Sn-Ag-Cu-In 4원계 무연솔더 조인트의 고속 전단 특성

김주형 · 현창용[†]

서울과학기술대학교 신소재공학과

High-Speed Shear Test Characterization of Sn-Ag-Cu-In Quaternary Solder Joint

Ju-Hyung Kim and Chang-Yong Hyun[†]

Department of Materials Science & Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232
Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(2014년 6월 3일 접수: 2014년 6월 25일 수정: 2014년 6월 26일 게재확정)

초 록: 본 연구에서는 고속 전단시험의 변형속도를 500 mm/s로 설정한 상태에서 Sn-Ag-Cu계(Sn-1.0wt.%Ag-0.5Cu 및 Sn-4.0Ag-0.5Cu)뿐만 아니라 4종의 4원계 Sn-Ag-Cu-In 조성(Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In, Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In)을 포함하는 무연 솔더 접합부의 솔더링 직후 및 시효 시간에 따른 파면 생성 결과, 접합강도 및 접합부 파괴에너지값의 변화를 측정, 비교해 보았다. 그 결과, 리플로우 솔더링 직후 및 125°C에서의 500 시간 시효까지 주로 연성 파괴모드 및 준연성 파괴모드가 관찰되었으며, 준연성 파괴모드의 발생 빈도를 분석할 때 고속 전단조건에서 상용 무연 솔더 조성인 Sn-3.0Ag-0.5Cu 이상의 연성파괴 특성을 나타내는 것으로 파악되었다. 또한 4원계 무연 솔더 조인트는 평균적으로 Sn-Ag-Cu계 조성 수준의 파단에너지값을 나타내었는데, 약 100 시간의 시효 후 최고의 파단에너지값이 관찰되었으나 500 시간의 시효 후에는 파단에너지값의 확연한 감소가 관찰되어 500 시간의 시효 시점부터 솔더 접합 계면부의 신뢰성 감소가 가속화되는 경향을 관찰할 수 있었다.

Abstract: With Pb-free solder joints containing Sn-Ag-Cu-based ternary alloys (Sn-1.0 wt.%Ag-0.5Cu and Sn-4.0Ag-0.5Cu) and Sn-Ag-Cu-In-based quaternary alloys (Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In, and Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In), fracture-mode change, shear strengths, and fracture energies were observed and measured under a high-speed shear test of 500 mm/s. The samples in each composition were prepared with as-reflowed ones or solid-aged ones at 125°C to 500 h. As a result, it was observed that ductile or quasi-ductile fracture modes occurs in the most of Sn-Ag-Cu-In samples. The happening frequency of a quasi-ductile fracture mode showed that the Sn-Ag-Cu-In joints possessed ductile fracture properties more than that of Sn-3.0Ag-0.5Cu in the high-speed shear condition. Moreover, the Sn-Ag-Cu-In joints presented averagely fracture energies similar to those of Sn-Ag-Cu joints. While maximum values in the fracture energies were measured after the solid aging for 100 h, clear decreases in the fracture energies were observed after the solid aging for 500 h. This result indicated that reliability degradation of the Sn-Ag-Cu-In solder joints might accelerate from about that time.

Keywords: Sn-Ag-Cu-In, Pb-free solder, high-speed shear test, fracture mode, fracture energy

1. 서 론

Sn-Ag(1.0 ≤ wt.% ≤ 1.2)-Cu-In 4원계 무연(Pb-free) 솔더 조성은 대표 무연 솔더 조성인 Sn-3.0(wt.%)Ag-0.5Cu 에 비해 저렴한 합금 가격에도 불구하고, 이 조성에 버금가는 젖음성(wettability) 특성 및 열싸이클링(thermal cycling) 특성을 나타내는 것으로 평가된 바 있다.¹⁻⁴⁾ 아울러 극미량의 추가 합금원소의 첨가에 따라 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성

