

# 고속 전단시험법을 이용한 Sn-37Pb/Cu 와 Sn-37Pb/ENIG 솔더 접합의 기계적신뢰성 평가

전성재\* · 현승민\*\* · 이후정\* · 이학주†

## Mechanical Reliability Evaluation of Sn-37Pb Solder/Cu and Sn-37Pb Solder/ENIG Joints Using a High Speed Lap-shear Test

Seong-jae Jeon, Seungmin Hyun, Hoo-Jeong Lee and Hak-Joo Lee

**Key Words :** Drop test (낙하 시험), Drop reliability (낙하 신뢰성), Sn-37Pb(유연솔더), Lap-shear test (전단시험), Fracture mode (파단 모드)

### Abstract

This study utilized a high speed lap-shear test to evaluate the mechanical behavior of Sn-37Pb/Cu and Sn-37Pb/Electroless Nickel immersion Gold under bump metallization solder joints under high speed loading and hence the drop reliability. The samples were aged for 120 h at different temperatures (120 °C, 150 °C, 170 °C) and afterward tested at different displacement rates (0.01 mm/s to 500 mm/s) to examine the effects of aging on the drop life reliability. The combination of the stress-strain graphs captured from the shear tests and identifying a fracture mode dominant in the samples for different strain rates leads us to conclude that the drop reliability of solder joints degrades as the aging temperature increases, possibly due to the role of the IMC layer. This study successfully demonstrates that the analysis based on a high speed lap-shear test could be critically used to evaluate the drop reliability of solder joints.

### 1. 서 론

핸드폰과 같은 포터블 장치는 바닥에 떨어뜨렸을 때 솔더 접합부에 기계적으로 손상을 받게 된다. <sup>1)-5)</sup> 이와 같은 문제 때문에, 솔더 접합부의 신뢰성을 시험하기 위해 다양한 방법으로 기계적 충격을 줄 수 있는 시험법이 고안되었다. JEDEC (Joint Electron Device engineering Council) 에 의하여 고안된 Board level drop test (BLDT)가 그 예이다. <sup>6)</sup> BLDT 는 솔더접합부에 기계적 충격과 함께 이로 인한 진동을 가해줄 수 있는 시험방법이다. 그리고 그것에 의한 진동을 가해줄 수 있는 BLDT 는 실제로 우리가 사용하는 핸드폰과 같은 모바일 기기를 떨어뜨렸을 때와 매우 유사한 환경을 제공해 준다. 하지만 이 시험 방법은 신뢰성평가에 있어서 시간과 비용의 문제가 있으며, 무엇보다도 떨어뜨릴 때의 실패기구를 명확하게 제시하지 못한다.

BLDT 의 시험방법과 유사하지만, board level 이 아닌, 칩(chip) 스케일의 시험방법들도 있다. Ball Impact Test (BIT), High-speed Ball Shear Test (HBST) <sup>7)</sup>, High-speed Ball Pull Test 등이 그 예이다. 이 실험 방법은 실제 떨어뜨렸을 때의 환경을 직접적으로 제공하지는 않지만, 칩과 기판 사이에 솔더로 접합된 부분에 빠른 속도로 기계적으로 힘을 가할 수 있는 장점이 있다. BIT 같은 경우 초당 1500 mm, HBST 같은 경우 1300 mm 혹은 그 이상의 속도로 응력을 가해줄 수 있다. 이것은 실제 떨어뜨렸을 때처럼 기계적 충격을 모사할 수 있다. <sup>1)-7)</sup>

이처럼 여러 시험방법들이 제시되고 있음에도 불구하고 앞서 언급한 솔더접합부의 신뢰성 평가 시험방법은, 솔더 재료들의 기계적 성질을 평가하는 것이 꽤 복잡하고, 솔더 접합의 파괴기구에 관하여 직관적으로 해석하기가 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 시험방법의 대안으로 high speed lap-shear 시험법을 고안하였다. 이 시험 방법은 솔더 접합부에 고속의 전단응력을 가하였을 때 솔더접합부의 기계적 기구분석을 통하여 drop reliability 를 평가한다. Lap-shear 시험은 아래 Fig. 1 처럼 솔더 접합부에 단순히 전단응력만 가해진다. 실제 전자제품을 떨어뜨렸을 때의 복잡한 환경을 한가지 응력으로 단순화하였다.

