

다양한 유무연 도금 리드프레임에 적용된 Sn-8Zn-3Bi 솔더 접합부의 열충격 신뢰성 평가

한성원 · 조일제 · 신영의*

중앙대학교 기계공학부

Reliability of Sn-8Zn-3Bi Solder Paste Applied to Lead and Lead-free Plating on Lead-frame under Thermal Shock Test

Sung-Won Han, Il-Je Cho, and Young-Eui Shin*

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Korea

초 록 : Sn-8Zn-3Bi 무연 솔더 페이스트의 접합부 신뢰성 및 적합성을 평가하기 위해 유(SnPb)·무연(Sn, SnBi) 도금된 Cu 리드프레임 QFP(Quad Flat Packager)를 사용하여 열충격 조건 하에서의 인장 강도의 변화 및 파괴 기구에 대한 분석을 실시하였다. 리드 도금의 종류에 상관없이 모든 시험 시편에서 열충격 사이클 수의 증가에 비례하여 접합부의 취성 특성이 강화되어 인장 강도가 감소하는 것을 확인하였다. 하지만, 접합부에는 열팽창 계수의 차이에 의해 야기될 수 있는 미세 균열은 발견되지 않았다. 단면 관찰 및 변위 이력 곡선 분석을 통하여 열충격 사이클 수의 증가에 따른 인장 강도의 감소는 접합부의 파괴 기구의 변화에 기인되었음을 확인하였다. 본 실험을 통해 Sn-3Zn-3Bi 솔더의 유·무연 도금 Cu 리드프레임과의 우수한 작업 특성과 열충격 환경 하에서도 우수한 기계적 접합 특성을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: The pull strength and fracture mechanism were investigated to evaluate the reliability and compatibility of Sn-8Zn-3Bi joints, the solder paste on lead and lead-free plating under thermal shock conditions. At the Sn-8Zn-3Bi solder joint, no crack initiation was observed during thermal shock test. After 1000 cycles, the strength of the solder joint decreased not sharply but reduced gradually compared with initial conditions. The decrement of strength was affected by γ -Cu₅Zn₈ IMC growth which caused the IMC fracture on the fracture surface and a change in fracture mode and initial crack point. Clearly, the Sn-8Zn-3Bi solder shows good reliability properties and compatibility with lead-free plated Cu LF under thermal shock temperatures between 248K and 423K.

Keywords: Sn-Zn-Bi solder, Quad flat package(QFP), Pull strength, Thermal shock, Fracture mode

1. 서

전자 제품 제조에 있어서 가장 중요한 문제 중의 하나인 환경 문제로 기관과 부품과의 접속에 널리 사용되어 왔던 Sn-Pb 솔더를 무연 솔더로 대체하는 것이 강하게 요구되고 있다. 대체 재료로

서 가장 유력한 합금계로서는 Sn-Ag, Sn-Cu계, Sn-Zn계 합금을 들 수 있다.¹⁻³⁾ 특히 Reflow 솔더 링 소재로는 Sn-Ag계 솔더가 실용화의 주류를 이루고 있지만, 전자 부품의 내열화의 진전 속도가 늦어져, 보다 낮은 용점의 무연 솔더가 주목을 받게 되었다.⁴⁻⁹⁾ 용점 및 가격 측면에서 종래의 Sn-

*Corresponding author
E-mail: shinyoun@cau.ac.kr

Pb 솔더에 가장 근접한 솔더인 Sn-Zn계 합금이 주목을 받는 이유가 바로 이런 연유에서 찾을 수 있다.