에 비해서도 훨씬 우수한 충격신뢰성 특성을 나타내는 것으로 평가되어 향후 자동차 전장용 등의 상용 솔더 조성으로의 적용이 기대된다.⁵⁻⁸⁾

솔더 조인트(joint)의 전단 시험은 오랜 시간동안 솔더링 특성(solderability)을 평가하는 가장 간단하고 기본적인 시험법으로 사용되어 왔다.⁹⁻¹⁵⁾ 그러나 솔더링 직후 정상적인 솔더 조인트의 일반적인 전단 시험결과는 솔더 내 파면을 형성하면서 솔더 재료 자체의 기계적 물성이 측

[†]Corresponding author
E-mail: cyhyun@seoultech.ac.kr

© 2014, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정되므로 솔더링 공정의 적절성 이외의 정보를 제공하지 못하는 단점이 있었다.^{9,14)} 이에 비해 최근에 실시되고 있는 고속 전단 시험법은 솔더부 자체의 소성변형 효과를 억제시키면서 실제 접합 계면부에도 부분적으로 응력을 가해줄 수 있기 때문에 솔더 재료의 조성 및 계면 금속간 화합물(intermetallic compound, IMC) 반응층 두께 조합에 따라 IMC 층이 연루된 취성 파면이 관찰될 수도 있다.^{11-13,15)} 따라서 취성 파면 형성에 대한 솔더 합금 및 IMC 층의 영향성 평가결과는 지속적으로 이슈가 되고 있는 보드 레벨(board-level) 상 솔더 조인트의 낙하 신뢰성(drop reliability) 결과 예측에 적용될 수 있다는 보고가 최근 들어 제시되고 있다. 일례로, Song 등은 솔더 범프(bump)의 전단(shear) 및 견인(pull) 테스트를 다양한 시효 샘플에 대해 다양한 변형속도 조건으로 실시한 결과를 추출하여 보드 레벨에서의 낙하 신뢰성 실험결과와 연계시켜보았는데, 이중 500 mm/s의 변형속도에서 측정된 결과들은 낙하 신뢰성 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것을 제시한 바 있다.¹¹⁾ 솔더 조인트의 낙하 신뢰성 시험이 많은 비용 및 시간을 소모하는 난이도 높은 시험임을 고려할 때, 솔더 조인트의 고속 전단 시험에 의한 낙하 신뢰성 결과 예측은 학문적인 관점뿐만이 아니라 산업적 관점에서도 매우 필요한 연구 내용으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 고속 전단시험의 변형속도를 500 mm/s로 설정한 상태에서 Sn-Ag-Cu계뿐만이 아니라 Sn-Ag-Cu-In의 4원계 조성을 포함하는 다양한 무연 솔더 접합부의 솔더링 직후 및 시효 시간에 따른 파면 생성 결과, 접합강도 및 접합부 파괴에너지(fracture energy)값의 변화를 측정, 비교해 보았다.

2. 실험 방법

2종의 Sn-Ag-Cu계(Sn-1.0Ag-0.5Cu 및 Sn-4.0Ag-0.5Cu) 대표 무연 솔더 조성과 4종의 Sn-Ag-Cu-In계 무연 솔더 조성(Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In, Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In) 등 총 6종의 솔

더 합금을 정밀 주조한 뒤, 이를 직경 450 μm 의 솔더볼로 제조하였다.

제조된 솔더볼은 electroless Ni-immersion Au(ENIG) 표면처리된 기판 상 직경 500 μm 패드(pad)에 리플로우(reflow) 솔더링되었다. 솔더링을 위한 플럭스로는 water soluble 타입(WF6063M5, Senju Metal)을 사용하였으며, 리플로우 솔더링을 위한 온도 프로파일(profile)은 피크(peak) 온도가 약 242°C였고 용융구간은 약 60 초간 지속되었다(Fig. 1).

