초소형 무연 단일 솔더볼 연결부의 전단강도 평가

주세민 · 김호경†*
서울과학기술대학교 NID 대학원 · *서울과학기술대학교 자동차공학과
(2010. 6. 28. 접수 / 2010. 11. 19. 채택)

Evaluation of Shear Strength of a Miniature Lead-free Single Solder Ball Joint

Se-Min Joo · Ho-Kyung Kim†*
Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology
*Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology
(Received June 28, 2010 / Accepted November 19, 2010)

Abstract : A miniature single solder ball joint is designed to mimic the actual solder joints used in the micro-electric industries. Shear tests were conducted to evaluate the mechanical behavior of miniature single solder joints at intermediate strain rates from 0.019 s^{-1} to 2.16 s^{-1} at room temperature. The shear fracture strength of the present solder ball joints generally increased with increasing shear strain rate, ranging from 32 to 51MPa. This behavior is affected by the sensitivity of bulk solder strength to strain rate. Shear fracture mode changed from brittle to partial ductile (failure inside the bulk solder) with an increase of shear speed. The unloading shear fracture toughness is generally consistent with the measure of the amount of bulk solder on the fractured surface.
Key Words : shear test, lead-free solder ball, miniature solder joint, shear fracture mode, unloading fracture toughness

1. 서 론

최근 유해 물질제한 법령에 의거하여 전자 조립품에서의 납 사용 금지조치로 인하여 기존의 유연 Sn-Pb 솔더 대신 무연의 Sn-Ag 혹은 Sn-Ag-Cu 솔더가 사용되고 있다. 이들 무연 솔더 합금은 기존의 유연 솔더 합금보다 정적 강도, 크리프, 장주기 피로수명에서 우수한 것으로 알려져 있다[1]. 그러나 유연 솔더 합금에 비하여 무연 솔더의 경우 높은 변형률 속도에서 취성 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 최근 휴대용 전자 제품이 경박 단소화가 되면서 솔더 연결부가 포함된 전자기판(PCB)을 보호하는 하우징의 에너지 흡수 능력이 감소하게 된다. 결과적으로 낙하 혹은 취급시의 갑작스런 충격으로 많은 에너지가 전자 부품에 전달되어 충격 내구성이 전자 제품 기판 접합부의 신뢰성에 치명적인 새로운 문제로 대두되고 있다[2]. 따라서 산업체에서는 충격을 받는 전자기판의 솔더 연결부에서의 파괴를 야기하는 미세 파괴기구에 대하여 집중적인 많은 연구[3,4]가 진행되고 있다.

Fig. 1은 산업체의 요구에 부응하여 JEDEC(Joint Electronic Device Engineering Council)의 입회하에 제정한 낙하-충격 시험기준인 JESD22-B111(Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products) 시험방식으로 이 기준에서는 재료, 구성, 전자기판 배열, 충격 펄스에 대하여 상세히 기술되어 있다[5]. 그러나 현재 업체간에 표준 낙하-충격 시험기준인 JESD22-B111 방식의 시험법의 경우 다음과 같은 문제점이 있다. (1) 실험적으로 정확히 재현성을 갖는 반사인(half-sine) 파형을 구현하기 어렵다. (2) 이들 제품을 낙하시켜 충격을 가하는 방식이 정확히 휴대용 전자부품의 낙하 거동과 차이가 있다. (3) 자유낙하의 경우 낙하높이, 시험 대상물의 지면과의 경사, 고정 볼트 장력의 세기 등이 주요 변수로 작용한다.

또한 집적 회로(IC) 부품, 전자기판, 솔더 볼의 제조업체 입장에서는 보드 수준(board level)의 시험비용은 무시할 수 없는 액수로 단일 부품 수준에

† To whom correspondence should be addressed.
kimhk@smut.ac.kr

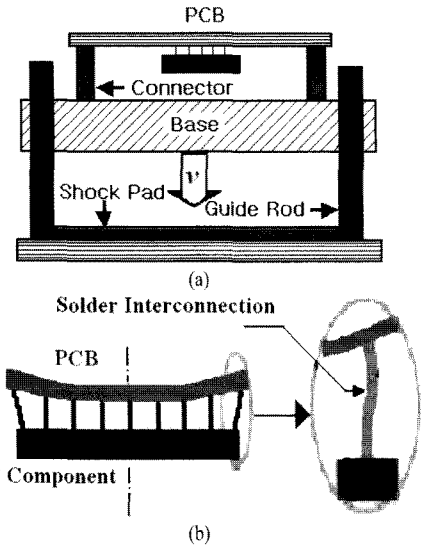


Fig. 1. (a) Board level drop-shock test setup by JEDEC and (b) deformation of interconnect due to differential deflection of the PCB.