현재까지 무연 솔더로서 여러 종류의 합금이 제안되었으며 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 실용화를 위해서는 인체에 유해하지 않고, 솔더링 후 접합부의 신뢰성이 우수하여야 하며, 기존의 솔더링 설비로도 대응할 수 있어야만 했다. Sn-Zn계 합금은 Zn 원소의 높은 산화 특성으로 인해 산화 피막형성이라는 문제점이 있으나, 용점이 기존의 Sn-Pb 솔더에 근접하며, 첨가물인 Zn이 인체의 필수 원소로서 유해성이 낮을 뿐만 아니라, 가격 경쟁력에 있어서도 산업 전반에 걸쳐 쓰이는 자원이므로 안정적인 공급체계를 가지고 있다. 또한 재활용성에 있어서도 폐기 후, 휘발 정제법에 의해 고품위의 아연을 분리, 회수 할 수 있는 기술이 확보되어 있어 환경적인 측면에서도 아주 유용하다.⁵⁻⁹⁾

본 연구에서는 이러한 기술환경적으로 우수한 특성을 가지고 있는 저온계 Sn-8Zn-3Bi 무연 솔더 페이스트를 유(SnPb) 무연(Sn, SnBi) 도금된 Cu 리드프레임의 Quad Flat Package(QFP)에 적용하여 솔더 접합부의 신뢰성 고찰을 위해 초기 접합 형상 및 단면 관찰을 통해 작업성 평가를 실시하였다. 또한 솔더 접합부의 신뢰성 확보를 위해 열충격 환경하에서의 접합부 인장 강도의 변화 및 파괴 기구 분석을 수행하여 Sn-8Zn-3Bi 무연 솔더 적용의 타당성을 실험을 통하여 검토하였다.

2. 시험방법

시험 시편으로는 Cu 리드프레임(Lead-frame: LF)이 각각 유연 도금인 Sn-15Pb와 무연도금인 Sn, Sn-3Bi로 도금 처리된 0.5mm pitch QFP를 사용하였다. 시험에 사용된 PCB(FR-4)는 immersing 방식을 사용하여 약 0.45 μm 두께로 Sn으로 표면 처리를 하였다. 시편의 접합 재료로는 A사에서 생산된 Sn-8Zn-3Bi 무연 솔더 페이스트를 사용하였으며, 리플로우 조건은 예열온도 423~443K, 예열 시간 45~55초, 용점이상 유지 시간 65~75초로 실시하였다.

리플로우 공정을 마친 시편은 Sn-8Zn-3Bi 솔더 페이스트의 작업성 평가를 위해 솔더 접합부의 필

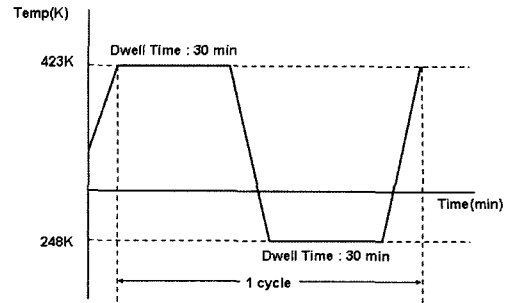


Fig. 1. Thermal shock condition

렛 형상 및 접합부 광택 등의 외관 관찰을 실시하였으며, 단면 관찰을 통해 내부 보이드 발생 유무 및 접합 단면의 형상을 관찰하였다. 외관 관찰 및 단면 관찰을 거친 시편은 솔더 접합부의 기계적 신뢰성 평가를 위해 열충격 시험을 실시하였다. 열충격 시험은 솔더 접합부의 신뢰성 평가의 중요한 항목이며, 일반적으로 전자 제품의 사용자 작동과 정지 상태가 반복하면서 발생하는 가열-냉각의 열 이력을 가속화시킨 시험 방법이다.¹⁰⁾ 열충격 시험 조건은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 248K/423K의 시험 조건으로 각 온도에서 30분씩 유지하여 한 사이클당 1시간으로 실시하였다. 열충격 시험 횟수는 1000 사이클까지 행하였으며 500 사이클마다 시료를 채취하여 접합부의 기계적 특성을 평가하였으며, 단면 관찰 분석을 통해 접합부 내부의 균열 발생 유무를 확인하였다. 솔더 접합부의 기계적 특성 평가는 JIS-3198에 의거하여 200 $\mu\text{m/s}$ 의 인장 속도로 45° QFP 인장 시험을 실시하였다. 또한 파괴 기구 고찰과 금속학적 특성 평가를 위해 디지털 광학현미경(K社 VK-1000)을 이용한 파면 분석과 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM)을 통한 파단면 관찰을 실시하였다. 파면 및 파단면의 금속간 화합물 분석은 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)와 EPMA(Electron Probe Micro Analysis)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 솔더 접합부 외관 및 단면 관찰