† 교신저자, 한국기계연구원 나노공정장비센터

E-mail : hjlee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7633 FAX : (042)868-7884

\* 성균관대학교 신소재공학과

\*\* 한국기계연구원, 나노공정장비센터

Lap-shear 시험은 다양한 변형률로 시편에 전단 응력을 가해줌으로써 솔더 접합부의 파괴기구에 관한 중요한 정보를 응력과 변형과의 관계로 알 수 있다. 본 연구에서 최고 ~ 500 mm/s 의 변위율로 리플로우 직후의 Sn-37Pb/Cu UBM 과 Sn-37Pb/무전해 니켈/침지 금도금(electroless nickel immersion gold, ENIG) UBM 시편으로 시험을 진행하였다. 또한 150 °C, 170 °C 에서 120 시간 동안 각각 등은 시효 처리한 시편도 시험을 하였다. 리플로우 및 열처리 이후 기판의 금속 패드와 계면반응이 일어난 시편의 단면을 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 를 이용해 관찰하였고 EDS (electron dispersive spectroscopy) 분석을 통하여 금속간화합물의 조성을 분석하였다.

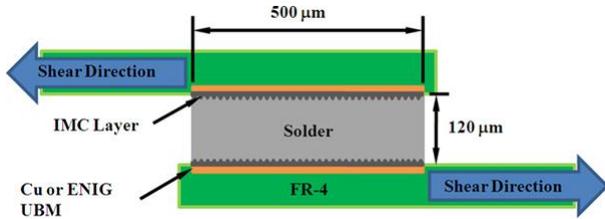


Fig. 1. A schematic diagram of a test specimen.

## 2. 실험 방법

실험에 사용된 솔더볼은 주석-납 2 원계 합금 솔더로 납의 조성이 37 weight %이다. 솔더볼의 직경은 300 μm 이다. 솔더볼을 접합할 기판은 가로세로 각각 15 mm, 4 mm 이며, 두께가 1 mm 인 인쇄회로기판 (PCB, FR-4) 을 사용하였다. 기판 위의 금속패드는 Cu 와 ENIG 로 각각 두 종류로 도금되었다. 금속 패드의 크기는 가로세로 각각 500 μm 이다. Fig. 1 에 시편의 구조를 간단하게 나타내었다. 솔더볼 접합의 높이는 약 120 μm 이다. 리플로우는 221 °C 에서 약 60 초간 수행되었으며 상온에서 냉각하였다. 리플로우 이후에 증류수에서 수분간 flux 를 세척하였다. 시편 중 일부를 제외하고 나머지 시편은 150 °C 와 170 °C 에서 120 시간 동안 등은 시효처리 하였다.

### 2.1. 실험 장치 및 방법

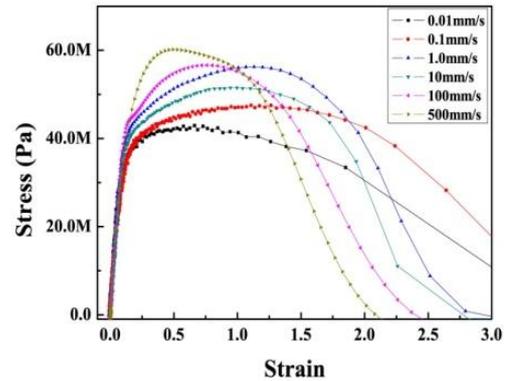
리플로우 직후의 시편과 등은 시효 처리한 시편으로 Fig. 2 의 미소인장시험기(Tytron 250, MTS System Co., USA) 에서 실험을 진행하였다. 변위제어로 시험을 실시하였으며 0.01 mm/s, 0.1 mm/s, 1mm/s, 10mm/s, 100 mm/s, 500 mm/s 의 변위율로 시험을 진행하여 전단응력-전단변형률 선도를 얻었다.

시험 후에는 SEM 을 이용하여 파단면을 관찰하고 EDS 로 표면의 조성을 분석하였다.