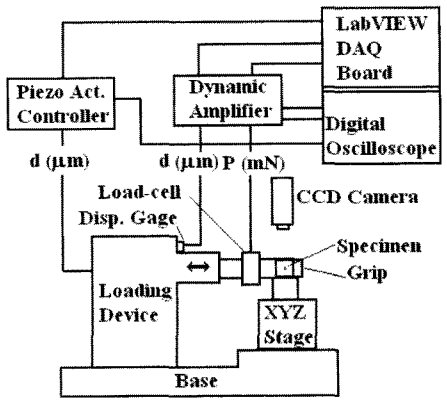
서의 좀 더 저렴한 시험이 필요하다. 즉 부품들이 실장 되지 않은 상태의 집적회로 칩이나 전자기판의 부품 수준에서의 좀 더 저렴한 시험 방법이 바람직하다. 이를 위하여 부품 업체에서는 제품의 품질을 관리 목적으로 간단하고 저렴한 볼 수준의 시험을 수행하고 있다. 휴대용 전자 제품에 사용되는 취성의 무연 솔더 볼의 적용 여부를 평가하기 위하여 단일 솔더 볼의 다양한 하중형태에 대한 실험 데이터가 필요하다. 만일 이들 데이터를 확보한다면 문제가 되는 각종 직접 회로와 칩들이 장착된 전자기판에 대하여 FEM 동적해석을 통하여 솔더 연결부의 낙하에 의한 충격-피로(impact-fatigue) 수명 예측이 가능하다. 본 연구에서는 직경 1mm 미만의 초소형 무연 단일 솔더 볼 접합부의 전단 하중상태에서의 중간 하중 속도에 따른 전단강도를 평가하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

초소형 솔더볼의 전단실험을 실시하기 위하여 피에조 엑튜에이터를 사용하여 작동 범위가 1.8mm 이상이며 작용하중이 최대 수십 N에 해당하는 고하중으로 변위 속도가 최대 4mm/s로 정교하게 변위 제어가 가능한 시스템을 제작하였다.

시험기는 Fig. 2와 같이 시험편의 하중을 발생시키는 하중 발생 시스템(loading device), 작용 하중 및



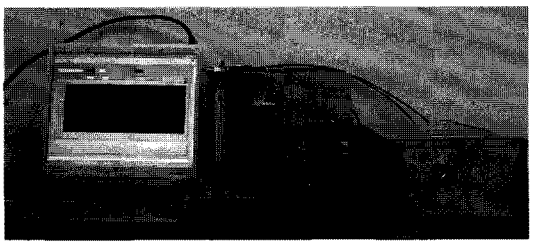


Fig. 2. Experimental setup of shear testing system.

변형량을 측정하는 하중 및 변위 측정시스템, 시험편에 하중을 전달하는 하중전달 시스템(load train system), 시험편을 고정 하고 지지하는 그립 및 지그, 시스템 기반(base)으로 구성하였다. 하중 발생장치의 경우 피에조는 PI사의 P-225.8S를 사용하여 4단계로 지렛대 원리로 변위를 증폭하였다. 하중발생장치의 기본 프레임은 SM45C를 사용하여 제작하였으며 각종 레버와 힌지는 공구강으로 와이어 컷팅기를 이용하여 정밀하게 제작하였다.

시험편에 하중을 가하는 방식은 지렛대 방식을 사용하여 4단계의 레버가 연속적으로 변위를 증폭시키는 시스템으로 구성하였다. 또한 시험편이 초소형인 관계로 시편의 위치를 조정하는 X-Y-Z 스테이지 및 이를 정확히 장착하기 위하여 배율 150배의 CCD 카메라를 설치하였다. 100N 용량의 로드셀 및 폭 12mm, 두께 0.2mm의 스테인리스 스틸 판재로 제작된 외팔보에 스트레인 게이지가 부착된 변위계로부터 검출된 신호는 다이나믹 앰프(Vishay Micro- Measurements, 2300 Signal Conditioning Amplifier)를 통하여 증폭하였다. 시간에 대한 변위계 및 로드셀로부터의 신호는 디지털 오실로스코프(LeCroy 9304A 4 Channel 200MHz) 및 데이터 획득장치(National Instrument, PXI 1042 Series)를 이용하여 기록 및 저장하였다. 데이터 획득 및 제어에 사용한 소프트웨어는 ver. 8.0 LabVIEW를 사용하였다.

본 실험장치의 상세한 설계, 각종 센서의 교정, 실험방법 등에 관해서는 다른 연구[6]에 보고하였다.