범프 형태의 솔더 조인트는 각 조성별로 125°C에서 100, 300, 500 시간동안 가열하며 고상 시효(aging)되었다. 조성별 및 시효시간별로 준비된 솔더 조인트는 고속 전단시험을 실시하였다. 고속 전단시험기로는 Dage 4000HS 장비를 사용하였으며, 접합부를 기준으로 50 μm 를 띄운 후 500 mm/s의 속도로 전단시험을 실시하였다. 각 조건별로 20번의 전단시험을 실시한 후, 이들 결과를 파면 형성 특성, 파면부별 접합강도값, 파면부별 파괴에너지값 측면에

Fig. 2. Schematics showing (a) an as-reflowed sample and high-speed shear testing.

Fig. 1. Temperature profile for a reflow soldering process used in this study.

서 통계처리 하였다. 범프 형태의 솔더 조인트 및 고속 전단시험법의 모식도는 Fig. 2로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 본 시험에서 관찰된 대표 파단면의 예를 나타낸다. Fig. 3(a)는 대표적인 연성(ductile) 파단 형태를 나타내는데, 본 연구에서 연성 파괴는 파면 상에 IMC 층 파단면이 전혀 관찰되지 않는 경우로 정의하였다. 또한 Fig. 3(b)는 대표적인 준연성(quasi-ductile) 파단 형태를 나타내는데, 본 연구에서 준연성 파괴는 파면 상에 IMC 층 파단면이 1~30% 수준으로 존재할 경우로 정의하였다. 아울러 Fig. 3(c)는 대표적인 준취성(quasi-brittle) 파단 형태를 나타내는데, 본 연구에서 준취성 파괴는 파면 상에 IMC 층 파단면이 30~60% 수준으로 존재할 경우로 정의하였다. 마지막으로 취성 파괴는 파면 상에 IMC 층 파단면이 60%

를 초과하는 수준으로 존재할 경우로 정의하였다.

Fig. 4는 리플로우 직후 및 125°C에서 특정시간 동안의 시효 직후 고속 전단시험 시 관찰되는 파면의 발생 빈도를 솔더 종류별로 집계한 결과이다. 2종의 Sn-Ag-Cu계 대표 무연 솔더 조성의 경우 잘 알려진 바와 같이 첨가 Ag 양의 증가에 따라 취성이 강해지면서 파면 상에서 IMC 층 파단면의 노출 비율이 증가되는 양상이 관찰되었다. 그 결과로 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성에서는 시효조건에 관계없이 100% 연성 파괴만이 관찰되었으나, Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성에서는 준연성 파괴도 빈번히 관찰되었다. 그러나 그 준연성 파괴의 정도는 시효시간이 증가에 따른 경향을 나타내지 않았다.

한편 4종의 Sn-Ag-Cu-In계 무연 솔더 조성의 경우 모든 조건에서 연성 파괴모드 및 준연성 파괴모드가 관찰되어 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성보다는 증가된 취성파괴 양상을 나타내었다. 그러나 Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In 조성을 제외한 Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In 및 Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In 조성은 전체적으로 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성보다는 준연성 파괴모드의 발생빈도가 감소하여 취성이 적어졌음을 확인할 수 있었다. 또한 Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In 및 Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In 조성은 시효시간의 증가에 따라 준연성 파괴모드의 발생빈도가 대체적으로 증가하였으나, Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In 조성은 시효시간의 증가에 따라 준연성 파괴모드의 발생빈도가 감소하면서 안정화되는 독특한 거동을 나타내었다. 한편 Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In 조성은 시효시간의 증가에 따라 준연성 파괴모드의 발생빈도가 감소하는 경향을 나타냈으나, 300 h의 시효 시간부터는 준취성 파괴모드까지 관찰되기 시작하여 취성파괴의 위험성은 더욱 증가되는 결과가 관찰되었다. 이상의 결과를 종합할 때, Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In 및 Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In 조성은 상용 무연 솔더 조성인 Sn-3.0Ag-0.5Cu 이상의 연성파괴 특성을 나타내는 것으로 파악되며, Sn-Ag-Cu-In 4원계 조성에서 Ag의 함량이 1.2 wt.% 이상이고 In의 함량이 0.6 wt.% 이상일 때 취성파괴 경향이 크게 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5는 리플로우 직후 및 125°C에서 특정시간 동안의 시효 직후 고속 전단시험 시 관찰되는 파면별 전단강도값을 솔더 종류별로 집계한 결과이다. 평균적으로 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성이 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성보다 높은 전단강도값을 나타내었는데, 이는 일차적으로 Ag 함량 증가에 따른 합금 자체의 석출강화 효과로 분석되었다. 그러나 2종의 Sn-Ag-Cu계 무연 솔더 조성 모두 시효시간에 따른 특별한 경향은 나타내지 않았다. 또한 준연성 파괴모드가 관찰된 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성의 경우 연성 파괴모드에서의 평균 전단강도값이 준연성 파괴모드에서의 평균 전단강도값보다 다소 높은 경향이 관찰되었다.