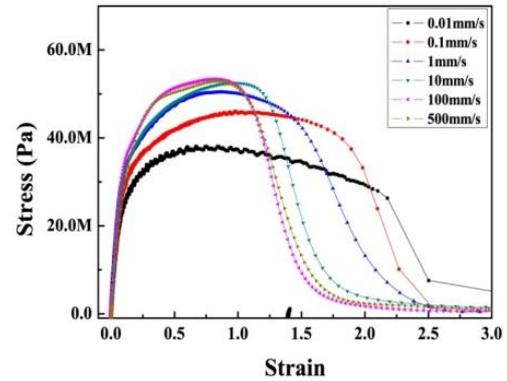
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 전단응력-전단변형률 선도 분석

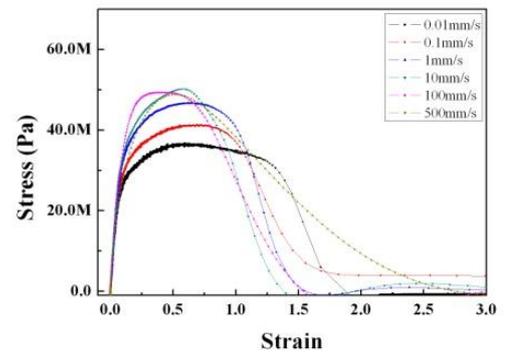
전단시험은 여러 변위율로 등은 시효 처리한 시편과 리플로우 직후의 시편으로 수행되었다. Fig. 3(Sn-37Pb/Cu) 과 Fig. 4(Sn37Pb/ENIG) 에서와 같이 이 시험으로부터 전형적인 모양의 공칭전단응력-전단변형률 선도를 얻었다.



(a) As-reflowed

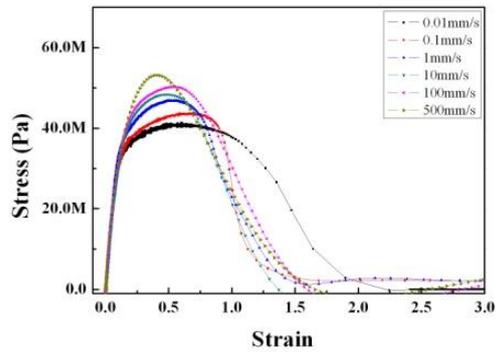


(b) 150 °C

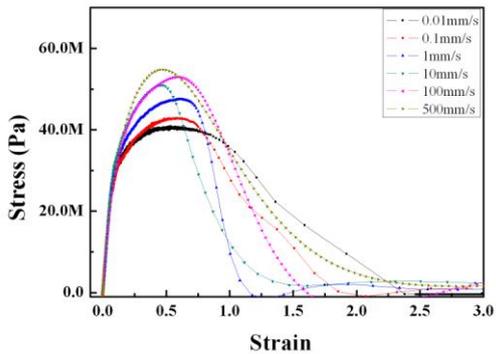


(c) 170 °C

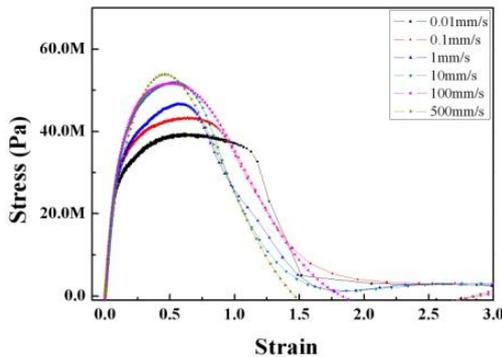
Fig. 3. Shear stress-strain curves for (a) as-reflowed, (b) 150 °C- and (c) 170 °C-aged Sn-37Pb/Cu solder joint. The displacement rate was in the range of 0.01 mm/s to 500 mm/s.



(a) As-reflowed



(b) 150 °C



(c) 170 °C

Fig. 4. Shear stress-strain curves for (a) as-reflowed, (b) 150 °C- and (c) 170 °C-aged Sn-37Pb/ENIG solder joint. The displacement rate was in the range of 0.01 mm/s to 500 mm/s.