2.2. 솔더 볼 시험편 제작

전단시험에 사용한 시험편은 현장에서 실제 사용하는 직경 0.76mm의 솔더 볼을 사용하였으며 화학적 성분은 Table 1과 같다. 전단 시험편은 Fig. 3(a)와 같이 무산소동(oxygen-free copper)으로 된 직경 10mm 높이 7mm의 2개의 유리시계형상의 홀더 사이에 솔더 볼을 솔더링한 시험편을 사용하였다. 참고로 무산소동은 탈산제와 산소를 함유하지 않은 정련된 구리이다. 유리시계형의 허리가 잘록한 형태의 홀더는 시험편의 고정이 용이하게 하기 위하여 설계하였다. Fig. 3(b)와 같이 2개 구리 홀더 중간에 솔더 볼을 올려놓은 상태에서 전기로에서 온도 260℃로 가열하여 리플로우(reflow) 하였다. #2000 연마지로 연마 처리된 구리의 상부를 아세톤으로 세척한 후에 솔더 볼을 올려놓은 상태에서 RMA (rosin mildly activated) 타입의 솔더 플럭스를 사용하여 리플로우 하였다. 이때 시험편의 높이를 정확하게 유지하기 위하여 두께 0.4mm의 스테인리스

Table 1. Chemical compositions of solder ball (wt.%)

Element	Ag	Cu	Ge	Bi
%	2.9900	0.5260	0.0100	0.0009
Element	Fe	Pb	Sb	Sn
%	0.0019	0.0241	0.0207	Rem

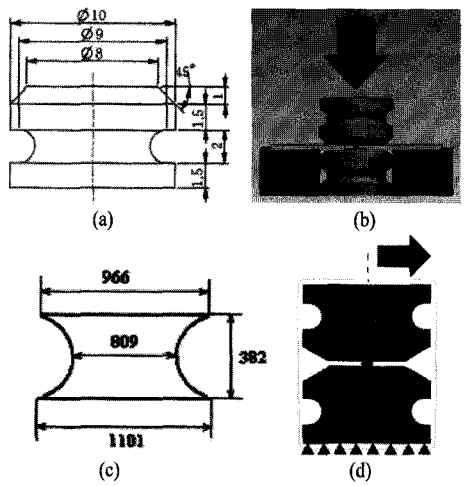


Fig. 3. a) Dimensions of the copper specimen holder for single solder ball (in mm), (b) miniature single solder ball specimen preparing for reflowing, (c) shape and dimensions of the solder ball joint (in micrometer), and (d) loading configuration of the solder specimen.

심(shim)재를 사용하여 Fig. 3(b)와 같이 두께를 조절하였다. 이를 위하여 특수 제작한 지그를 사용하였으며 판스프링으로 상단의 구리시험편을 누른 상태로 전기로에서 리플로우 하였다. Fig. 3(c)와 (d)는 각각 솔더 연결부의 단면의 형상, 치수와 전단 하중형태이다. 전단 시험은 온도 20℃(=0.6 T_m, T_m= 217℃)에서 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

구리 홀더상에 리플로우한 무연 Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더 연결부의 전단 실험은 전단 변형속도 1.21~0.023 mm/s에서 실시하였다. 전단 하중-변위 선도는 Fig. 4와 같다. 실험 데이터는 각 조건 당 3개를 실시하여 중간 값을 가진 데이터를 이용하였다. Fig. 4에서 최대 하중이 전단 속도가 증가하면서 증가함을 알 수 있다. 시험편 모두가 구리와 솔더 사이의 경계면 근처에서 파단이 발생함을 관찰하였다. 실험결과 대부분의 하중-변위 선도는 정점에 도달한 후에 매우 작은 양의 정상상태 변형을 보이면서 바로 급격한 하중감소가 발생함을 알 수 있다. 약간의 정상상태의 변위는 점차적인 슬립에 따른 소성변형을 의미하며 급격한 하중 감소는 솔더 볼과 구리와의 경계면에서의 취성적으로 국부적인 소성변형을 의미한다. Fig. 4를 통하여 전단 속도가 감소하면서 하중이 최대 정점에 도달한 후에 급작스러운 하중이 감소하면서 파괴되는 경향이 있음을 알 수 있다.

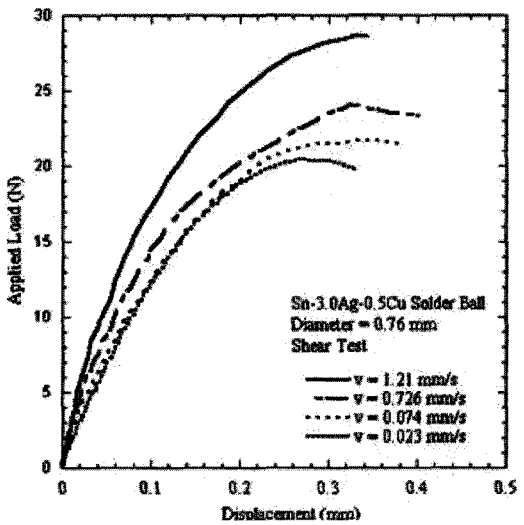


Fig. 4. The typical shear load-displacement curves of the reflowed Sn-Ag-Cu solder joint.

