지기 때문인 것으로 추정되며, 높은 연신율은 전자 패키징에서 발생하는 열응력에 의한 파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 접합강도에 따른 CSB의 파단면 형상을 나타내며, 파단면에서 매끄러운 면은 접합 강도가 낮은 냉접(cold weld)이 발생한 부위이며, 거친 면은 고상 접합이 발생한 부위를 나타낸다. Fig. 11(a)과 같이 접합강도가 0.2N/bump로 낮은 경우, 파단면은 말안장 형상이고 범프의 중심부는 매끄럽고 외곽은 거칠다. 그러므로 큰 변형이 발생한 범프의 외곽에서 접합부가 발생하지만, 중심부에서는 접합이 이루어지지 않고 이로 인하여 접합력이 감소하였다. Fig. 11(b)는 1.1N/bump

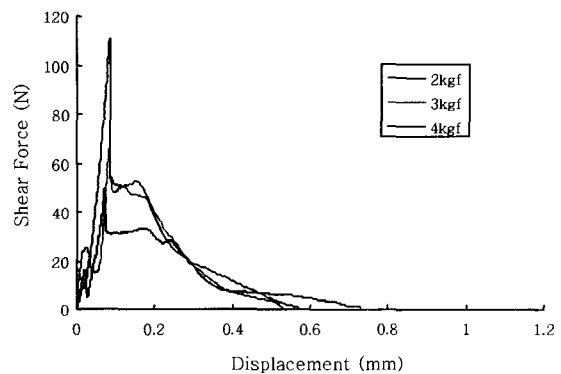


Fig. 10 Measured shear force of Au CSB (aspect ratio=0.46, bonding time=1s)

의 높은 접합강도가 발생한 경우, 전체 파단면이 거칠고 이로부터 접합면의 전체에서 접합이 발생하여 강한 결합이 발생하였다. 이와 같은 결과로부터 초음파에 의한 고상 접합은 큰 변형이 발생하는 범프의 외곽에서 시작하여 중심부로 진전된다.

초음파 접합에서 공정 Au 범프의 종횡비 (0.46, 0.64, 0.76)와 접합 시간, 하중이 접합강도에 미치는 영향을 Fig. 12에 나타내었다. 일반적으로 하중과 접합 시간을 증가시키면 접합강도가 증가하며, 범프의 종횡비가 작을수록 작은 하중과 짧은 접합시간에 높은 강도를 얻을 수 있다. 범프 단면의 종횡비가 작은 0.46인 CSB 형상을 사용하면 접합조건과 무관하게 0.4N/bump 이상의 전단력을 얻을 수 있다. 이와 같은 CSB의 접합

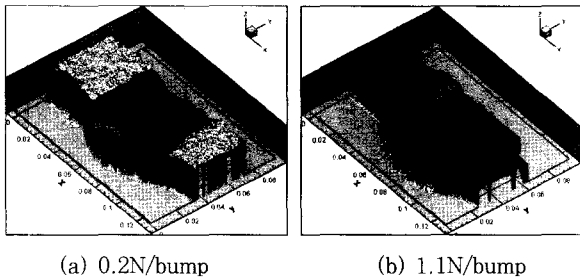


Fig. 11 Fractured surface profile with respect to bond strength

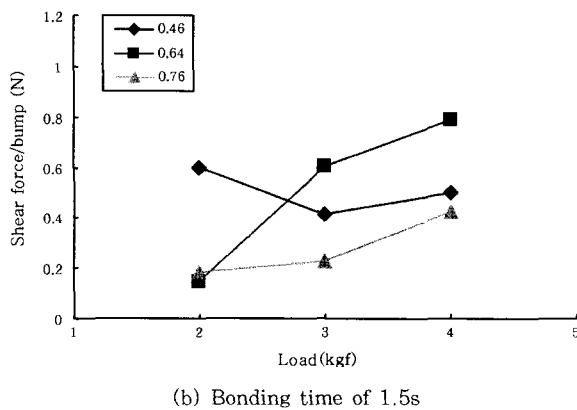
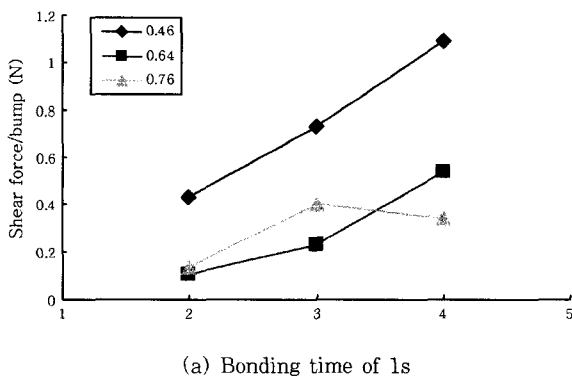


Fig. 12 Effect of bonding parameter on bond strength

강도는 BP를 이용하는 경우의 전단력인 0.023N/bump에 비하여 매우 높고⁴⁾, MIL-STD-883 규격에서 제시한 0.049N/bump를 만족시킨다. 그러므로 스트립 형상의 범프를 사용하여 접합 면적의 증가와 말 안장 형상의 접합면에 발생하는 전단력의 증가에 의해 보다 양호한 접합부를 얻을 수 있으며, 전자 패키징에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