Fig. 3 는 리플로우 직후(a), 150 °C(b) 와 170(c) 에서 열처리한 Sn-37Pb/Cu 시편의 전단응력-전단변형률 선도를 각각 나타낸다. Fig. 3(a) 의 선도에서 볼 수 있듯이 솔더 접합부에는 100% 이상 많은 양의 소성 변형이 일어났다. 이 선도에서 가장 낮은 변위율인 0.01 mm/s 의 최대 전단 강도는 약 40 MPa 이며 가장 빠른 500 mm/s 의 최대 전단 강도는 약 63 MPa 이다. Fig. 3 에서 흥미로운 점은 변위율의 변화에 따라서 선도의 모양이 민감하게 변한다는 것이다. 가공경화율은 높은 변형율에서 변형된 시편에서 높게 나타났다. 이와 같은

변형률에 의한 유동응력의 변화는 솔더 재료의 인장 시험 연구에서 확인 할 수 있다.<sup>8)-9)</sup>

Fig. 3(b) 와 Fig. 3(c) 를 Fig. 3(a)와 비교하여보면 몇 가지 흥미로운 점이 있다. 먼저 모든 유동응력은 점점 높은 온도로 열처리된 시편일수록 약간 낮아지며, 연신율은 상당히 감소하였다. 두 번째로 변형률에 의한 유동응력의 변화 또한 열처리된 시편의 선도에서도 마찬가지로 발견된다. 즉, 리플로우 직후 시편과 마찬가지로 가공경화율은 변형율이 증가함에 따라 상승한다. 마지막으로 높은 온도로 열처리한 시편에서의 모든 선도의 모양이 변위율의 비율이 증가함에 따라서 뚜렷하게 구별된다. 150 °C 에서 열처리한 시편을 예로 들면, 낮은 변위율인 0.01 mm/s 혹은 0.1 mm/s 에서 상당량의 늘어남을 보여주고 나서 완전히 파단이 발생하기 전에 점차적으로 유동응력이 낮아진다. 이는 리플로우 직후의 시편의 선도와 비슷한 거동을 보여준다. 이와 대조적으로 높은 변위율인 10 mm/s ~ 500 mm/s 에서의 시편의 선도는 앞서 언급한 선도보다 다소 다른 거동을 보여준다. 연신율은 더 적으며 선도의 거동은 최대전단강도에 이른 직후 바로 응력이 급격히 떨어진다.

Fig. 4 는 리플로우 직후(a), 150 °C(b) 와 170(c) 에서 열처리한 Sn-37Pb/ENIG 시편의 전단응력-전단변형률 선도를 각각 나타낸다. Fig. 4(a) 의 리플로우 직후의 선도를 살펴보면 가장 낮은 변위율인 0.01 mm/s 의 최대 전단 강도는 약 39 MPa 이며 가장 빠른 500 mm/s 의 최대 전단 강도는 약 55 MPa 이다. 이 전단강도 값의 결과들은 낮은 변위율에서 리플로우 직후의 Sn-37Pb/Cu 시편의 최대 전단강도와 비슷한 반면 높은 변위율에서는 Sn-37Pb/Cu 시편의 최대 전단강도가 상대적으로 더 높다.

Fig. 3 과 Fig. 4 를 비교하였을 때 흥미로운 몇 가지 사실을 알 수 있었다. 먼저 높은 온도에서 열처리 한 ENIG 패드를 사용한 시편은 Cu 패드를 사용한 시편과 마찬가지로 모든 유동응력이 약간 낮아졌지만, Fig. 4 의 ENIG 의 전단응력-전단변형률의 선도의 모양은 거의 변화가 없다. 이 선도의 모양은 높은 변위율에서 Cu 패드를 사용한 시편의 선도모양과 비슷할 뿐만 아니라, 연신율은 더 적으며 선도의 거동은 최대전단강도에 이른 직후 바로 응력은 급격히 떨어진다. 또한 모든 선도에서 Sn-37Pb/Cu 시편보다 더 적은 양의 소성변형을 보여주고 있다. Sn-37Pb/Cu 시편에서처럼 ENIG 패드를 사용한 시편에서도 변형률에 의한 유동응력의 변화가 선도에 나타난다.