솔더 볼 강도에 대한 전단속도의 영향을 평가하기 위하여 응력과 변형률과 같은 표준화된 변수로 표현하는 것이 필요하다. 응력과 변형률을 평가하기 위하여 다음과 같은 단순화된 가정을 시도하였다. 이와 같은 가정을 위하여 솔더 시험편의 높이에 해당하는 구리 홀더사이의 간격 및 평균 단면적을 이용하여 전단응력과 전단 변형률을 계산하였다. 본 연구에서 실험한 중간이 오목한(concave) 솔더 볼 연결부의 형상은 게이지 부분이 둥근 노치로 이루어진 이중전단 시험편의 한쪽 게이지 형상과 유사하다[7]. 게이지 부위는 Fig. 3(c)에서의 높이 0.382mm에 해당하는 부분으로 시험온도가 20℃로 용융점의 60%에 해당하는 고온이므로 전단시험시 응력집중이 급격히 이완된다고 판단된다. 따라서 정상상태 변형률 속도는 최소 단면적 보다는 전체 단면적에 대한 평균전단응력과 관계가 있다고 가정하였다. 솔더 볼 연결부의 평균 전단응력 $\bar{\tau}$는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\bar{\tau} = \frac{P}{\pi \bar{r}^2} \tag{1}$$

여기서 $\bar{r}$는 시험편 게이지 부분의 평균 반경이며, P는 솔더 볼 연결부에 작용하는 하중이다. 직경 0.76mm의 솔더 볼의 부피가 일정하다고 가정하면 평균 반경 $\bar{r}$는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\pi \bar{r}^2 h = \frac{4}{3}\pi R^3 \tag{2}$$

여기서 h는 솔더 볼 연결부의 구리 홀더 사이의 간격이며 R은 솔더 볼의 반경이다. 본 연구에 사용된 솔더 볼 시험편에 해당하는 R과 h는 각각 0.380 mm, 0.382mm이다. 결과적으로 솔더 연결부의 평균반경은 0.438mm로 결정되었다. 전단 변형률(γ)은 솔더 연결부의 구리 홀더와의 간격(h)을 전단 변형량(δ)으로 나눈 값($\gamma = \delta/h$)이다. 본 연구에서 시도한 평균전단응력 개념과 유사한 둥근 노치 이중전단 시험편의 경우 실험과 수치해석을 통하여 타당성이 이미 입증되었다[7]. 유효 응력(σ_e)과 변형률(ε_e)은 다음과 같은 관계식으로 환산하였다.

$$\varepsilon_e = \frac{2}{3}\gamma, \sigma_e = \sqrt{3}\tau \tag{3}$$

Fig. 5는 솔더 볼 연결부의 전단응력-변형률 선

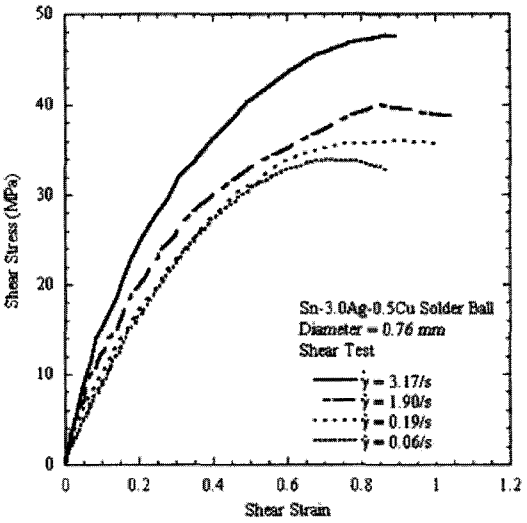


Fig. 5. The typical shear stress - strain curves of the reflowed Sn-Ag-Cu solder joint.

도의 예이다. 본 연구에서 실험한 솔더 연결부의 전단 파괴강도는 전단 변형률 속도가 증가하면서 32MPa에서 51MPa로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 거동은 솔더 볼 자체의 강도가 고온에서 실험한 까닭에 변형률 속도에 민감함에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서의 전단강도 값 (32~51MPa)은 다른 연구의 솔더 볼 전단강도에 비하여 낮은 것으로 나타났다. Chia 등[8]은 Sn-4Ag-0.5Cu솔더 볼의 전단강도가 1~1000mm/min 속도에서 50~80MPa로 보고하였다. Lee 등[9]은 직경 0.76mm인 Sn-3.5 Ag 솔더 볼의 전단강도가 속도 0.2mm/s에서 약 57 MPa로 보고하였다. 또한 Zhang 등[10]은 직경 0.12mm의 Sn-3.5Ag-1.0Cu 솔더 볼의 전단강도가 75MPa로 보고하였다.