Figs. 2, 3에는 각각 리플로우 직후의 솔더 접합부의 외관 및 단면 관찰 모습을 나타내었다. 외관

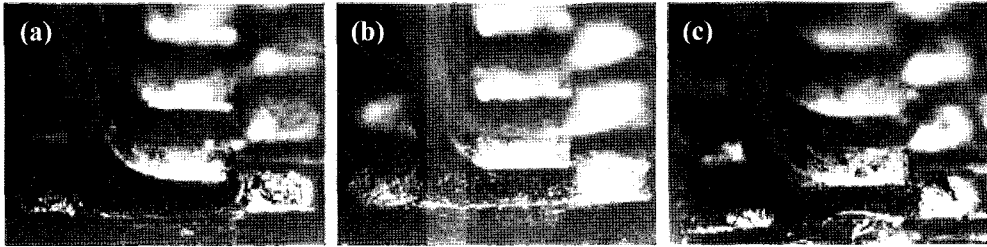


Fig. 2. The appearance of Sn-8Zn-3Bi solder joint. (a) Sn plating on Cu LF (b) SnBi plating on Cu LF (c) SnPb plating on Cu LF.

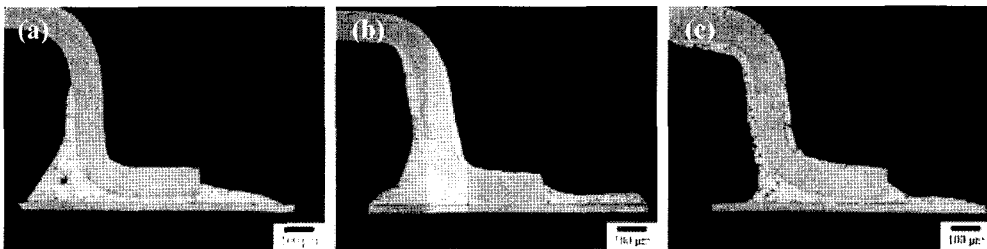


Fig. 3. The cross section of Sn-8Zn-3Bi solder joint. (a) Sn plating on Cu LF (b) SnBi plating on Cu LF (c) SnPb plating on Cu LF.

관찰 결과, 모든 리드 도금 조건에서 리드 끝단의 필렛(fillet)이 매끈하게 형성되었으며 솔더가 패드 끝까지 잘 퍼져 있는 것을 확인하였다. 일반적으로 Sn-8Zn-3Bi 솔더는 SnPb, SnAgCu계 솔더에 비해 퍼짐성이 떨어지는 것으로 알려져 있다.¹¹⁻¹³⁾ 이러한 퍼짐 불량으로 인해 불량한 필렛각의 형성 및 패드 노출 등의 결함을 갖는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 본 실험에서는 우수한 필렛각과 패드 끝단까지 솔더가 잘 덮혀 있어 작업 불량률의 결함은 관찰되지 않았다.

접합부 단면 관찰 결과, SnPb 리드 도금이 Sn 및 SnBi 리드 도금에 비해 다소 완만한 필렛 각을 형성하고 있었으나 모든 리드 도금에서 필렛 형상 규격(IPC-A-610D, J-STD-001C) 대비 양호함을 확인할 수 있었다. 또한, 모든 단면부에서 보이드(void) 관리기준(접합부 면적의 30% 이하) 대비 양호한 보이드 발생 빈도를 확인할 수 있었다. 필렛각의 차이로 단면 가공된 솔더 접합부의 접합 면적에서 SnPb(15700 μm^2) 리드 도금이 Sn(2671 μm^2) 및 SnBi(27860 μm^2) 리드 도금에 비해 15% 가량 낮은 단면적을 갖는 것을 확인할 수 있었다. SnPb 리드 도금은 Sn-8Zn-3Bi 솔더 페이스트 내의 Bi와 SnPb 도금된 리드 계면의 풍부한(rich) Pb로