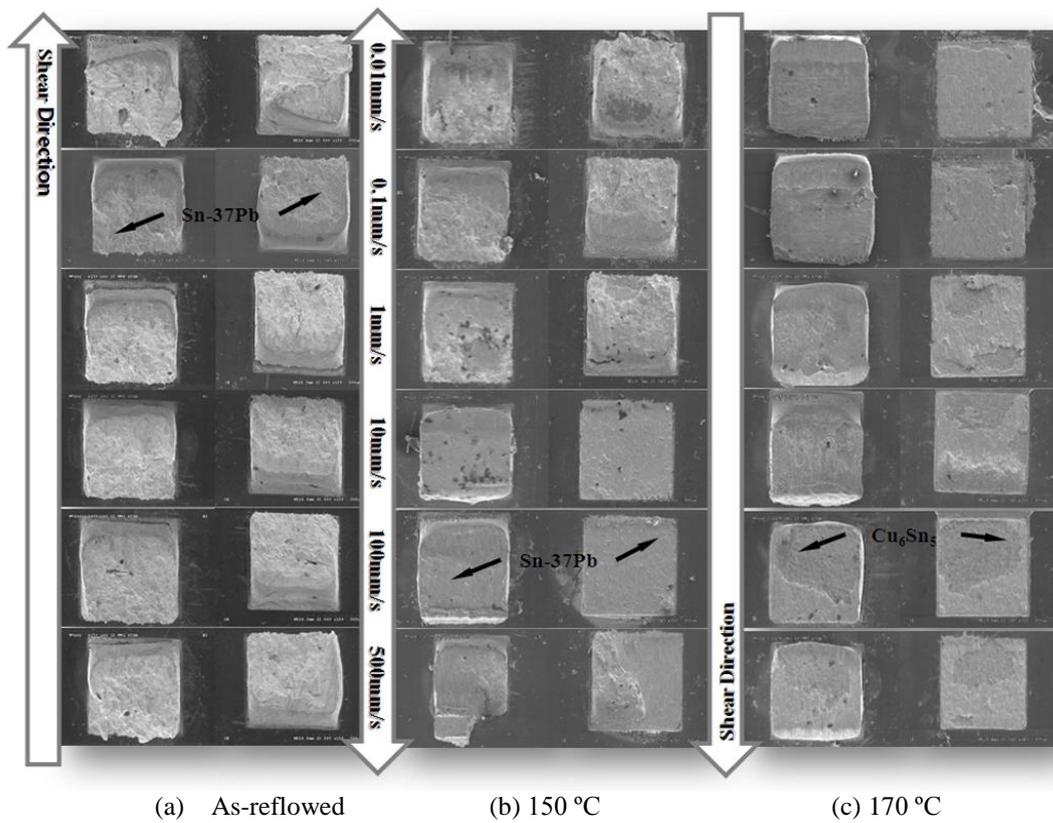


Fig. 5. Electron micrographs of top-view of surfaces obtained after tests, from some selected Sn-37/Cu samples [(a) As-reflowed, (b) 150 °C-aged, (c) 170 °C-aged samples]