한편 4종의 Sn-Ag-Cu-In계 무연 솔더 조성의 경우 평균적으로 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성보다 낮은 전단강도값을

Fig. 3. Representative fracture modes observed in this study: (a) ductile, (b) quasi-ductile, and (c) quasi-brittle mode.

Fig. 4. Failure mode portions produced with different alloy types: (a) Sn-1.0Ag-0.5Cu, (b) Sn-4.0Ag-0.5Cu, (c) Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, (d) Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In, (e) Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In, (f) Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In.

나타내었는데, 이 역시 Ag 함량 감소에 따른 결과로 판단되었다. 또한 Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In 조성을 제외한 Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In 및 Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In 조성은 시효시간이 증가함에 따라 평균 전단강도값이 감소하는 경향을 나타내었다. 한편 4원계 조성의 경우에서도 대체적으로 연성 파괴모드보다는 준연성 파괴모드가, 준연성 파괴모드보다는 준취성 파괴모드가 상대적으로 낮은 평균 전단강도값을 나타내었는데, 특히 준취성 파괴모드는 눈에 띄게 낮은 평균 전단강도값을 나타내었다. 이러한 경향은 준취성 파괴모드에서 대부분의 파면을 차지하는 IMC 파면이 금속 합금의 특성이 아닌 금속간 화합물의 특성을 나타내어 외부 응력 노출 시 신속한 크랙(crack)의 전파를 야기시키기 때문으로 분석되었다.

Fig. 6은 리플로우 직후 및 125°C에서 특정시간 동안의 시효 직후 고속 전단시험 시 관찰되는 파면별 파괴에너지값을 솔더 종류별로 집계한 결과이다. 평균적으로 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성과 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성의 파단에너지

값은 유의차 내에 존재하는 것으로 관찰되었는데, Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성의 경우 전단강도값은 떨어지지만 고속 전단조건에서의 우수한 연신율(elongation)값이 측정되어 이들의 평균적 개념인 파단에너지값에서는 그 정도가 서로 유사한 것으로 분석되었다. 또한 Sn-1.0Ag-0.5Cu 및 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성 모두 시효시간의 증가에 따라 평균 파단에너지값이 증가하는 경향이 관찰되었는데, 이는 시효시간 증가에 따른 강도저하의 효과보다 시효시간 증가에 따른 연신율 향상 특성이 더욱 영향을 미치기 때문으로 파악되었다. 한편 준연성 파괴모드가 관찰된 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성의 경우 앞서 전단강도값 경향에 비해 준연성 파괴모드에서의 평균 파단에너지값이 연성 파괴모드에서의 평균 전단강도값보다 훨씬 크게 감소하는 경향이 관찰되었는데, 이는 IMC 층 파단면의 비율이 증가할수록 앞서 언급된 낮은 전단강도값에 더하여 훨씬 낮은 연신율 특성이 관찰되므로 전단강도값은 더욱 떨어지는 결과가 측정되는 것으로 파악되었다.

Fig. 5. Shear strength values with respect to fracture mods produced with different alloy types: (a) Sn-1.0Ag-0.5Cu, (b) Sn-4.0Ag-0.5Cu, (c) Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, (d) Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In, (e) Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In, (f) Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In.