인해 리드 계면에는 Sn-Bi-Pb 삼원계-공정 반응이 일어나게 되며, 이로 인해 리드의 Cu와 솔더 내의 Sn의 반응이 활성화되어 Cu-Sn간 금속간 화합물이 급격하게 성장하여 낮은 필렛각을 형성하고 시효 처리 후에는 접합 강도가 급격히 감소되는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁻¹⁵⁾

3.2 인장 강도와 변위 이력 곡선

솔더 접합부의 기계적 특성 평가를 위해 인장 강도를 측정된 결과, SnPb 리드 도금의 초기 접합 강도가 Sn 및 SnBi 리드 도금에 비해 30% 가량 낮은 강도값을 나타내었다. 이는 Sn 및 SnBi 리드 도금의 힐(heel)부분 솔더 면적에 비해 15% 가량 작은 SnPb 리드 도금의 힐부분 솔더 면적에 의한 영향으로 판단된다. 45° QFP 인장 시험에서는 솔더 접합부의 힐 부분에 응력이 집중되게 되므로 힐부분의 솔더량은 인장 강도와 직접적으로 연관된다고 할 수 있다. 열충격 사이클의 수가 증가함에 따라 Sn 및 SnBi 리드 도금의 경우 15% 정도의 강도 저하현상이 발생하였으며, SnPb 리드 도금의 경우에는 5% 내외로 강도 변화값이 상대적으로 작았다. 다만, Fig. 4에 표기된 QFP 인장 시험의 오차 범위를 고려해볼때, 15%의 강도 저하는 솔더

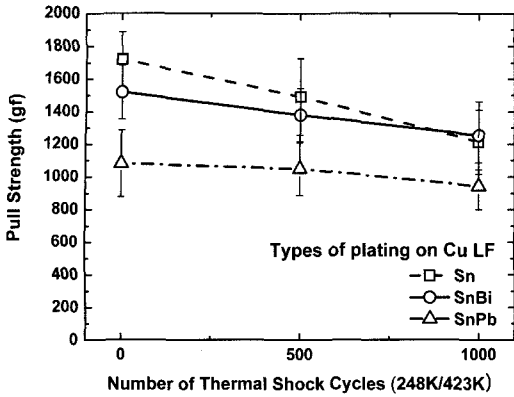


Fig. 4. Pull strength of the Sn-8Zn-3Bi solder joint under thermal shock cycles.

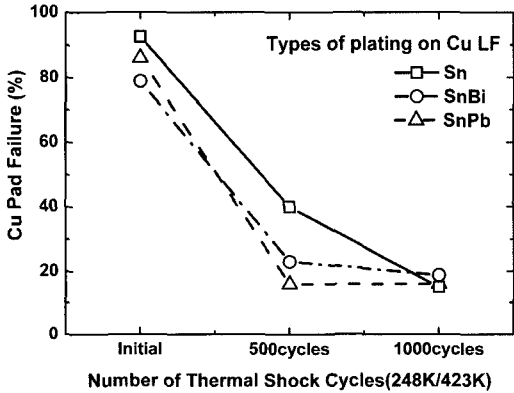


Fig. 5. The Cu pad failure rate during 45° QFP pull test.

접합부의 급격한 강도 저하 현상으로 판단하기는 힘들다고 할 수 있다. SnPb 리드 도금은 Bi가 함유된 솔더 페이스트를 적용할 경우, 리드 계면에 Cu-Sn간 금속간 화합물(Cu₆Sn₅)이 과도하게 성장하여 시효 시험 후에 급격한 강도 저하가 발생하는 것으로 알려져 있다.^{14,15)} 이로 인해, Sn-8Zn-3Bi 솔더 페이스트와의 작업성도 좋지 않은 것으로 알려져 있으나, 본 시험에서는 열충격 1000 사이클 이후에도 급격한 강도 저하는 발생하지 않았다.