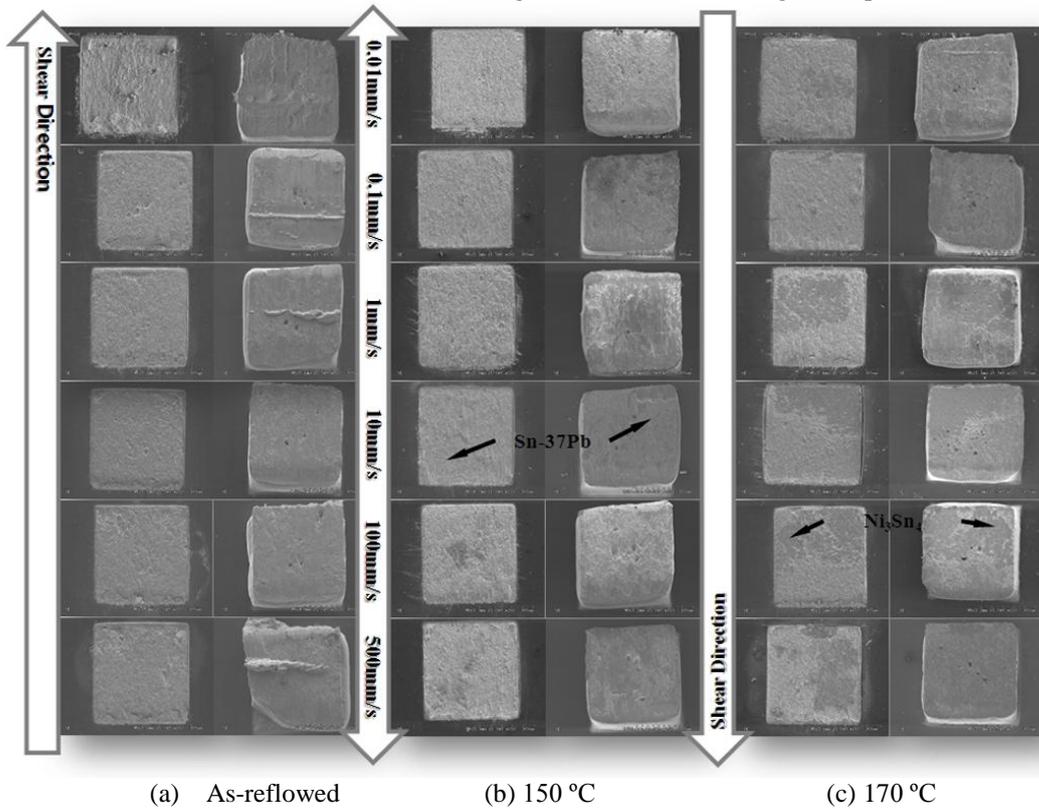


Fig. 6. Electron micrographs of top-view of surfaces obtained after tests, from some selected Sn-37/ENIG samples [(a) As-reflowed, (b) 150 °C-aged, (c) 170 °C-aged samples].

### 3.2. 파단 표면 분석

전단시험 후 각각의 변위율에서 상세하게 관찰되는 파단면을 각진 한 개의 시편을 취해 SEM 을 사용하여 표면 사진을 Fig. 5(Sn-37Pb/Cu) 와 Fig. 6(Sn-37Pb/ENIG) 에 나타내었다. 이 SEM 사진으로부터 공통적으로 세 가지 형태의 파단표면을 확인 할 수 있었다.

첫 번째로 솔더 부분에서 파단이 일어나 연성의 성질을 가진 파단면이다. 이 파단면은 EDS 의 표면 분석을 통하여 주석과 납이 대부분인 솔더 내부에서 파단이 일어난 것을 알 수 있었다. 즉 균열이 아래쪽 혹은 위쪽 FR-4 의 금속 패드부분의 한쪽 구석 부분에서 시작되어 반대쪽 FR-4 의 다른 구석으로 진전되는 것이다. 전형적으로 연성의 성질을 가진 솔더부분에서 파단이 일어나는 것이다. 이 파단 형태는 오직 Sn-37Pb/Cu 에서만 관찰되며 리플로우 직후의 시편은 모든 변위율에서, 150 °C 로 열처리된 시편은 500 mm/s 를 제외한 모든 변위율에서, 170 °C 에서는 발견되지 않았다.

두 번째로 파단 표면이 평평한 모양을 하고 있으며, 파단의 경계가 솔더와 금속간화합물의 경계에서 일어난 경우이다. 평평한 면의 반대쪽 면은 전단방향으로 상당량의 소성변형이 있음을 알 수 있다. EDS 로 분석한 평평한 파단면과 소성변형이 있는 반대쪽면 파단면의 주요 원소는 마찬가지로 주석과 납이 대부분이었다. 이와 같은 파단 형태를 통해 솔더부분에서 깨짐이 발생됨을 알 수 있다. 이 파단형태는 두 금속패드에서 모두 발생하였으며, 특히 ENIG 를 사용한 모든 시편에서 더 상세하게 발생하였다. Cu 를 사용한 시편에서는 150 °C 에서 열처리한 시편은 10 mm/s ~ 500 mm/s 의 변위율에서 앞서 언급한 파단 형태와 혼재되어 나타났으며 170 °C 로 열처리한 시편에서 모두 나타났다.