본 실험 연구 결과와 다른 연구자들의 연구 결과와의 차이는 여러 인자로 인하여 발생한 것으로 판단된다. 다른 연구자들에 의한 솔더 볼의 전단 실험에서는 솔더 볼을 끌과 같은 프로브의 팁으로 전단 하중으로 긁는 방식이다. 이 경우 전단 프로브 팁과 솔더 볼과의 접촉면에 압축 변형이 발생하면서 전단 하중에 많은 양의 압축하중이 포함된다. 결과적으로 솔더 볼의 크기가 크면 클수록 많은 압축하중이 내포되어 결국 많은 전단 하중이 발생하게 된다. 그러나 본 연구에서는 이러한 전단 프로브를 사용하지 않고 구리 홀더에 전단 하중을 가하여 솔더 연결부가 순수하게 전단으로 변형 및 파단되어 이들 프로브로 인하여 발생하는 추가적인 하중은 없다. 그러므로 본 연구 결과가 다른 연

구의 결과보다 낮은 이유는 통상적인 전단 실험의 프로브 접촉에서의 솔더 볼 압축을 위하여 필요한 하중이 제외되어 결과적으로 감소하는데 일부 기인한 것으로 판단된다. 또 다른 인자는 솔더 볼 합금 시스템, 연결부의 치수, 솔더 볼과 구리 홀더 사이에 발생하는 금속간 화합물의 크기가 해당된다. Oh 등[11]에 의하면 솔더 볼의 전단 강도는 솔더 볼의 크기, 형상에 민감하여 정확한 비교를 위해서는 실험에 사용하는 솔더 볼 연결부의 형상 및 치수가 어느 정도 동일하여야 가능하다고 알려져 있다. 취성인 금속간 화합물의 두께도 본 연구 실험결과의 전단강도가 감소한 이유의 하나로 판단된다. 기판 위에 연결된 솔더 볼 연결부의 경우 자동화된 생산현장에서 최적으로 제조한 연결부로 통상적으로 취성인 금속간 화합물의 두께가 수마이크로 미터이나 본 연구에서 수행한 시험편의 금속간 화합물의 경우 약 18μm 정도로 두꺼워 결과적으로 강도가 낮아지는 이유의 하나로 판단된다.

본 연구 실험결과인 최대전단응력은 32~51MPa로 이 값은 솔더와 금속간 화합물의 경계면, 혹은 솔더와 구리간의 경계면의 강도보다는 솔더 볼의 강도에 해당된다고 판단된다. 왜냐하면 경계면의 강도는 통상적으로 변형률 속도에 민감하지 않고 거의 일정한 것으로 알려져 있기 때문이다. 본 연구에서 실험한 동일한 합금인 Sn-3.0Ag-0.5Cu의 인장강도는 약 60MPa로 Yin 등[12]이 보고하였다. 통상적으로 금속의 전단강도는 인장강도보다는 낮으며 인장 강도의 절반 이상인 것으로 알려져 있다. 따라서 Sn-3.0Ag-0.5Cu의 전단강도는 30MPa 보다는 크고 60MPa 보다는 작을 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구의 실험 결과인 최대전단강도의 범위인 32~51MPa은 솔더와 금속간 화합물의 경계면 강도에 해당하기 보다는 솔더 볼의 강도에 해당된다는 사실을 확인하고 있다.

솔더 볼의 건전성을 평가하기 위해서는 전단시험에서 최대전단하중(응력)으로 평가하기 보다는 솔더 볼을 전단으로 파단하기 위하여 필요한 일량으로 평가하는 것이 바람직하다. 특히 무연의 솔더 볼의 경우 기존의 유연 솔더보다 강도가 증가하였으나 취성파괴가 문제가 되므로 파단 에너지로 평가하는 것이 바람직하다. 본 Sn-3.0Ag-0.5Cu 솔더 볼의 경우 낮은 변형률 속도에서 불안정한 경계면 파단이 발생한 것으로 관찰되었다. 특히 낮은 변형률 속도에서 솔더 볼과 구리 경계면에서 불안정한 파단이 발생한 본 솔더 볼 연결부의 경우 전체 인성치는 솔더 연결부의 에너지를 흡수하는 능력 정도를 평가하는 매개변수로는 적절하지 않다. 그러므로 취성의 솔더 연결부의 건전성을 평가하기 위하여 최대 하중에 도달한 직후에서의 에너지를 흡수하는 능력 정도 즉 제하파괴인성치(unloading fracture toughness)가 솔더 볼 자체보다는 경계면의 에너지 흡수 능력을 평가하는 적절한 매개변수로 판단된다.