솔더 합금의 인장 분포는 일반적으로 탄성 구간, 소성 변형 경화 구간, necking) 구간으로 구성된다. 본 실험에서 실시한 45° QFP 인장 시험의 경우에는 솔더 접합부의 최외곽인 힐부분에 응력이 집중되어 소성 변형이 일어나게 된다. 인장 강도는 재료의 항복점 이후, necking 현상이 발생할 때

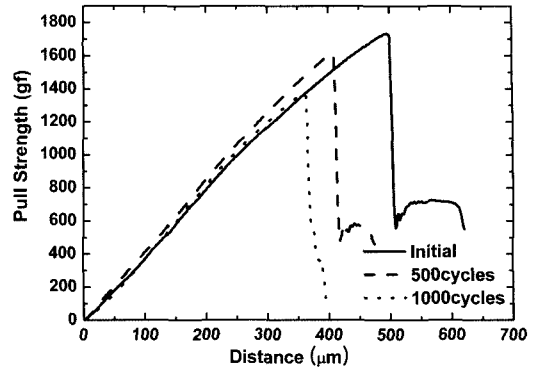


Fig. 6. Pull strength-displacement hysteresis curve from the number of thermal shock cycles (Sn plating on Cu LF).

까지 단면적의 감소로 인하여 계속 증가되나, 극한 응력이 일어나는 인장 강도 최대 지점 이후, 점차적으로 감소하여 파단에 이르게 된다.

Fig. 6에는 Sn 리드 도금의 열충격 사이클 수의 증가에 따른 인장 강도와 변위의 이력 곡선을 나타내었다. 인장 강도와 변위 이력곡선 분석 결과, 초기 시편이 네킹 후 최종 파단까지의 변위가 가장 길었다. 열충격 사이클의 횟수가 증가함에 따라 최종 파단까지의 변위가 감소하는 하였으며, 초기 시편과 500 사이클에서는 두 번의 급격한 인장 강도 감소 구간을 가지고 있으나 1000 사이클에서는 최대 인장 강도 지점 이후 급격한 단면적 감소에 의한 인장 강도의 감소 경향을 확인할 수 있다. 열충격 사이클의 수가 증가함에 따라 변위가 점차 감소하는 것은 열충격 사이클의 수가 증가함에 따라 솔더 접합부의 Sn 결정이 조대화되고 접합 계면에 생성되는 금속간 화합물이 성장하여 솔더 접합부의 취성 특성이 강화되었기 때문이다. 따라서, 인장 강도 측정 시 응력이 가장 많이 집중되는 힐 부분의 솔더 도포량이 많은 Sn 및 SnBi 리드 도금의 경우에는 SnPb 리드 도금에 비해 접합부 솔더의 취성화에 따른 강도 저하 현상이 두드러지게 발생한 것으로 판단된다.

3.3 파면 분석 및 파괴 기구

Sn-8Zn-3Bi 솔더 접합부의 파괴 기구에 대한 분석을 위해 디지털 광학 현미경 및 주사전자 현미경을 이용하여 파면 분석을 실시하였다. 초기 시편에서는 80% 이상의 샘플에서 Cu 패드에서 파괴

가 발생하였으나, 열충격 사이클의 수가 증가함에 따라 Cu 패드에서 파괴가 발생하는 비율은 점차 감소하였으며 1000 사이클 이후에는 전체 샘플의 10% 정도에서만 Cu 패드에서 파괴가 발생하였다. 이는 열충격 사이클의 수가 증가함에 따라 솔더 접합부의 파괴 기구가 변화되었음을 의미한다. 일반적으로 Sn-8Zn-3Bi 솔더는 Bi 원소의 영향으로 인해 Sn-Pb계 솔더에 비해 상대적으로 우수한 기계적 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.^{6,8,14)} 이로 인해 초기 시편의 경우에는 Sn-8Zn-3Bi 솔더 접합부의 높은 강도 특성으로 인해 솔더 내부 및 솔더와 패드 계면이 아닌 Cu 패드 부근에서 균열이 발생하여 파괴가 진행된 것으로 판단된다. 반면, 열사이클의 횟수가 증가함에 따라 Fig. 6의 인장 강도와 변위 이력 곡선에서 알 수 있듯이, 솔더 접합부의 취성 특성이 강화되어 균열의 발생 위치가 Cu 패드에서 솔더 내부로 이동한 것으로 판단된다. 또한, Cu 패드에서의 파괴 비율이 리드 도금의 종류에 관계없이 동일한 감소 경향을 나타내는 것은 인장 시험에 의해 응력이 집중되어 균열이 발생하는 위치가 리드쪽이 아닌 솔더 내부와 Cu 패드쪽이기 때문이다. 이를 통해, 인장 시험의 파괴 기구에서는 리드 계면보다는 패드 계면에서 생성되어 성장하는 금속간 화합물의 영향이 더욱 크다는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 7 및 8에는 Sn 및 SnBi 리드 도금의 파면의 미세 구조를 나타내었다. 인장 시험에서 균열