한편 4종의 Sn-Ag-Cu-In계 무연 솔더 조성의 경우 평균적으로 Sn-Ag-Cu계 조성 수준의 파단에너지값을 나타내었는데, 이 역시 강도 감소와 연신을 증가 효과가 동시에 작용했기 때문으로 분석된다. 또한 4종의 모든 조성에서 약 100 시간의 시효 후 최고의 파단에너지값이 관찰되었는데, 이를 볼 때 시효시간 증가에 따른 강도 저하 및 연신을 향상 조합 사이에서 최적의 시효시간이 존재할 수 있음을 예측할 수 있었다. 특히 500 시간의 시효 후에는 4종의 모든 조성에서 파단에너지값의 확연한 감소가 관찰되어 500 시간의 시효 시점부터는 시효시간 증가에 따른 솔더 접합 계면부의 신뢰성 감소가 가속되는 경향을 관찰할 수 있었다. 4원계 조성의 경우에서도 대체적으로 연성 파괴모드보다는 준연성 파괴모드가, 준연성 파괴모드보다는 준취성 파괴모드가 상대적으로 낮은 평균 파단에너지값을 나타내었는데, 특히 준취성 파괴모드는 눈에 띄게 낮은 평균 파단에너지값을 나타내었으며, 이러한 경

향은 IMC 파면의 증가에 따른 크랙의 신속한 전파로 전단강도값 감소와 더불어 연신률의 감소가 두드러진 결과로 해석될 수 있다.

4. 결 론

Sn-Ag-Cu-In 4원계 무연 솔더 조인트를 500 mm/s 속도로 고속 전단시험할 경우, 리플로우 솔더링 직후 및 125°C에서의 500 시간 시효까지 주로 연성 파괴모드 및 준연성 파괴모드가 관찰되었으며, 준연성 파괴모드의 발생 빈도를 분석할 때 상용 무연 솔더 조성인 Sn-3.0Ag-0.5Cu 이상의 연성파괴 특성을 나타내는 것으로 파악되었다. 그러나 이러한 4원계 조성에서 Ag의 함량이 1.2 wt.% 이상이고 In의 함량이 0.6 wt.% 이상인 경우에는 취성파괴 경향이 크게 증가하는 경향이 관찰되었다. 4원계 무연 솔더 조인트는 평균적으로 Sn-4.0Ag-0.5Cu 조성

Fig. 6. Fracture energy values with respect to fracture mods produced with different alloy types: (a) Sn-1.0Ag-0.5Cu, (b) Sn-4.0Ag-0.5Cu, (c) Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In, (d) Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In, (e) Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.6In, (f) Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In.

보다 낮은 전단강도값을 나타내었으나 Sn-Ag-Cu계 조성 수준의 파단에너지값을 나타내었다. 또한 대체적으로 연성 파괴모드보다는 준연성 파괴모드가, 준연성 파괴모드 보다는 준취성 파괴모드가 상대적으로 낮은 평균 전단강도값 및 평균 파단에너지값을 나타내었다. 특히 4원계 무연 솔더 조인트는 약 100 시간의 시효 후 최고의 파단에너지값이 관찰되었으나, 500 시간의 시효 후에는 파단에너지값의 확연한 감소가 관찰되어 500 시간의 시효 시점부터 솔더 접합 계면부의 신뢰성 감소가 가속되는 경향을 관찰할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(20140489).