제하파괴인성치(w_{us})는 최대 전단하중이후의 전단 변형중에 흡수한 에너지로 Fig. 4에서 최대하중 이후의 전단하중-변위 선도에서 면적을 경계면 면적($=\frac{\pi \times 0.966^2}{4} mm^2$)으로 나눈 값이다. 제하파괴인성치는 Fig. 6과 같이 최대전단강도가 변형률 속도에 영향을 받듯이 이 역시 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 솔더 연결부의 제하파괴인성치는 변형률 속도에 대하여 높은 상관계수를 가지고 있는 것으로 나타났다. 최소값인 0.68kJ/m^{2}이 경계면의 파괴인성치와 관계가 있는 것으로 판단된다. Sn-4Ag-0.5Cu의 경우[7] 제하파괴인성치의 경우 약 4kJ/m^{2}로 보고되었다. 이는 본 솔더 연결부의 경우 취성의 금속간 화합물의 두께(=18μm)가 상대적으로 커서 낮은 파괴인성치를 나타낼 가능성도 있다. 파단면에 대한 SEM 사진을 통하여 낮은 속도에서는 거의 솔더볼과 구리 경계면이 파단되는 취성파괴가 발생하고 변형률 속도가 증가하면서 상대적으로 연성인 솔더 볼 자체가 파단되는 연성파단을 일부 포

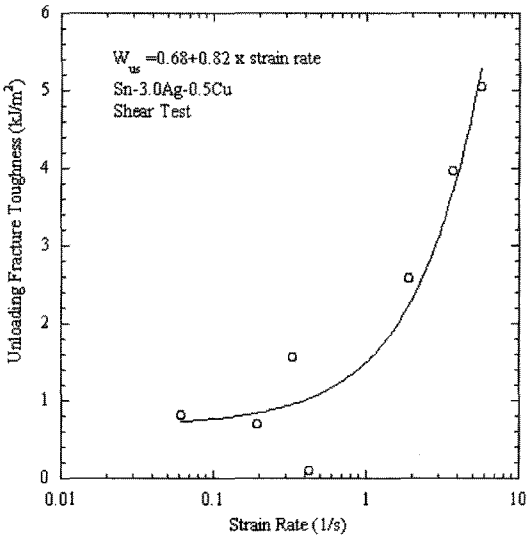


Fig. 6. The unloading fracture toughness of solder ball joint as a function of strain rate.

함하고 있어 0.68kJ/m^{2}의 값이 경계면의 파괴인성치에 관계되는 값으로 판단되며 이에 대한 추가적인 정밀한 검토가 필요하다.

본 연구에서 시도한 평균 전단응력과 변형률 속도에 대한 분석이 적절함을 파악하는 것이 필요하다. 이를 위하여 단일 솔더 볼에 대하여 일정한 전단 속도로 수행한 본 연구 데이터와 동일한 솔더볼 합금에 대한 다른 연구 실험 데이터와 비교 평가하였다.

Fig. 7은 Sn-3.0Ag-0.5Cu솔더 볼 합금에 대한 유효변형률 속도를 유효응력의 함수로 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서는 홉킨슨 압력바 기법을 이용하여 고속의 변형률 속도에 압축으로 수행한 데이터[13]와 소형의 전단 시험편을 이용하여 낮은 변형률 속도에 전단 크리프 시험을 수행한 데이터[14]를 상호 비교를 위하여 추가하였다. 단일 솔더 볼 연결부를 이용하여 전단 실험을 통하여 얻은 본 연구 실험결과가 거의 일치하는 양상을 나타내고 있어 본 연구 실험 장치 및 시험편 제작이 재현 가능한 신뢰성이 있음을 암시하고 있다. 또한 Jeng 등[13]에 발표된 실험 데이터는 높은 속도(v=4~30m/s)에서 홉킨슨 압력 바 방법을 적용하여 원통형 압축 시험편을 사용하여 얻은 실험 결과이다.

한편 Herkommer 등[14]의 연구 결과는 낮은 전단 속도에서의 소형 전단 시험편을 이용하여 얻은 결과이다. Fig. 7을 통하여 본 연구 실험 결과가 비록 실험 방법이 서로 다르고 실험 속도가 매우 낮거나 높음에도 불구하고 본 연구 결과와 서로 연속적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 Herkommer 등[14]에 의하여 발표된 낮은 전단 크리프 시험 결과와 본 실험 결과가 연속적으로 일치하는 것은 본 연구에서 시도한 솔더 볼 연결부의 평균 직경을 이용한 유효응력 개념이 적절함을 나타낸다. 이는 본 연구에서의 최대 전단강도가 일정한 하중을 가하는 크리프 실험의 전단응력에 해당함을 의미한다.