범프의 종횡비가 크면 충분한 범프 변형을 얻기 위해 하중을 증가시키거나 초음파 작용시간을 늘려야 한다. 그러나 범프가 변형하면서 기판과 범프 사이의 접합부에 굽힘 응력이 발생하기 때문에 이 부위에서 접합 품질이 감소하여 Fig. 13에 보인 바와 같이 범프와 기판 사이에서 파단이 발생한다. 이와 같은 범프와 기판 사이의 파단은 범프의 종횡비가 작은 경우에도 하중과 접합 시간이 과도하면 발생한다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 종방향 초음파를 이용한 Au 범프의 접합을 유한요소법을 이용한 해석과 실험을 통하여 분석하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Au CSB를 이용하면 범프가 말 안장 형상으로 소성 변형하였으며, 기존의 BP에 비해 높은 접합 강도를 얻을 수 있다. 이와 같이 말 안장 형상의 접합부에 의해 접합 면적이 증가하고 변형된 접합면에서 마찰력이 증가하여 양호한 접합부가 형성되는 것으로 판단된다.
- 2) 고상 접합은 범프의 외곽에서 시작하여 중심부로 전파된다. 하중과 접합시간이 증가하면 접합강도가 향상시키지만, 과도할 경우 칩에 손상을 주거나 범프와 기판 사이의 접합력을 약화시켜 접합 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다.
- 3) 범프의 단면 종횡비가 증가하면 접합 면적이 증가하지만, 기판과 범프 사이의 접합력을 약화시켜 접합력이 감소한다. 접합조건과 무관하게 범프 단면의 종횡비

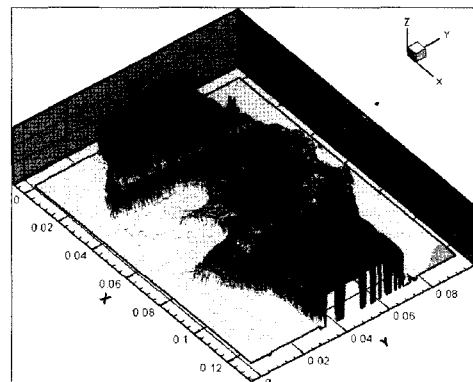


Fig. 13 Fracture at bump and substrate interface

가 0.46 인 경우에 0.4N/bump 이상의 양호한 접합 강도를 얻을 수 있다.

4) 초음파를 가하는 접합 시간이 1초로 매우 짧고 기존의 방법에 비해 높은 접합 강도를 얻을 수 있으므로 전자 패키징에 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 수행되었으며, 시편 제작에 도움을 주신 홍익대학교 김용석 교수님과 측정에 도움을 주신 Nanosystem사의 이형석 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. J. Madou, Fundamentals of Microfabrication, CRC Press, 2002
2. S. Y. Kang and Y. C. Lee, : Yield modeling of MCM assembly with Flip-Chip Thermocompression bonding, IEEE Proc. Multi-Chip Module Conference, Santa Cruz, USA, March, 1992, 68-71
3. S. Y. Kang, T. H. Ja and Y. C. Lee. : Thermosonic Bonding: An Alternative to Area-Array Solder Connections, IEEE Pro. Electronic Components and Technology Conference, Florida, USA, June, 1993, 877-882
4. S. Y. Kang, T. McLaren, W. Zhang and Y. C. Lee, : Thermosonic Bonding for Flip-Chip Assembly, IEEE Proc. Multi-Chip Module Conference, Santa Cruz, USA, Jan, 1994, 75-80
5. S. Y. Kang, P. M. Williams and Y. C. Lee, : Modeling and Experimental Studies on Thermosonic Flip-Chip Bonding, IEEE Trans. on components, packaging, and manufacturing technology-Part B, 18-4, 1995, 728-733
6. C. F. Luk, Y. C. Chan and K. C. Hung, : evelopment of gold to gold interconnection flip chip bonding for chip on suspension assemblies, IEEE Pros. Electronic Components and Technology Conference, 51st, Orlando, USA, May, 2001, 1040 -1044
7. Q. Tan, B. Schaible, L. J. Bond and Y. C. Lee, : Thermosonic flip-chip bonding system with a self-planarization feature using polymer, IEEE Trans. On advanced packaging, 22-3, 1999, 1318-1325
8. Q. Tan, W. Zhang, B. Schaible, Leonard J. Bond, T. H. Ju and Y. C. Lee, : Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration, IEEE Trans. on components, packaging and manufacturing technology-Part B, 21-2, 1998, 53-58
9. J. B. Kim, M. Chiao and L. Lin, : Ultrasonic bonding of In/Au and Al/Al for hermitic sealing of MEMS packaging, IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 15th, 2002, 415-418
10. B. Langenecker, : Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals, IEEE trans. on sonics and ultrasonics, Vol. SU-13, No 1, 1966, 1-8,
11. V. P. Severdenko, V. V. Klubovich and A. V. Klubovich, Ultrasonic rolling and drawing of metals, Consultant Bureau, London, 1972
12. E. G. Thomsen, C. T. Yang and S. Kobayashi, Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing, Macmillan Co., New York, 1965