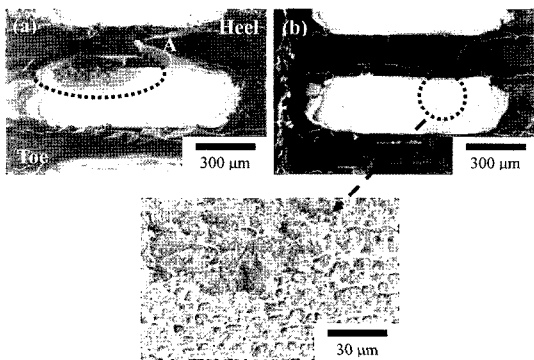


Fig. 7. The fracture surface of solder joint (Sn plating on Cu LF). (a) After 500 cycles (b) After 1000 cycles (c) The magnified fracture surface after 1000 cycles.

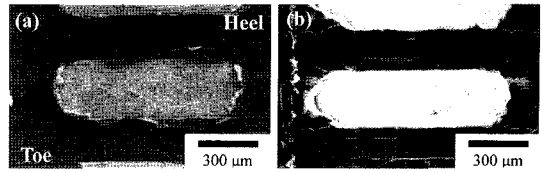


Fig. 8. The fracture surface of solder joint (SnBi plating on Cu LF). (a) After 500 cycles (b) After 1000 cycles.

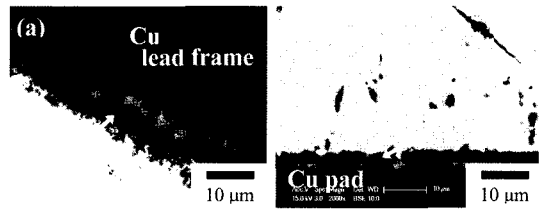


Fig. 9. Cross section micrographs of Sn-8Zn-3Bi solder joint (Sn plating on Cu LF). (a) Lead frame area (b) Cu pad area

은 솔더 접합부의 힐부분에서 시작되어 토우(toe) 쪽으로 진전하게 된다. Fig. 7(a)에 원으로 표시되어 있는 검은 영역(A부분)은 EDS 분석 결과, Cu 조성이 풍부한(rich) 영역으로 확인되었다. 열충격 500 사이클의 파면에서는 다수의 시편에서 이러한 검은 영역이 관찰되었으며 이는 Fig. 5의 Cu 패드에서 발생하는 파괴의 비율과 동일한 결과임을 확인할 수 있다. 열충격 1000 사이클 후의 파면에서는 500 사이클의 파면에서 관찰되었던 검은 영역은 관찰할 수 없었으며, EPMA를 통한 파면의 정량 분석을 통해 Cu-Zn간 금속간화합물 γ -Cu₅Zn₈이 성장한 것을 확인할 수 있었다. 즉, 열충격 사이클의 횟수가 증가함에 따른 인장 강도의 감소와 인장 강도-변위 이력 곡선의 변화는 솔더 접합부의 취성화와 접합부 계면에 성장하는 γ -Cu₅Zn₈로 인한 파괴 기구의 변화에 의한 것임을 확인하였다.