따라서 실험 기법에 상관없이 정적인 전단 시험, 전단 크리프 실험, 동적 압축시험으로부터 결정한

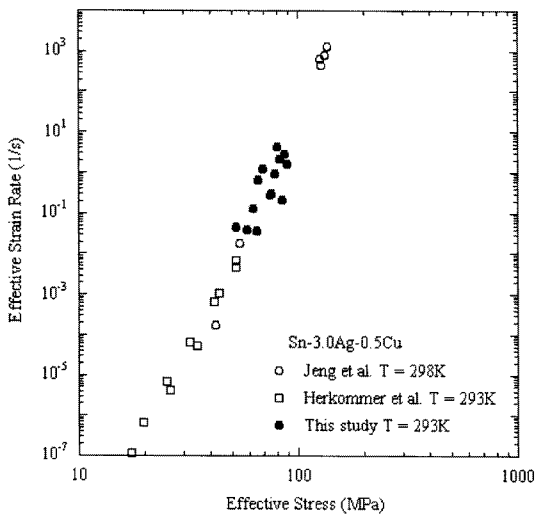
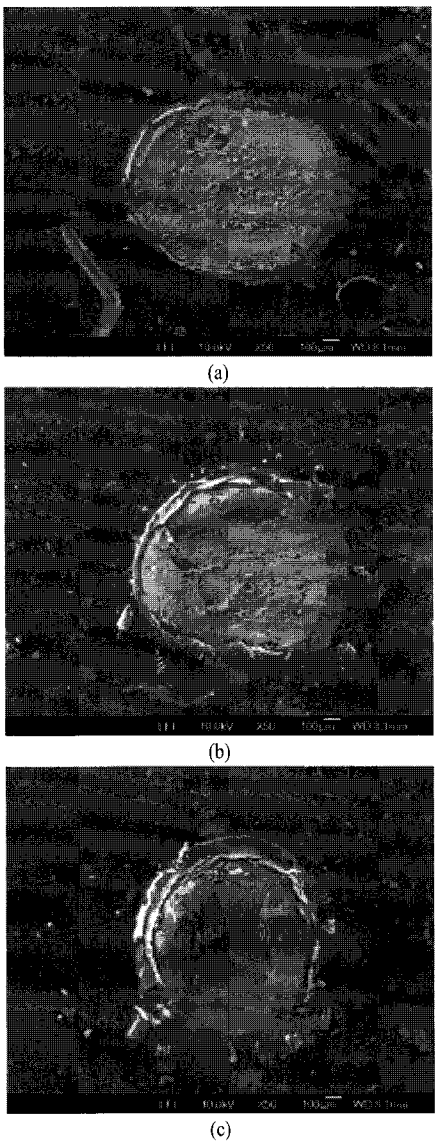


Fig. 7. The effective strain rate as a function of effective stress of shear test for Sn-3.0Ag-0.5Cu solder ball joint.



(a) (b) (c)

Fig. 8. Shear fractured surfaces of solder ball joint at (a) v=0.161mm/s, (b) v=0.074mm/s, and (c) v=2.16mm/s.

응력으로 비록 변형률 속도의 차이에 의하여 주도하는 변형 거동이 다르겠지만 전단 변형률 속도의 예측이 가능함을 알 수 있다. 그러므로 하중을 작용하는 방식이 다르거나 변형속도가 달라도 구성방정식이 제공된다면 솔더 볼의 변형 거동은 예측이 가능함을 알 수 있다.

구리와 솔더 연결부의 파단 거동을 분석하기 위하여 파단면을 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. Fig. 8(a), (b), (c)는 각각 속도 v=0.161, 0.074, 2.16mm/s에서의 파단면 사진이다. 이미 설명한 바와 같이 전단속도가 감소하면서 전단 파단은 불안정하며 이와 같은 사실은 속도 v=0.161, 0.074, 2.16 mm/s에서의 파단면인 Fig. 8(a), (b), (c)를 통하여 설명이 가능하다. 실험한 시험편에 대한 관찰을 통하여 파단 형태는 2가지의 형태로 구분된다. Fig. 8(a)는 파단이 솔더와 금속간화합물의 경계에서 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 8(b)와 (c)는 경계면 파단과 솔더 볼 자체의 파단이 혼합된 형태이다. 전단 속도가 증가하면서 전단 파단형태가 취성 파단(경계면 파단)에서 부분적인 연성파단(솔더 볼 자체 파단)됨을 알 수 있다. v=0.161, 0.074, 2.16 mm/s에서의 제하전단파괴인성치(w_{us})는 Fig. 6을 통하여 각각 0.1, 0.7, and 5.05kJ/m^{2}에 해당된다. 즉 제하전단파괴인성치가 전단 속도가 증가하면서 증가함을 알 수 있다. 따라서 제하전단파괴인성치가 파단면에서의 솔더 볼 자체의 파단정도 즉 연성파단의 정도와 경향과 일치하여 파단면의 건전성 정도를 결정하는 매개변수로 적정함을 입증하고 있다.