마지막으로 평평한 면으로 균열이 진전되었지만 균열이 금속간화합물 층으로 균열이 진전된 파단 형태이다. EDS 로 파단면을 분석해보면, 주석과 구리가 주된 원소임을 확인할 수 있었다. 평평한 면의 반대면은 소성변형이 거의 없으며, 마찬가지로 금속간화합물 층이 있음을 확인하였다. 이 파단형태는 170 °C 에서 열처리한 두 금속패드에서 모두 발견되며, 두번째 파단형태와 혼재되어 높은 변위율 (10 mm/s ~ 500 mm/s) 에서 나타난다.

## 4. 요약 및 결론

우리는 다양한 고속 변형율로 솔더 접합부에 전단응력을 가하는 방법으로 Sn-37Pb/Cu 와 Sn-

37Pb/ENIG 솔더 접합부의 신뢰성을 평가 하였다. 또한 열처리로 인한 효과를 알아보기로 두 종류의 UBM 을 사용한 시편을 각각 120 시간 동안 150 °C 와 170 °C 에서 등온 시효 처리하였다.

전단 시험 범으로부터 얻은 전단 응력-전단변형을 선도에서 세가지 형태의 파단형태의 유용한 정보를 제공 받을 수 있음 확인 할 수 있었다.

첫 번째로 솔더부분에서 파괴가 일어나 연성의 성질을 가진 파단형태이다. 두 번째는 솔더와 금속간화합물 층의 경계에서 파단이 일어나고 솔더에 전단방향으로 소성변형이 일어나는 깨짐 형태의 파단형태이다. 마지막으로 금속화합물 층에서 파괴가 일어나고 솔더부분에 소성변형이 거의 없는 깨짐의 성질을 가진 파단형태이다.

각각의 다른 변형률에 따른 시편의 주요 파단형태를 확인함으로써 솔더 접합의 drop reliability 는 금속간화합물에 영향을 미치는 열처리의 온도가 증가함에 따라 떨어지는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 성공적으로 고속 전단 시험방법을 이용하여 솔더접합의 drop reliability 를 평가 할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 지원(07-K1401-00910)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Sheng liu, Xiaojun Wang, Bin Ma, Zhiyan Gan and Honghai Zhang, "Drop Test and Simulation of Portable Electronic Devices," Electronic Packaging Technology, 2005 6th International Conference on 30 Aug. 2 Sept. 2005 pp.701-704.
- (2) Michael E. Johnson, Henry Y. Lu, David Lawhead, Ted Tessier, Doug Scott and Anthony Curtis, "Using High Speed Shear and Cold Ball Pull to Characterize Lead Free Solder Alloys and Predict Board Level Drop Test Performance," 2007 Electronic Components and Technology Conference, pp.536-542.
- (3) Fubin Song, S. W. Ricky Lee, Keith Newman, Bob Sykes, Stephen Clark, "High-Speed Solder Ball Shear and Pull Tests vs. Board Level Mechanical Drop Tests: Correlation of Failure Mode and Loading Speed," 2007

- Electronic Components and Technology Conference, pp.1504-1513.
- (4) E.H. Wong, Y-W Mai, R.Rajoo, K.T. Tsai, F. Liu, S.K.W. Seah, C-L Yeh, "Micro Impact Characterisation of Solder Joint for Drop Impact Application," 2006 Electronic Components and Technology Conference, pp.64-71.
- (5) E.H. Wong, R. Rajoo, Y.W. Mai, S.K.W. Seah, K.T. Tsai and L.M. Yap "Drop Impact: Fundamentals & Impact Characterisation of Solder Joints," 2005 Electronic Components and Technology Conference, pp.1202-1209.
- (6) JESD22-B 111, "Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products," JEDEC Standard, July 2003.
- (7) JESD22-B117A, "Solder Ball Shear," JEDEC Standard, October 2006.
- (8) Fulong Zhu, Honghai Zhang, Rongfeng Guan, Sheng Liu, "The effect of temperature and strain rate on the tensile properties of a Sn99.3Cu0.7(Ni) lead-free solder alloy", *Microelectronic Engineering* 84 (2007) pp. 144–150.
- (9) C R Siviour, S M Walley, W G Proud and J E Field, "Mechanical properties of SnPb and lead-free solders at high rates of strain," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2005) pp. 4131–4139.