Fig. 9에는 열충격 1000 사이클 후의 접합부의 단면부의 미세구조 관찰 결과를 나타내었다. Fig. 9(a)는 Sn 도금 리드와 솔더와의 계면을 관찰 결과이며, Fig. 9(b)는 Cu 패드와 솔더 계면의 관찰 결과이다. 리드 및 Cu 패드와 솔더의 계면에서 공통적으로 γ -Cu₅Zn₈이 성장한 것을 확인할 수 있다. 인장 시험의 파괴 기구를 고려할 때, Fig. 7의 파면에서 검출된 γ -Cu₅Zn₈은 Fig. 9(b)에서 관찰된 Cu 패드와 솔더 사이에 성장한 γ -Cu₅Zn₈임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 열충격 환경 하에서의 Sn-8Zn-3Bi 접합부의 신뢰성과 다양한 리드 도금과의 작업 적합성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SnPb 리드 도금의 경우에는 Sn-8Zn-3Bi 솔더 적용시 낮은 필렛각 및 필렛 형상으로 인해 Sn 및 SnBi 리드 도금에 비해 20% 가량 낮은 초기 접합 강도값을 갖는 것으로 확인되었다.

(2) 열충격 1000 사이클 후에도 리드 도금의 종류에 상관없이 모든 솔더 접합부에서 균열은 발생하지 않았다.

(3) 열충격 사이클 횟수가 증가함에 따라 솔더 접합부의 인장 강도는 점차 감소되었으며, 이는 접합부의 파괴 기구의 변화에 기인됐음을 Cu 패드에서의 파괴 비율 분석과 파면의 미세구조 분석을 통해 확인하였다.

(4) 열충격 환경 하에서 Sn-8Zn-3Bi 솔더 접합부는 안정적인 파괴 거동 및 Sn, SnBi, SnPb 도금 QFP와의 우수한 초기 접합 특성 및 열충격 특성 평가를 실험을 통하여 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. RoHS Regulations (UK) Government Guidance Notes, (2005)
2. S. Ganesan and M. Pecht, "Lead-Free Electronics", John Wiley Publishing, New York (2006).
3. J. H. Lau, "Solder Joint Reliability", Van Nostrand Reinhold, New York (1991).
4. W. J. Plumbridge, "Long term mechanical reliability with lead-free solders", Surface Mount Technology, 16, 13, (2004).
5. B. Richards, C. L. Levogner, C. P. Hunt, K. Nimmo, S. Peters and P. Cusack, "Lead-free Soldering - An Analysis of the Current Status", DTI(1999).
6. M. Abtey and G. Selvaduray, "Lead-free solders in microelectronics", Materials Science and Engineering: R: Reports, 27, 95, (2000).
7. S. Katsuki, "Advances in lead-free electronics soldering" Curr Opin Solid State Mater Sci, 5(1), 55, (2001).
8. K. K. Sung and K. S. Armit, "Lead(Pb)-free solders for electronic packing". J Electron Mater, 23(8), 701, (1994)
9. R. K. Shiue, L. W. Tsay, C. L. Lin et al, "The reliability study of selected Sn-Zn based lead-free solders on Au/Ni-P/Cu substrate", Microelectron Reliability, 43(3), 453, (2003).
10. Rao R. Tummala, "Fundamental of Microsystems Packaging", McGraw-Hill (2001).
11. H. Iwanishi, T. Hojo, A. Hirose, and K. F. Kobayashi, "Microstructure and soldering properties of CSP solder joints using Sn-Zn-Bi solder", Kohala Coast, HI, USA, 87, (2003).
12. M. N. Islam and Y. C. Chan, "Wetting and interfacial reactions of Sn-Zn based lead-free solder alloys as replacement of Sn-Pb solder", Shanghai, China, 178, (2005).
13. Y. Chonan, T. Komiyama, J. Onuki, R. Urao, T. Kimura, and T. Nagano, "Influence of P content in electroless plated Ni-P alloy film on interfacial structures and strength between Sn-Zn solder and plated Au/Ni-P alloy film", Mater. Trans, 43, 1887, (2002).
14. H. Iwanishi, A. Hirose, T. Imamura, K. Tateyama, I. Mori, and K. F. Kobayashi, "Properties of quad flat package joints using Sn-Zn-Bi solder with varying lead-plating materials", San Diego, CA, USA, 1540, (2003).
15. A. Hirose, T. Fujii, T. Imamura, and K. F. Kobayashi, "Influence of Interfacial Reaction on Reliability of QFP Joints with Sn-Ag Based Pb Free Solders", Mater. Trans, 42, 794, (2001).