4. 결 론

실제 전자제품에 사용되는 솔더 연결부와 유사한 초소형 단일 솔더 연결부를 설계하고 제작하여 전단강도를 평가하였다. 전단시험은 변형률 속도 0.019 s-1~2.16 s-1 로 실온에서 피에조 엑튜에이터를 적용한 소형 인장시험기를 사용하여 수행하였다. 솔더 연결부의 전단강도는 변형률 속도가 증가하면서 32 MPa에서 51 MPa로 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 거동은 솔더 재료의 강도가 시험온도가 용융온도 기준으로 60% 이상에 해당하는 온도이므로 변형률 속도에 민감한 이유로 판단된다. 솔더 연결부의 변형률 속도는 정적 전단시험, 전단 크리프 시험 혹은 동적 압축시험과 같은 시험에 상관없이 응력을 통하여 예측이 가능한 것으로 판단된다. 전단 파단현태는 전단 속도가 증가하면서 취성에서 부분연성으로 관찰되었다. 제하파괴인성치는 파단면에서의 잔여 솔더 볼의 면적과 관계하는 것으로 나타났다.

감사의 글 : 이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 일반연구자지원사업으로 지원을 받아 연구되었음(2010-0016298).

참고문헌

1) M. Abtew, G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics", Mat. Sci. Eng. R, Vol. 27, pp. 95~141, 2000.
2) E.H. Wong, S.K.W. Seah, V.P.W. Shim, "A review of board level solder joints for mobile applications", Microelectron. Reliability, Vol. 48, pp. 1747~1758, 2008.
3) E.H. Wong, "Dynamics of board level drop impact", ASME Trans J Electron Package, Vol. 127, pp. 200~207, 2005.
4) K. Mishiro, S. Ishikawa, M. Abe, T. Kumai, Y. Higashiguchi, K. Tsubone, "Effect of the drop impact on BGA/CSP package reliability", Microelectron. Reliability, Vol. 42, pp. 77~82, 2002.
5) JEDEC Standard JESD22-B111, "Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products", 2000.
6) 권용상, 고국종, 김호경, "피에조를 이용한 초소형 단일 솔더볼 연결부의 전단 시험장치 개발", 한국윤활학회지, Vol.26, No.1, pp. 44~51, 2010.
7) H.K. Kim, F.A. Mohamed, J.C. Earthman, "Noble specimen geometry for double shear creep experiments", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 19, pp. 93~96, 1991.
8) J. Chia, B. Cotterell, T. Chai, "The mechanics of the solder ball shear test and the effect of shear rate", Mater. Sci. Eng., Vol. A417, pp. 259~274, 2006.
9) J. Lee, D. Park, J. Moon, Y. Lee, D. Shin, Y. Kim, "Reliability of composite solder bumps produced by an in-situ process", J. Electronic Mat., Vol. 29, No. 10, pp. 1264~1269, 2000.
10) F. Zhang, M. Li, B. Balakrisnan, W. T. Chen, "Failure mechanism of lead-free solder joints in flip chip packages", J. Electronic Mat. Vol. 31, No. 11, pp. 1256~1263, 2002.
11) W.H Bang, C.U. Kim, S.H. Kang, K.H. Oh, "Fracture

mechanics of solder bumps during ball shear testing: effect of bump size", J. Electronic Mat., Vol. 38, No.9, pp. 1896~1905, 2009.

12) L.M. Yin, X.P. Zhang, C, Lu, "Size and volume effects on the strength of micro scale lead-free solder joints", J. Electronic Mat. Vol. 38, No. 10, pp. 2179~2183, 2009.

13) S.T. Jeng, H.H. Chang, Y.S. Lai, T.Y. Tsai, "High strain rate behavior for Sn-37Pb eutectic alloy, lead-free Sn-1Ag-0.5Cu and Sn-3Ag-0.5Cu alloys", Microelectron. Reliability, Vol. 49, pp. 310~317, 2009.

14) D. Herkommer, M. Reid, J. Punch, "In situ optical creep observation of joint scale tin-silver- copper solder shear samples", J. Electronic Mat. Vol. 38, No. 10, pp. 2085~2095, 2009.