References

1. A -M. Yu, C. -W. Lee, M. -S. Kim and J. -H. Lee, "The Effect of the Addition of In on the Reaction and Mechanical Properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu Solder Alloy", *Met. Mater. Int.*, 13(6), 517 (2007).
2. A -M. Yu, C. -W. Lee, J. -H. Kim, M. -S. Kim and J. -H. Lee, "Effect of In Addition on the Reaction and Mechanical Properties in Sn-Ag-Cu-In Solder Alloy", *Proc. 9th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP)*, Daejeon, 1, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2007).
3. A -M. Yu, J. -K. Kim, M. -S. Kim and J. -H. Lee, "Characteristics of Sn-Ag-Cu-In Quaternary Solder Components and Reliability Evaluation of Solder Joints", *Proc. International Conference on Soldering and Reliability (ICSR)*, Surface Mount Technology Association (SMTA) (2008).
4. A -M. Yu, M. -S. Kim, C. -W. Lee and J. -H. Lee, "Wetting and Interfacial Reaction Characteristics of Sn-1.2Ag-0.5Cu-xIn Quaternary Solder Alloys", *Met. Mater. Int.*, 17(3), 521 (2011).
5. A-Mi Yu, J. -K. Kim, J. -H. Lee and M. -S. Kim, "Pd-Doped Sn-Ag-Cu-In Solder Material for High Drop/Shock Reliability", *Mater. Res. Bull.*, 45(3), 359 (2010).
6. A -M. Yu, J. -W. Jang, J. -H. Lee, J. -K. Kim and M. -S. Kim,

- “Microstructure and Drop/Shock Reliability of a Sn-Ag-Cu-In Solder Joint with Increases in the Copper Content”, Proc. 12th International Conference on EMAP, Singapore, 104, IEEE CPMT (2010).
7. A.-M. Yu, J.-W. Jang, J.-K. Kim, J.-H. Lee and M.-S. Kim, “Improved Reliability of Sn-Ag-Cu-In Solder Alloy by the Addition of Minor Elements”, Proc. 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Las Vegas, 1524, IEEE CPMT (2010).
 8. J.-W. Jang, A.-M. Yu, J.-H. Lee, C.-W. Lee and J.-K. Kim, “Solderability and BGA Joint Reliability of Sn-Ag-Cu-In-(Mn, Pd) Pb-Free Solders”, J. Microelectron. Packag. Soc., 20(3), 53 (2013).
 9. J.-W. Kim and S.-B. Jung, “Experimental and Finite Element Analysis of the Shear Speed Effects on the Sn-Ag and Sn-Ag-Cu BGA Solder Joints”, Mater. Sci. Eng. A, 371(1-2), 267 (2004).
 10. J.-H. Choi and T.-S. Oh, “Comparison of Shear Strength and Shear Energy for 48Sn-52In Solder Bumps with Variation of Reflow Conditions”, J. Microelectron. Packag. Soc., 12(4), 351 (2005).
 11. F. Song, S. W. R. Lee, K. Newman, B. Sykes and S. Clark, “High-Speed Solder Ball Shear and Pull Test vs. Board Level Mechanical Drop Tests: Correlation of Failure Mode and Loading Speed”, Proc. 57th ECTC, Reno, 1504, IEEE CPMT (2007).
 12. J.-K. Jang, S.-S. Ha, S.-O. Ha, J.-G. Lee, J.-T. Moon, J.-H. Park, W.-C. Seo and S.-B. Jung, “Mechanical Reliability of Sn-37Pb BGA Solder Joints with High-Speed Shear Test”, J. Microelectron. Packag. Soc., 15(4), 65 (2008).
 13. I.-N. Jang, J.-H. Park and Y.-S. Ahn, “Effect of Reflow Number and Surface Finish on the High Speed Shear Properties of Sn-Ag-Cu Lead-Free Solder Bump”, J. Microelectron. Packag. Soc., 16(3), 11 (2009).
 14. J.-H. Ahn, K.-S. Kim, Y.-C. Lee, Y. Kim and S.-B. Jung, “Regulation in Shear Test Method for BGA of Flip-chip Packages”, J. Microelectron. Packag. Soc., 17(3), 1 (2010).
 15. D.-H. Jung, Y.-G. Lee and J.-P. Jung, “Shearing Characteristics of Sn3.0Ag0.5Cu Solder Ball for Standardization of High Speed Shear Test”, J. Microelectron. Packag. Soc., 18(1), 35 (2011).